



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS

TRABAJO FINAL DE GRADO

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

Cuevas Cuartero, Borja

TUTORIZADO POR

Orts Grau, Salvador

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Agradecimientos:

A Salvador Orts Grau por su ayuda y dedicación, y hacer este proyecto posible.

A mis padres por el apoyo proporcionado durante el periodo del Grado.

A Belén Martín Olmos por animarme en los peores días y ser un gran apoyo.

A mis amigos que he conocido durante el Grado, ha sido una de las mejores experiencias de mi vida conocerlos y compartir estos 4 años con vosotros.

A Juanjo López por crearme una gran motivación en los estudios que ha cambiado mi forma de verlos.

Índice de Figuras

Figura 1: Convertidor electrónico de potencia y DSP TMS320F28027	9
Figura 2: Convertidor electrònic de potencia y DSP TMS320F28027	10
Figura 3: Power electronic converter and controller TMS320F28027	11
Figura 4: Objetivo de Naciones Unidas (Naciones Unidas, s.f.)	21
Figura 5: Fotografía de paneles solares (Rus, 2020)	21
Figura 6: Irradiación horizontal global (Global Solar Atlas, 2021)	22
Figura 7: Automóvil con paneles solares (Puerto, 2017)	22
Figura 8: Convertidor electrónico de potencia tipo Buck (Research Gate, s.f.)	26
Figura 9: Fases de interruptor abierto y cerrado (Wikipedia, s.f.)	27
Figura 10: Señal de modulación de ancho de pulso (PWM) (Santos, 2018)	27
Figura 11: Corriente mínima de carga en función de la tensión de salida	28
Figura 12: Conducción modo continuo (Wikipedia, s.f.)	30
Figura 13: Conducción modo discontinuo (Wikipedia, s.f.)	31
Figura 14: Esquema de control (Texas Instruments, 2021)	31
Figura 15: Herramienta PV Array de Simulink	32
Figura 16: Parámetros definidos para obtener las curvas del panel solar	33
Figura 17: Gráficas relación Corriente-Tensión y Potencia-Tensión	34
Figura 18: Primeras ecuaciones de prueba para el sistema	35
Figura 19: Código obtención de los vectores de la gráfica	35
Figura 20: Generación de ecuación polinómica y vector del rango de la corriente	36
Figura 21: Comparación de la función original y la generada	36
Figura 22: Ecuación generada para una irradiancia de 1000 W/m ²	37
Figura 23: Funciones generadas relación Corriente-Tensión para distintas Irradiancias	37
Figura 24: Funciones utilizadas para control del convertidor de potencia tipo Buck	38
Figura 25: Sistema completo, convertidor electrónico de potencia tipo Buck Simulink y control de este	39
Figura 26: Convertidor electrónico de potencia Buck en Simulink	40
Figura 27: Configuración del Slider y Combo Box	41
Figura 28: Slider, herramienta visual para entendimiento del funcionamiento	42
Figura 29: Control de convertidor DC-DC Buck	42
Figura 30: Simulación completa del sistema	43
Figura 31: Función de tensión de referencia	43
Figura 32: Respuesta de tipo sigmoideal	44
Figura 33: Ziegler y Nichols con entrada escalón de 0.3	44
Figura 34: Fórmula Ziegler y Nichols (Pardo, 2021)	45
Figura 35: Control Proporcional $k_p = 0.62$	45
Figura 36: Fórmulas calculo PI	46
Figura 37: Parámetros del controlador PID	46
Figura 38: Resultado controlador PI	47
Figura 39: Rizado de la corriente en la bobina	47
Figura 40: Rizado de la tensión de salida	48
Figura 41: Simulación del sistema con una carga	49
Figura 42: Sistema con carga variable	49
Figura 43: Bloques de Simulink para la variación de la resistencia de manera decreciente	50
Figura 44: Resultado de la variación de la resistencia de manera decreciente	50
Figura 45: Curvas corriente-tensión para las irradiancias determinadas	51
Figura 46: Tensión de referencia y tensión de salida del sistema con una resistencia variable	51
Figura 47: Tarjeta de circuito impreso (PCB)	52
Figura 48: Esquema etapa de control	53
Figura 49: Esquemático de potencia	53
Figura 50: Componente UCC27201	54
Figura 51: Configuración UCC27201	54

Figura 52: Esquema de conexiones de la tarjeta	55
Figura 53: Bucle infinito	57
Figura 54: Comienzo del programa	57
Figura 55: Macroetapa "main"	57
Figura 56: Función "Setup_PWM"	58
Figura 57: Función Init_Sci	58
Figura 58: Configuración del ADC	58
Figura 59: Interrupción ADC	58
Figura 60: Función de recepción de datos	59
Figura 61: Función de control del convertidor "Buck"	60
Figura 62: Función interrupción Timer0	61
Figura 63: Función de envío de mensaje	61
Figura 64: Almacenaje de datos obtenidos	62
Figura 65: Aumento de la variable de ConversioCount al acceder a la interrupción	62
Figura 66: Programa Hercules SETUP utility	65
Figura 67: Conexión con el puerto serie	66
Figura 68: Ejemplo del cambio de irradiancia (1000)	66
Figura 69: Ejemplo del cambio de irradiancia (100)	66
Figura 70: Comunicación serie desde el programa "Hercules"	67
Figura 71: Tarjeta de Circuito impreso, pines de lectura de señales	68
Figura 72: Salidas del microcontrolador	68
Figura 73: Entradas conversor analógico digital	68
Figura 74: Resultados experimentales (I)	69
Figura 75: Resultados experimentales (II)	70
Figura 76: Resultados experimentales (III)	70
Figura 77: Resultados experimentales (IV)	70
Figura 78: Resultados con una resistencia de 27Ω con irradiancia 0 en CCS	71
Figura 79: Resultados con una resistencia de 27Ω con irradiancia 0 en el osciloscopio	71
Figura 80: Resultado con una resistencia de 27Ω con irradiancia 1000 en el osciloscopio	72
Figura 81: Resultado con una resistencia de 27Ω con irradiancia 1000 en CCS	72
Figura 82: Convertidor de electrónico de potencia "Boost"	73
Figura 83: Inversor de corriente continua con inyección a red	74
Figura 84: Simulación del funcionamiento de transformación de energía solar a corriente alterna	74
Figura 85: Esquemático de la modificación de la tarjeta de circuito impreso	75
Figura 86: Modelo 3D de la modificación de la tarjeta de circuito impreso	76

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Características del circuito</i>	29
<i>Tabla 2: Parámetros de componentes</i>	40

Resumen:

El presente Trabajo Fin de Grado se plantea el desarrollo e implementación de un emulador de panel solar empleando un convertidor electrónico de potencia tipo Buck y un DSP TMS320F28027 de Texas Instruments para su control.

El alcance del trabajo será el siguiente:

- Simulación del convertidor electrónico de potencia tipo Buck y el control de este mediante el programa de simulación MATLAB y Simulink.
- Estudio de la plataforma hardware a emplear.
- Desarrollo del software e implementación sobre el DSP del control del convertidor Buck para realizar la emulación del comportamiento de un panel solar a partir del parámetro de radiación que se configure.
- Desarrollo de la comunicación vía serie con el DSP para la monitorización y configuración del sistema.
- Implementación sobre el hardware disponible y realización de los ensayos experimentales.

Se representa una vista del convertidor electrónico de potencia tipo Buck y el DSP TMS320F28027 de Texas Instruments (Fig. 1):

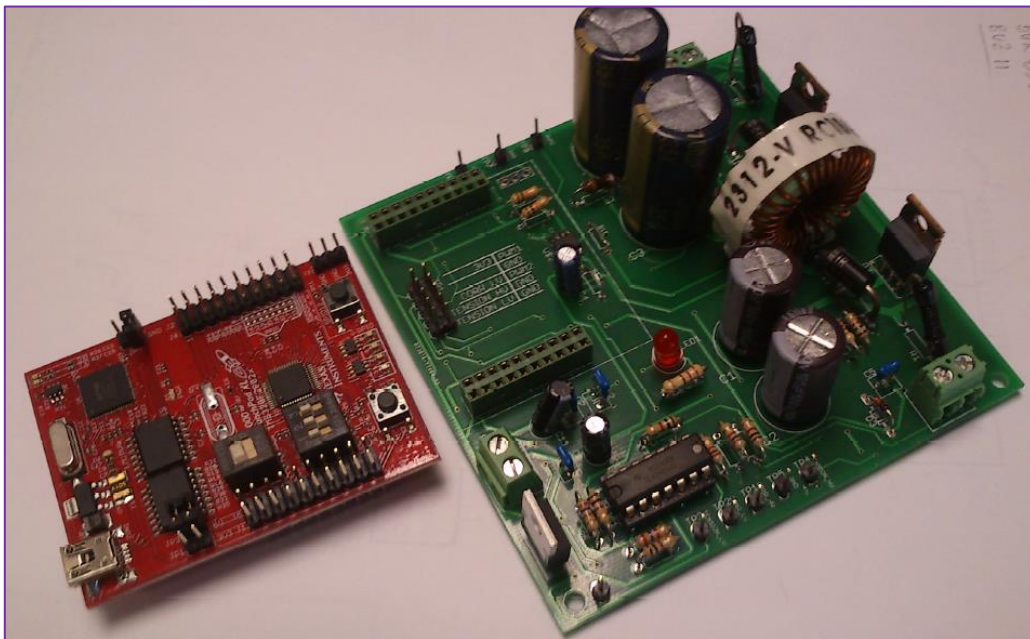


Figura 1: Convertidor electrónico de potencia y DSP TMS320F28027

Palabras clave: Emulador; Paneles solares; Fotovoltaica; Energías renovables; Control digital.

Resum:

El present Treball Fi de Grau es planteja el desenvolupament i implementació d'un emulador de panell solar emprant un convertidor electrònic de potència tipus Buck i un DSP TMS320F28027 de Texas Instruments per al seu control.

L'abast del treball serà el següent:

- Simulació del convertidor electrònic de potència tipus Buck i el control d'aquest mitjançant el programa de simulació MATLAB i Simulink.
- Estudi de la plataforma hardware a emprar.
- Desenvolupament del software i implementació sobre el DSP del control del convertidor Buck per a realitzar l'emulació del comportament d'un panell solar a partir del paràmetre de radiació que es configure.
- Desenvolupament de la comunicació via serie amb el DSP per al monitoratge i configuració del sistema.
- Implementació sobre el hardware disponible i realització del assajos experimentals.

Es presenta una vista del convertidor electrònic de potència tipus Buck i el DSP TMS320F28027 de Texas Instruments (Fig. 2):

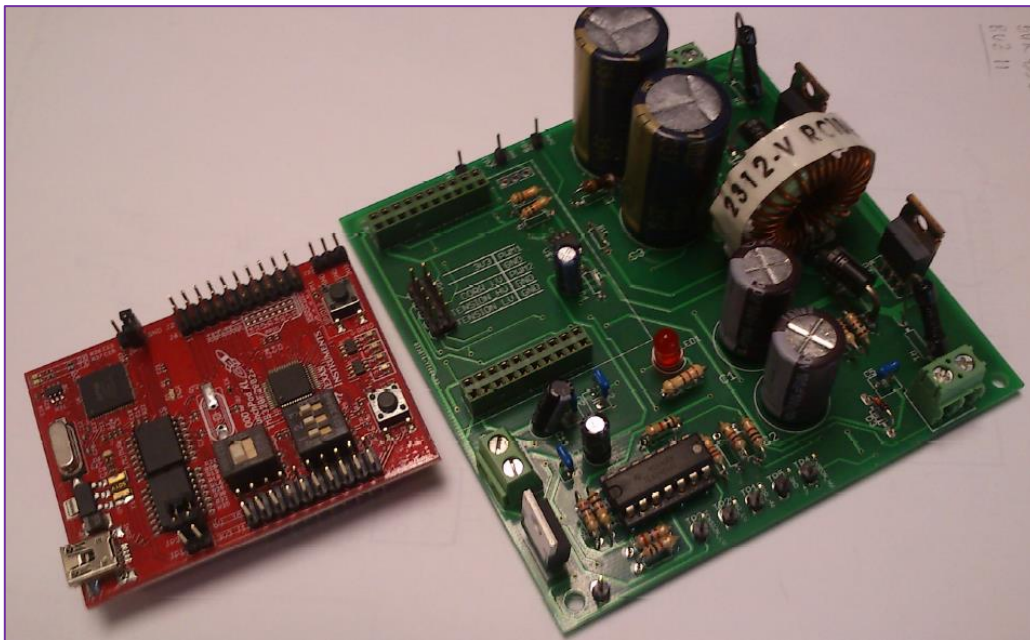


Figura 2: Convertidor electrònic de potència y DSP TMS320F28027

Paraules clau: Emulador; Panells solars; Fotovoltaica; Energies renovables; Control digital.

Summary:

The present Final Degree Project is about the development and implementation of a solar panel emulator using a Buck type power electronic converter and a Texas Instruments TMS320F28027 DSP for its control.

The scope of the work will be as follows:

- Simulation of the Buck type electronic power converter and its control using MATLAB and Simulink simulation software.
- Study of the hardware platform to be used.
- Development of the software and implementation on the DSP of the Buck converter control to emulate the behaviour of a solar panel based on the radiation parameter to be configured.
- Development of serial communication with the DSP for system monitoring and configuration.
- Implementation on available hardware and performance of experimental test.

A view of the buck power electronic converter and the Texas Instruments TMS320F28027 DSP is shown (Fig. 3):

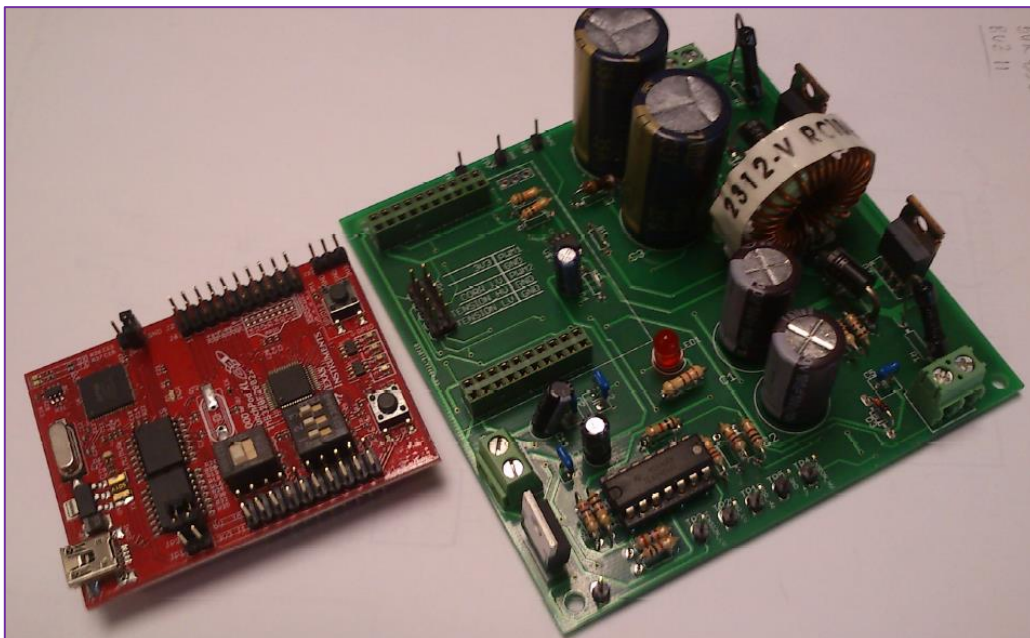


Figura 3: Power electronic converter and controller TMS320F28027

Keywords: Emulator; Solar panels; Photovoltaic; Renewable energy; Digital control.

Contenido

El presente proyecto describe el desarrollo, simulación e implementación de un emulador de panel solar. Con el fin de presentar el diseño, simulación, cálculo e implementación del alcance definido.

El proyecto se compone por:

- *Documento 1:* Memoria técnica descriptiva.
- *Documento 2:* Planos
- *Documento 3:* Pliego de condiciones
- *Documento 4:* Presupuesto
- *Documento 5:* Anexos



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS

DOCUMENTO I: MEMORIA TÉCNICA DESCRIPTIVA

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

Cuevas Cuartero, Borja

TUTORIZADO POR

Orts Grau, Salvador

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

ÍNDICE

1. Introducción	19
2. Objeto del proyecto y alcance	20
3. Antecedentes.....	21
4. Estudio de necesidades y limitaciones.....	24
5. Alternativas y solución adoptada	25
6. Descripción detallada de la solución adoptada	26
6.1. Convertidor electrónico de potencia tipo Buck	26
6.1.1. Conducción modo continuo	29
6.1.2. Conducción modo discontinuo.....	30
6.2. Control del convertidor electrónico de potencia de tipo Buck.....	31
6.3. Obtención de la curva de Corriente-Tensión de un panel	32
6.3.1. Obtención de las primeras curvas de control.....	34
6.3.2. Optimización de las curvas de control	35
6.4. Simulación del convertidor electrónico de potencia tipo Buck y el control de este mediante el programa de simulación MATLAB y Simulink.....	39
6.4.1. Convertidor electrónico de potencia Buck en Simulink	40
6.4.2. Control del convertidor electrónico de potencia.....	42
6.4.3. Resultados de la Simulación	47
6.5. Estudio de la plataforma hardware a emplear.....	52
6.6. Desarrollo del software e implementación sobre el DSP del control del convertidor Buck para realizar la emulación del comportamiento de un panel solar a partir del parámetro de radiación que se configure.	56
6.6.1. Figuras del diagrama de flujo	57
6.6.2. Explicación de los diagramas de flujo del programa.....	62
6.7. Comunicación vía serie con el DSP para la monitorización y configuración del sistema.	65
6.8. Implementación sobre el hardware disponible y realización de los ensayos experimentales.	68

7. Propuestas de mejora o ampliación	73
8. Conclusiones.....	75
9. Bibliografía	77

1. Introducción

Este proyecto se basa en el desarrollo e implementación de un emulador de panel solar mediante un convertidor electrónico de potencia de tipo “*Buck*” controlado mediante el DSP TMS320F28027 de Texas Instruments y su simulación mediante el programa MATLAB y Simulink.

Dicho proyecto se ha llevado a cabo como Trabajo Final de Grado para la titulación de Grado en Ingeniería Electrónica, Industrial y Automática (163). Realizado por Borja Cuevas Cuartero y tutorizado por Salvador Orts Grau.

Este proyecto, se ha realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño (ETSID), en el laboratorio Mestral ubicado en el edificio 7B en la tercera planta.

2. Objeto del proyecto y alcance

El objetivo o finalidad del proyecto es realizar un sistema electrónico de potencia que sea capaz de emular un panel solar, realizando tanto su simulación como implementación. La utilidad de un emulador solar radica en el hecho de poder reproducir el comportamiento de un campo de paneles fotovoltaicos sin la necesidad de disponer de la instalación real. El emulador permite la investigación en laboratorio para el desarrollo y testeo de los convertidores electrónicos de la instalación fotovoltaica, y su control, evitando los costes y limitaciones de una instalación fotovoltaica real. Se pretende, en un primer momento, desarrollar un prototipo de emulador de baja potencia, para posteriormente y basado en este prototipo, escalarlo a potencias del orden de kW.

Existen diferentes configuraciones de convertidores electrónicos de potencia que podrían emplearse para la implementación del emulador. El sistema que se presenta se implementa mediante un convertidor de potencia de tipo “*Buck*” o reductor, el cual a partir de una entrada de tensión continua puede regular su tensión de salida entre el valor de entrada y cero. Este comportamiento es adecuado para emular el funcionamiento de un panel solar, en función de la irradiancia solar en un instante.

Para el control digital del convertidor “*Buck*” se emplea un microcontrolador TMS320F28027 de Texas Instruments, el cual viene montado en una placa de desarrollo denominada LAUNCHXL-F28027F. El controlador dispone de convertidores A/D que permitirán implementar los lazos de regulación de tensión y corriente. Igualmente, el controlador se encargará de realizar la modulación PWM para el control del semiconductor del convertidor. La tensión de salida del convertidor es función del ciclo de trabajo de la señal de control PWM.

Además, en el microcontrolador LAUNCHXL-F28027F se implementará el software para realizar la comunicación serie con un PC, de forma que desde este se pueda controlar y monitorizar diferentes variables del sistema.

La simulación se realizará mediante el programa Simulink de MATLAB. Simulink contiene la toolbox Simscape que incluye librerías para el desarrollo y simulación de sistemas electrónicos de potencia. Pudiendo así, simular el convertidor y su control, y observar los resultados de manera gráfica.

3. Antecedentes

Actualmente, los paneles solares se diseñan para la producción de electricidad, estos convierten la radiación del Sol en energía eléctrica. El uso de los paneles solares es uno de los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, concretamente el séptimo, que hace referencia a energía asequible y no contaminante (Fig. 4).



*Figura 4: Objetivo de Naciones Unidas
(Naciones Unidas, s.f.)*



*Figura 5: Fotografía de paneles solares
(Rus, 2020)*

Este objetivo fue adoptado como objetivo global los países líderes mundiales el 25 de septiembre de 2015. (Naciones Unidas, s.f.)

Esto conlleva generar energía eficiente y renovable. Por lo tanto, el objetivo es eliminar todo tipo de creación de energía eléctrica mediante combustibles fósiles o materiales no renovables.

De entre las fuentes de energía renovables, una disponible en todo el planeta es la energía solar. Como el resto de fuentes renovables, se trata de energías limpias, gratuitas y accesibles a cualquier ser humano. La disponibilidad del recurso es mayor en ciertas zonas del planeta donde las horas de Sol y la irradiación sean mayores (Fig. 6).

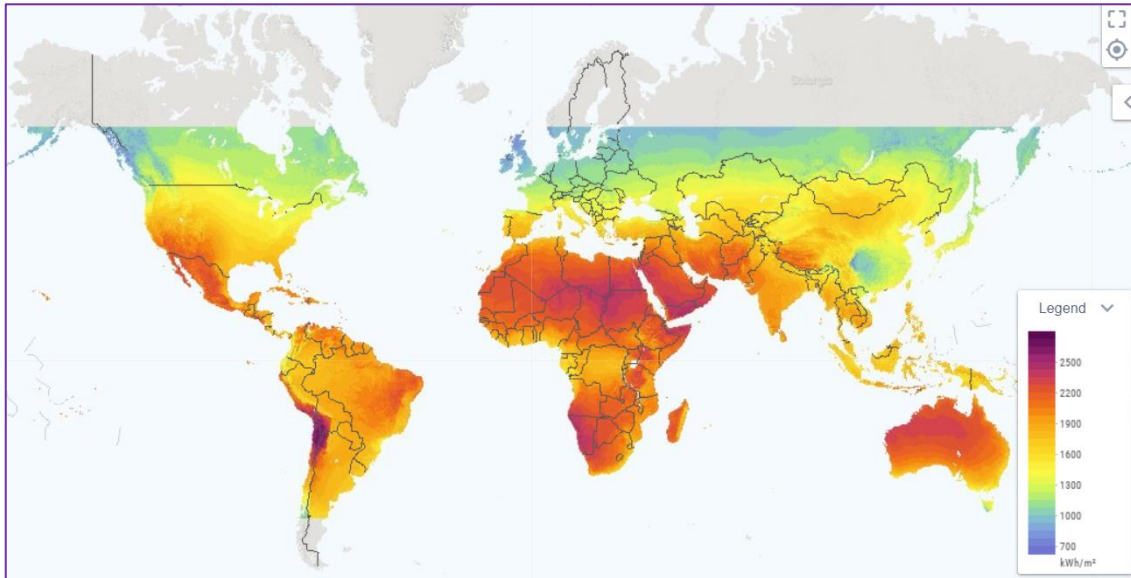


Figura 6: Irradiación horizontal global (Global Solar Atlas, 2021)

Hoy en día, con el aumento de precio de la luz, muchas personas están optando por implantar paneles solares en sus domicilios, además de las personas que quieran optar por utilizar energía renovable. Esto provoca que cada año que pase, aumente la compra de paneles respecto de años anteriores, aumentando alrededor de un 15 % cada año.

La investigación en este campo es un factor importante, debido a que es una fuente de energía gratuita y los hogares pueden autoabastecerse completamente. Actualmente se están realizando estudios de implementación en vehículos eléctricos para autoabastecerse también (Fig. 7).



Figura 7: Automóvil con paneles solares (Puerto, 2017)

Por ende, es un campo de investigación abierto actualmente que puede cambiar el futuro y que junto con otras fuentes de energía renovables eliminar el uso de combustibles fósiles en la industria energética.

Un ejemplo de emulador práctico, es un kit denominado "*Solar Explorer*", desarrollado por Texas Instruments cuyo objetivo es diseñar un control de inversor fotovoltaico a baja tensión. Dicho kit contiene un convertidor de potencia electrónico de tipo "*Buck-Boost*", es decir, reductor y elevador, incluye también un inversor y un cargador de baterías.

4. Estudio de necesidades y limitaciones

En este apartado se van a describir las necesidades técnicas del proyecto y sus funciones.

La implementación del presente proyecto radica en cubrir la necesidad del Departamento de Ingeniería Electrónica de un emulador de panel solar, para uso docente y de investigación del propio departamento.

Para llevar a cabo este proyecto es necesario un ordenador portátil donde se pueda simular, también tiene la utilidad de poder programar el microcontrolador y realizar la comunicación serie con este, además de poder redactar el proyecto.

También, harán falta equipos como un osciloscopio, para poder medir las medidas del hardware, un multímetro, para medir la continuidad del hardware y verificar su correcto funcionamiento, y un generador de funciones. Una tarjeta de circuito impreso donde poder emular el sistema y realizar el control.

Por último, el microcontrolador LAUNCHXL-F28027F donde poder realizar las medidas del convertidor electrónico de potencia y realizar toda la programación del sistema, comunicación, algoritmos...

Las limitaciones son escasas, debido a que se ha podido ir al laboratorio Mestral a emplear un equipo adecuado para realizar este proyecto. La única limitación ha sido la tarjeta de circuito impreso o hardware, ya que se ha tenido que utilizar un sistema bidireccional, en un sentido de tipo reductor de tensión y en el otro elevador.

5. Alternativas y solución adoptada

Para este proyecto hay distintas alternativas. Primeramente, el hardware a emplear es un convertidor electrónico de potencia electrónico que permita regular la tensión de salida desde 0 V hasta un valor determinado. Existen diferentes tipos de convertidores que podrían realizar esta función. Entre ellos, los dos convertidores más empleados para realizar esta función son, el convertidor tipo “*Buck*” o reductor, y el convertidor tipo “*Buck-Boost*” que puede hacer tanto de reductor como de elevador.

El convertidor “*Buck-Boost*” presenta una ventaja frente al “*Buck*” respecto a la tensión de entrada. Esto, es debido a que en el “*Buck-Boost*” puede obtener una misma tensión de salida que en el “*Buck*” con una menor tensión de entrada.

A pesar de la ventaja del convertidor “*Buck-Boost*”, en cuanto a la tensión de entrada, se ha elegido emplear un convertidor “*Buck*” debido a la disponibilidad de una placa de circuito impreso para desarrollar el TFG. Se dispone de un convertidor bidireccional desarrollado en el laboratorio de electrónica de potencia, capaz trabajar en modo “*Buck*” o “*Boost*”. En este caso se aprovechará este convertidor funcionando en modo reductor “*Buck*”.

Con respecto a los dispositivos de control. Se puede utilizar cualquier tipo de microcontrolador debido a que los requerimientos hardware no son altos. Para el control digital, va a ser necesario que el microcontrolador realice una lectura de tensión y corriente de salida del convertidor, además de generar una señal de modulación de ancho de pulso, y llevar a cabo una comunicación serie. Cualquier otro DSP es válido.

De entre la gran variedad de microcontroladores disponibles en el mercado y que cumplirían con los requerimientos del TFG, se ha decidido utilizar el DSP TMS320F28027 empleando la placa de desarrollo LAUNCHXL-F28027F. Por su disponibilidad en el laboratorio y que además el autor del proyecto estaba familiarizado con él por su uso en la asignatura de Sistemas Digitales Aplicados (12158) del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática (163).

Para el programa de simulación se podría haber utilizado cualquier otro tipo de programa de simulación de electrónica como Proteus o orCAD Capture CIS.

Sin embargo, Simulink tiene una librería de electrónica de potencia, y tiene un elemento de simulación de panel solar, donde se pueden modificar los parámetros de este. Y después, se podrían captar los datos de las curvas de relación de corriente y tensión para utilizarlos en el emulador de panel solar.

6. Descripción detallada de la solución adoptada

En la solución adoptada se va a realizar un recorrido por los objetivos del proyecto, para explicar detalladamente como se ha avanzado en el proyecto y los resultados obtenidos.

6.1. Convertidor electrónico de potencia tipo Buck

El convertidor “*Buck*” o reductor, es un convertidor de corriente continua a corriente continua. El objetivo del convertidor es disminuir la tensión de salida.

Es decir, la tensión de salida del convertidor no puede superar la tensión de entrada, y su rango de salida se sitúa entre cero voltios y la de entrada.

Este convertidor está compuesto por una fuente de alimentación de corriente continua (E), un MOSFET que actúa como interruptor en función de una señal de modulación de ancho de pulso (PWM), un diodo (D) para conducir la corriente en el sentido requerido mientras el interruptor está abriendo el circuito, una bobina (L), un condensador (C) y una resistencia de carga (R) (Fig. 8).

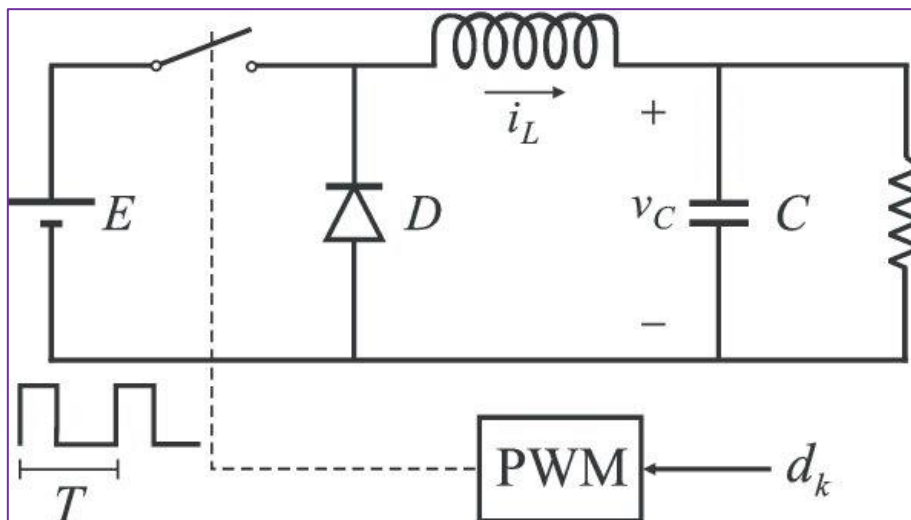


Figura 8: Convertidor electrónico de potencia tipo Buck (Research Gate, s.f.)

El funcionamiento de este tipo de convertidor está dividido en dos fases (Fig. 9). La fase cuando el interruptor cierra el circuito y la energía se transfiere de la fuente de alimentación a la bobina, el condensador y la carga; y cuando el interruptor está abierto y, es la bobina y el condensador quienes transfieren la energía a la carga.

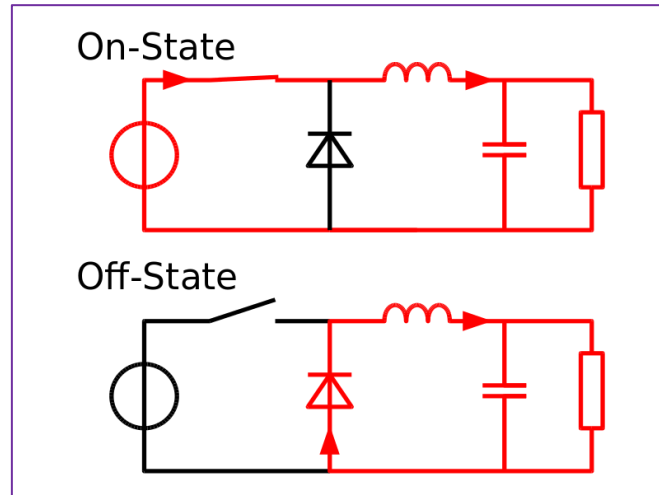


Figura 9: Fases de interruptor abierto y cerrado (Wikipedia, s.f.)

La señal de modulación de ancho de pulso (Fig. 10), es una señal que sirve para realizar el control sobre el convertidor. En concreto, controla el tiempo que está cerrado y abierto el circuito, cuando dicha señal está en nivel alto el circuito está cerrado, y de lo contrario está abierto. La fórmula para conocer el ciclo de trabajo (*Duty Cycle*) es la siguiente.

$$\text{Ciclo de Trabajo} = \frac{\text{Tiempo señal en estado alto}}{\text{(Periodo de la señal)}}$$

Con esta fórmula se obtiene un ciclo de trabajo entre cero y la unidad, en caso de quererlo en porcentaje, habría que multiplicarlo por cien.

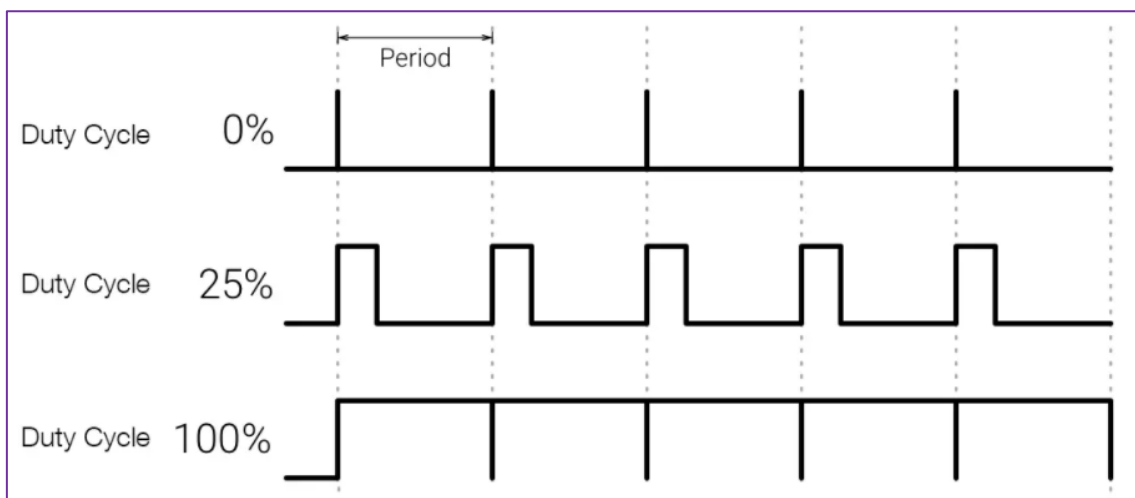


Figura 10: Señal de modulación de ancho de pulso (PWM) (Santos, 2018)

Entrando más en detalle en el análisis del circuito, tiene dos modos, continuo y discontinuo.

Para conocer en qué modo se utiliza el convertidor, hay que hacer un cálculo de la corriente mínima de carga, la que se puede expresar de la siguiente forma:

$$I_{omin} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_o \cdot (1 - \frac{V_o}{V_i})}{L \cdot F_{sw}}$$

La tensión de salida es “Vo”, y la de entrada o tensión de la fuente de alimentación es “Vi”, “L” el valor de la bobina, y “Fsw” el valor de la frecuencia de conmutación de la señal de modulación de ancho de pulso. En muchas aplicaciones, la tensión de salida del convertidor es fija, sin embargo, para la implementación del emulador de panel solar, la tensión de salida debe ser variable. Por ello en la figura siguiente (Fig. 11) la corriente de carga que representa el límite entre conducción continua y discontinua, en función de la tensión de salida.

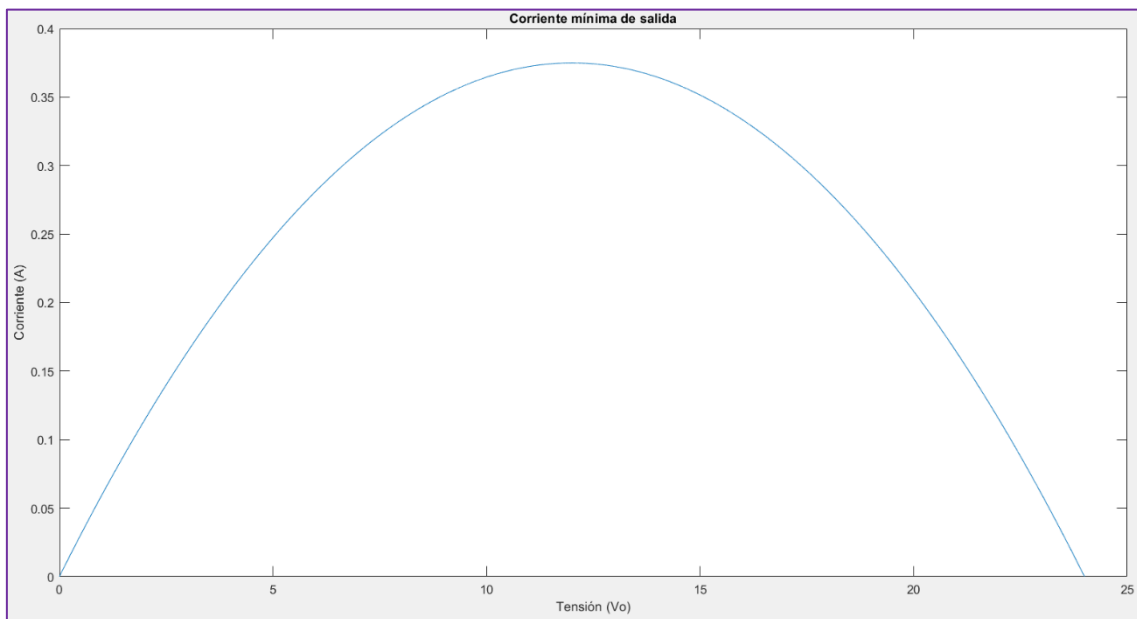


Figura 11: Corriente mínima de carga en función de la tensión de salida

Se va a mostrar una tabla (Tabla 1) con las características del circuito utilizadas para la representación anterior.

Características	Valor
V_i	24 V
L	40 μ H
Fsw	200 kHz

Tabla 1: Características del circuito

Por lo tanto, para cualquier valor superior a 0.375 A se asegura conducción continua. Con corriente de carga inferiores puede trabajar en conducción discontinua. Esto se puede conocer si la corriente de carga es superior a la corriente determinada por la fórmula en función de la tensión de salida.

6.1.1. Conducción modo continuo

Este modo es el que se va a utilizar durante todo el proyecto. En este modo la corriente de la bobina nunca llega a cero amperios (Fig. 12). Durante el tiempo en el que el interruptor se encuentra cerrado la corriente en la bobina aumenta linealmente. Y la tensión en la bobina es la diferencia entre la tensión de entrada y la tensión de salida.

$$V_L = V_I - V_O$$

Por otra parte, cuando el interruptor se cierra la tensión en la bobina pasa a ser negativa y la corriente disminuye linealmente.

$$V_L = -V_O$$

La variación lineal de la corriente en la bobina viene dada porque la tensión en la bobina es igual al valor de la bobina multiplicado por la derivada de la corriente que pasa por ella.

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

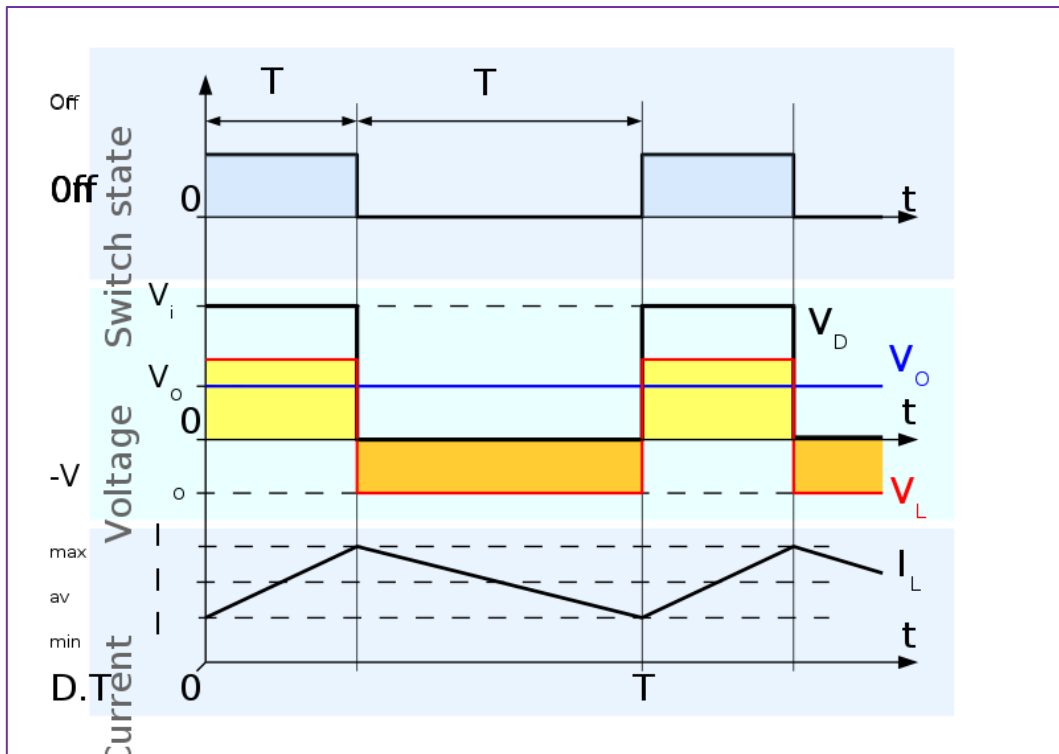


Figura 12: Conducción modo continuo (Wikipedia, s.f.)

La corriente en la resistencia de carga es continua, se puede calcular su tensión conociendo el valor del ciclo de trabajo y la tensión de alimentación del circuito. El ciclo de trabajo (D) en este caso es unitario.

$$V_o = D \cdot V_i$$

6.1.2. Conducción modo discontinuo

Este modo de conducción no se va a utilizar en ningún momento para este proyecto, aunque se va a realizar una breve explicación.

La única diferencia respecto al anterior, es que en este la bobina llega a descargarse al final del ciclo de conmutación (Fig. 13). Por lo tanto, el valor medio de la tensión en la bobina es 0.

$$(V_i - V_o) \cdot D \cdot T - V_o \cdot \delta \cdot T = 0$$

En esta ecuación se puede despejar el valor de δ para conocer el tiempo en el cual la corriente está disminuyendo linealmente.

$$\delta = \frac{V_i - V_o}{V_o} \cdot D$$

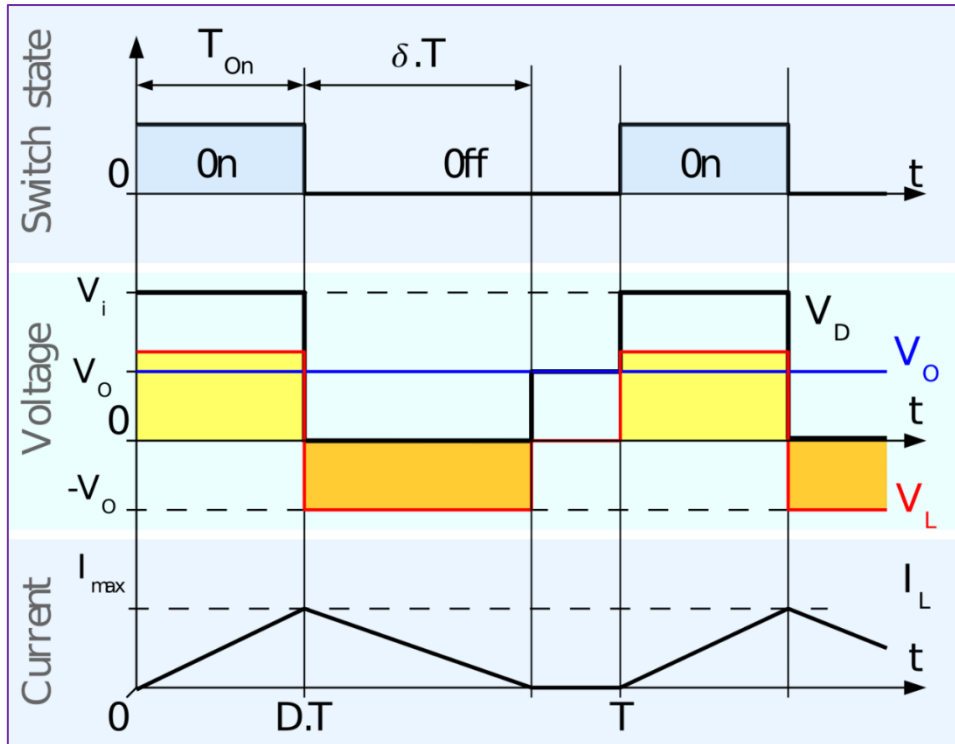


Figura 13: Conducción modo discontinuo (Wikipedia, s.f.)

6.2. Control del convertidor electrónico de potencia de tipo Buck

Para el control del sistema, tanto en la simulación como en la implementación se ha utilizado un bucle de control de tipo Proporcional e Integral (PI) (Fig. 14).

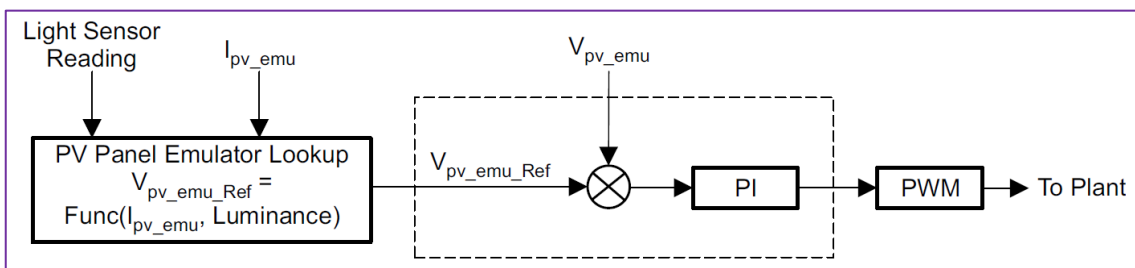


Figura 14: Esquema de control (Texas Instruments, 2021)

El tipo de control es por tensión. En un principio las entradas al bucle de control son la irradiancia, a determinar, la corriente y la tensión de salida del convertidor.

Mediante la corriente de salida y una irradiancia dada, se puede obtener una tensión de referencia que es la que debe seguir el convertidor. En el siguiente apartado se dará la explicación de la obtención de la tensión de referencia.

Una vez obtenida una tensión de referencia, se compara con la tensión actual de salida, seguido de un control Proporcional e Integral que se encargará de que la tensión de salida sea igual a la tensión de referencia.

Los parámetros del control, tanto el Proporcional como el Integral, se explicarán en apartado de simulación e implementación, debido a que no se han utilizado los mismos.

6.3. Obtención de la curva de Corriente-Tensión de un panel

Tanto para la simulación como para la parte experimental, se han obtenido las ecuaciones que relacionan la corriente y tensión de salida del sistema en función de un parámetro de irradiancia introducido al sistema.

La irradiancia es la magnitud que relaciona la potencia incidente con una unidad de superficie. Es el valor de entrada del sistema. A partir de la radiación incidente se determina el punto de funcionamiento del sistema.

Para la obtención de este tipo de curvas se ha utilizado Simulink, en concreto las herramientas pertenecientes a sistemas de potencia especializados, en el apartado de energías renovables (Fig. 15).

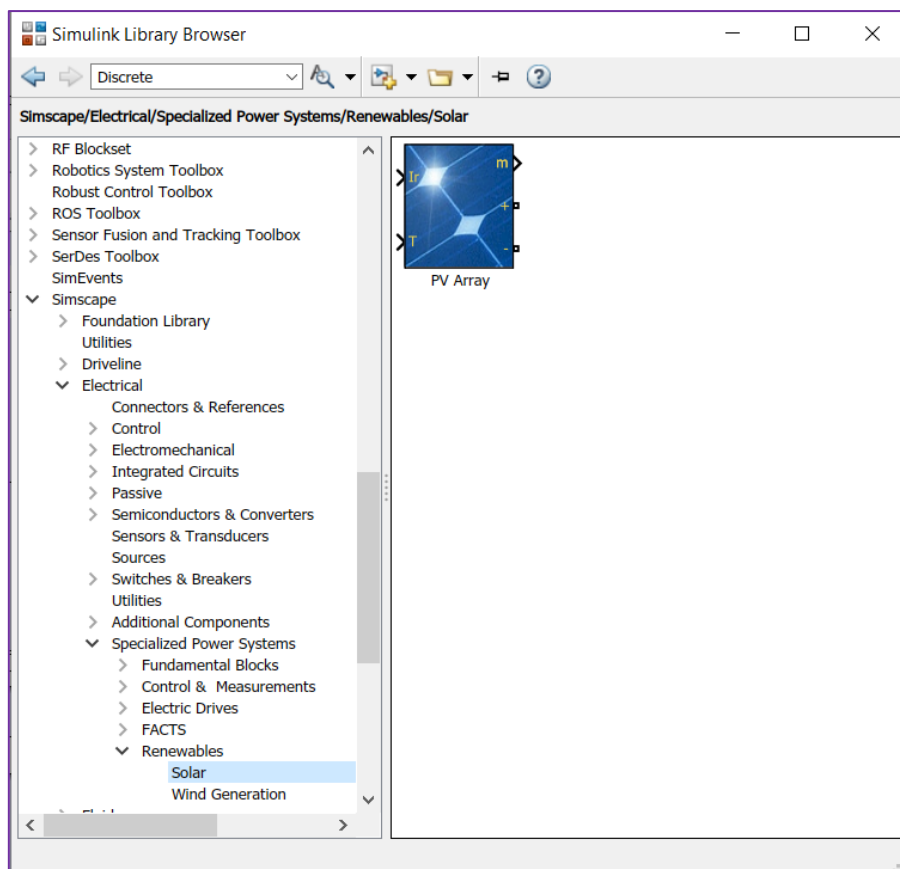


Figura 15: Herramienta PV Array de Simulink

Este tipo de herramienta sirve para simular un panel solar, se puede elegir algunos tipos de paneles de características reales que contiene esta librería. Aunque, en este caso se van a definir los parámetros, ya que la implementación está limitada a una fuente de alimentación de 30 V y 1 A (Fig. 16).

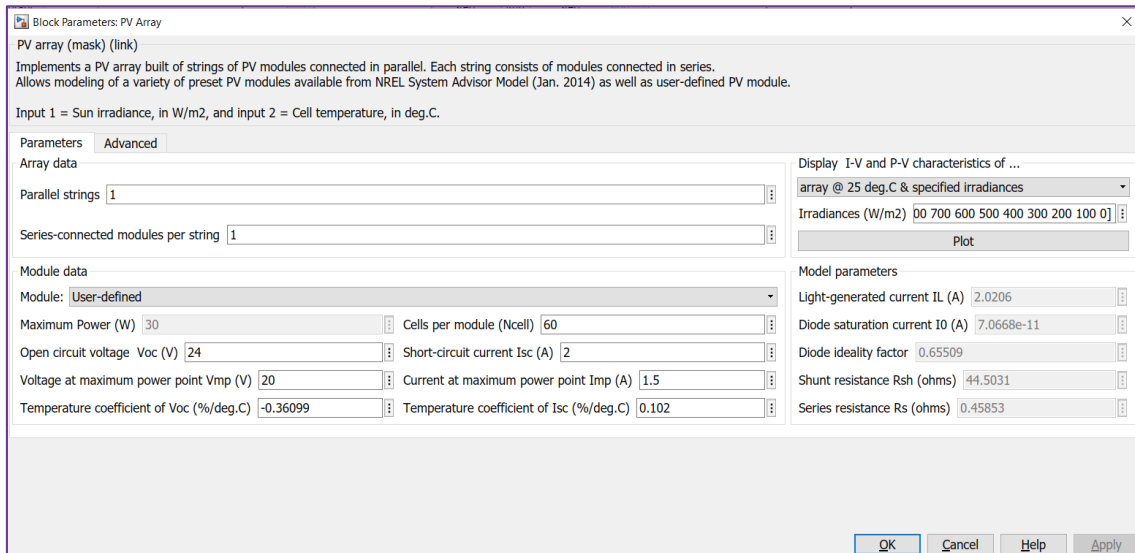


Figura 16: Parámetros definidos para obtener las curvas del panel solar

Para este caso se ha definido que la tensión máxima en circuito abierto será de 24 V y una corriente de cortocircuito de 2 A; y el punto de máxima potencia se sitúa en 20 V de tensión y 1,5 A de corriente.

Esta herramienta ha tenido una gran importancia durante el desarrollo del proyecto, ya que en el apartado de indicador se pueden definir las irradiancias y obtener una gráfica que relacione la corriente con la tensión, y la potencia con la tensión con unos parámetros de irradiancia definidos.

Con estas gráficas, posteriormente, se obtendrán los puntos para poder crear las ecuaciones que se utilizarán para el control del convertidor de potencia tipo "Buck". La gráfica de interés en concreto es la que relaciona corriente con tensión, debido a que el parámetro a controlar es la tensión de salida.

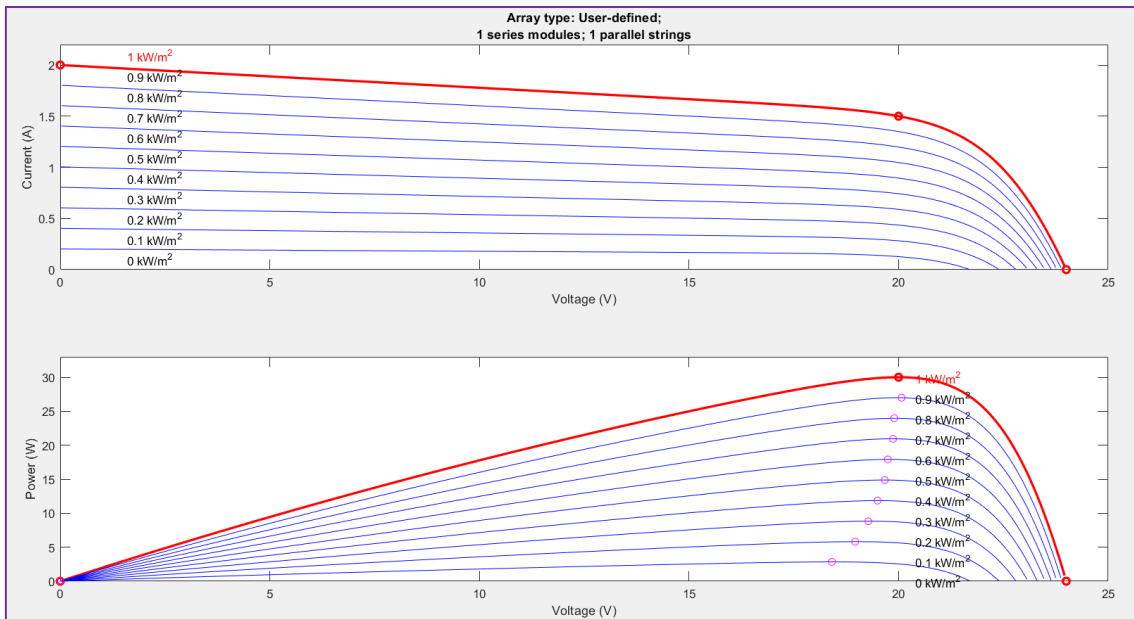


Figura 17: Gráficas relación Corriente-Tensión y Potencia-Tensión

6.3.1. Obtención de las primeras curvas de control

En un principio se obtuvieron los puntos (Fig. 17) a mano y se guardó en un fichero de Excel con la idea de utilizar su herramienta de creación de ecuaciones.

Como se va a realizar el control de tensión, hay que invertir las gráficas. Es decir, hay que crear una ecuación donde la salida sea la tensión y las entradas sean la corriente de salida en ese instante y la irradiancia.

Primeramente, se utilizó para generar la ecuación una línea de tendencia de tipo polinómica de máximo orden permitido que es seis (Fig. 18).

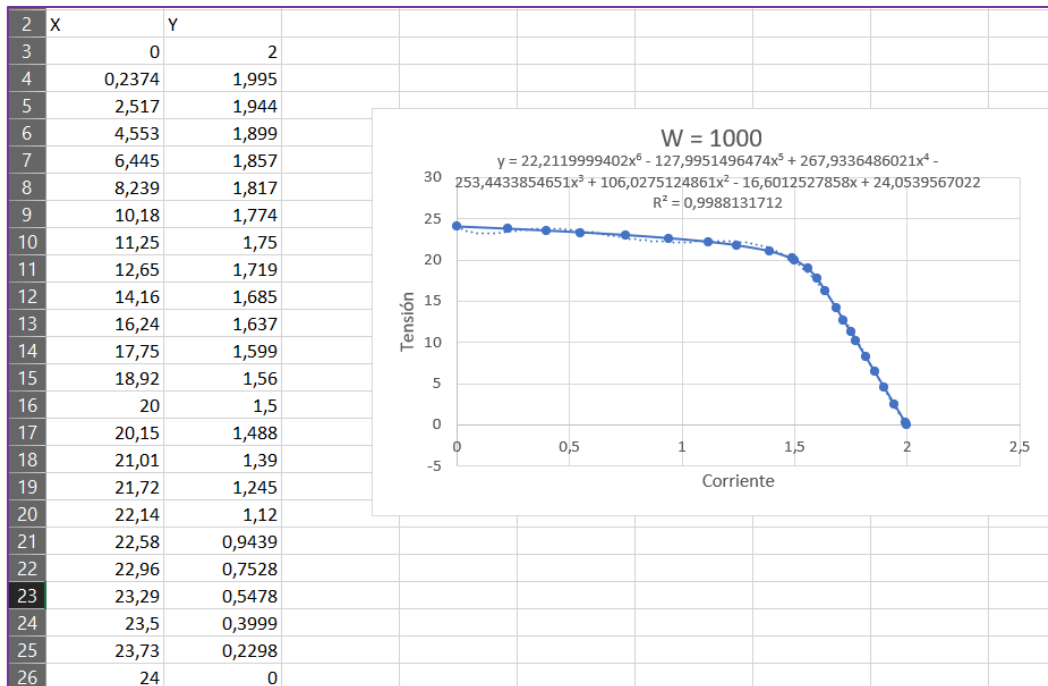


Figura 18: Primeras ecuaciones de prueba para el sistema

Las demás ecuaciones siguen una tendencia parecida, para las primeras pruebas de la simulación y experimento han sido útiles. Pero, se puede observar que al ser una polinómica tiene bastantes curvas y se pueden optimizar.

6.3.2. Optimización de las curvas de control

Para la obtención de las curvas de control, se han utilizado las funciones de la 'Fig. 17', seleccionando la gráfica superior, es decir, la que relaciona la corriente con la tensión en función de una irradiancia. Una vez seleccionada, se pueden extraer los puntos de la gráfica mediante el programa MATLAB (Fig. 18).

```
%Ecuacion W = 1000
h = findobj(gca, 'Type', 'line')
x = get(h, 'Xdata');
y = get(h, 'Ydata');
```

Figura 19: Código obtención de los vectores de la gráfica

La primera línea sirve para encontrar la función seleccionada, y las otras dos para guardar los puntos de la gráfica. Una vez obtenidos estos vectores de puntos se puede obtener una ecuación. Para crear una ecuación más exacta se

ha optado por utilizar la herramienta “polyfit” de MATLAB. Esta sirve para generar ecuaciones polinómicas del orden que se quiera, en este caso se ha optado por orden 10 (Fig. 20).

Además, también se ha creado un vector “T” que abarca todo el rango de corriente que el sistema pueda tener, para hacer una representación gráfica (Fig. 20).

```
p = polyfit(y{2,1},x{2,1},10)
T = 0.0342:0.001:1.999;
```

Figura 20: Generación de ecuación polinómica y vector del rango de la corriente

Por último, se ha representado la ecuación obtenida junto a la gráfica original para comparar su similitud (Fig. 21).

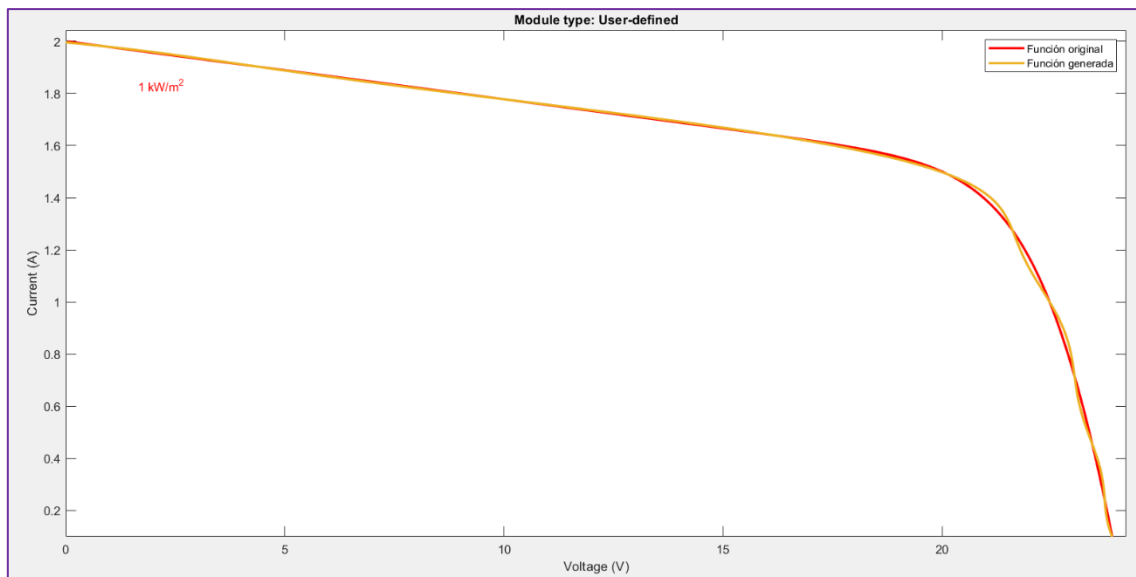


Figura 21: Comparación de la función original y la generada

Se puede observar que prácticamente la función generada con el método elegido sigue a la función original, sí que es cierto que tiene oscilaciones, pero al ser una ecuación de tipo polinómica es algo que se asume.

A continuación, se invierte la gráfica (Fig. 22), esto es debido a lo comentado anteriormente, para realizar un control de tensión la “y” de la ecuación debe ser la tensión.

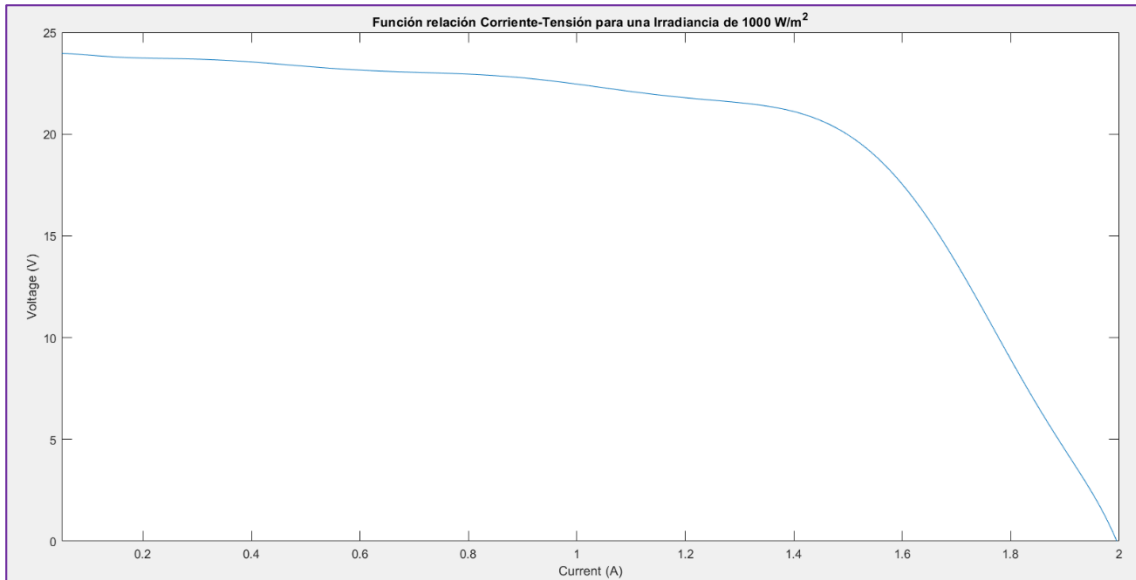


Figura 22: Ecuación generada para una irradiancia de 1000 W/m²

Para generar el resto de funciones, se ha seguido el mismo método utilizado anteriormente, y una vez obtenidas todas las ecuaciones, se han representado, como debería, en su forma natural, la corriente en el eje “y” y la tensión en el eje “x” (Fig. 23).

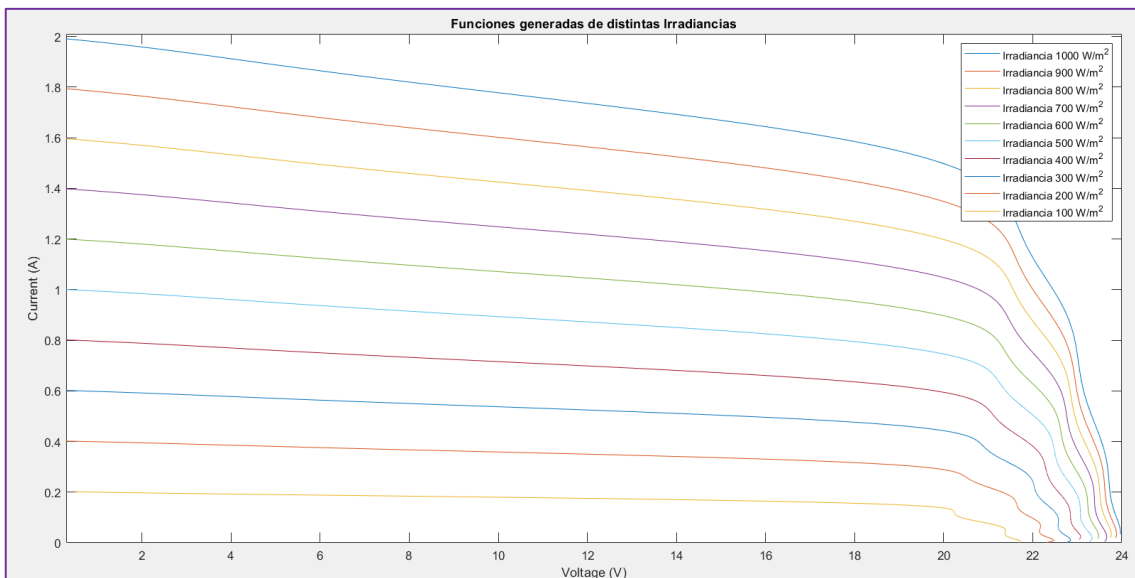


Figura 23: Funciones generadas relación Corriente-Tensión para distintas Irradiancias

A continuación, se muestra como queda la representación de las ecuaciones que utilizadas para el control del convertidor de potencia tipo “Buck”, invirtiendo las de la figura anterior, para poder obtener la tensión de salida en función de la corriente (Fig. 24).

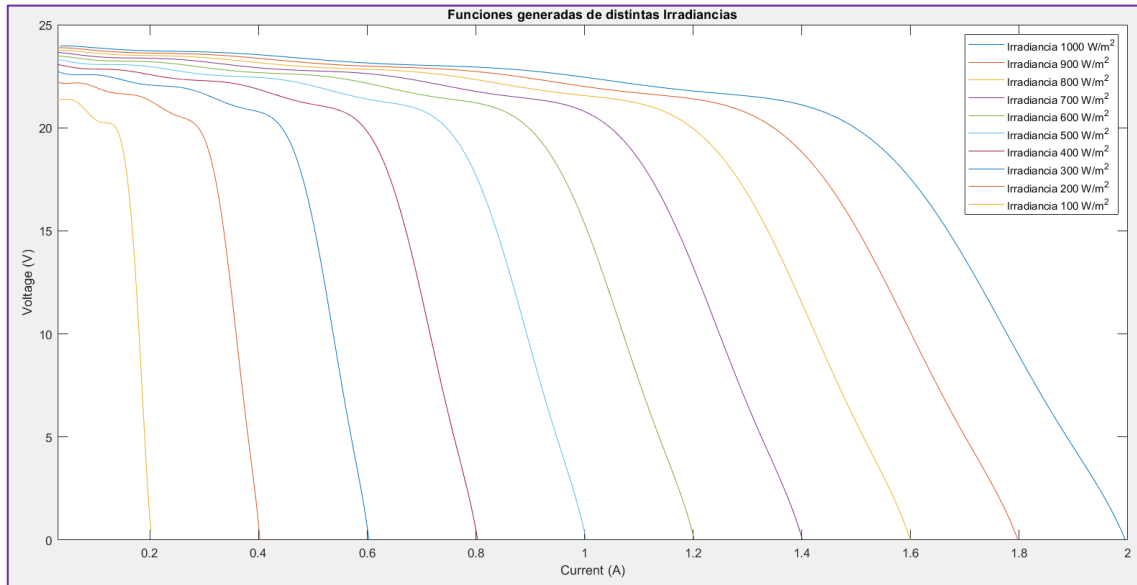


Figura 24: Funciones utilizadas para control del convertidor de potencia tipo Buck

6.4. Simulación del convertidor electrónico de potencia tipo Buck y el control de este mediante el programa de simulación MATLAB y Simulink

En la simulación se ha utilizado el programa de Simulink, que incluye la toolbox Simscape con su componente Power Systems para la implementación del convertidor electrónico de potencia tipo “Buck” (Fig. 25).

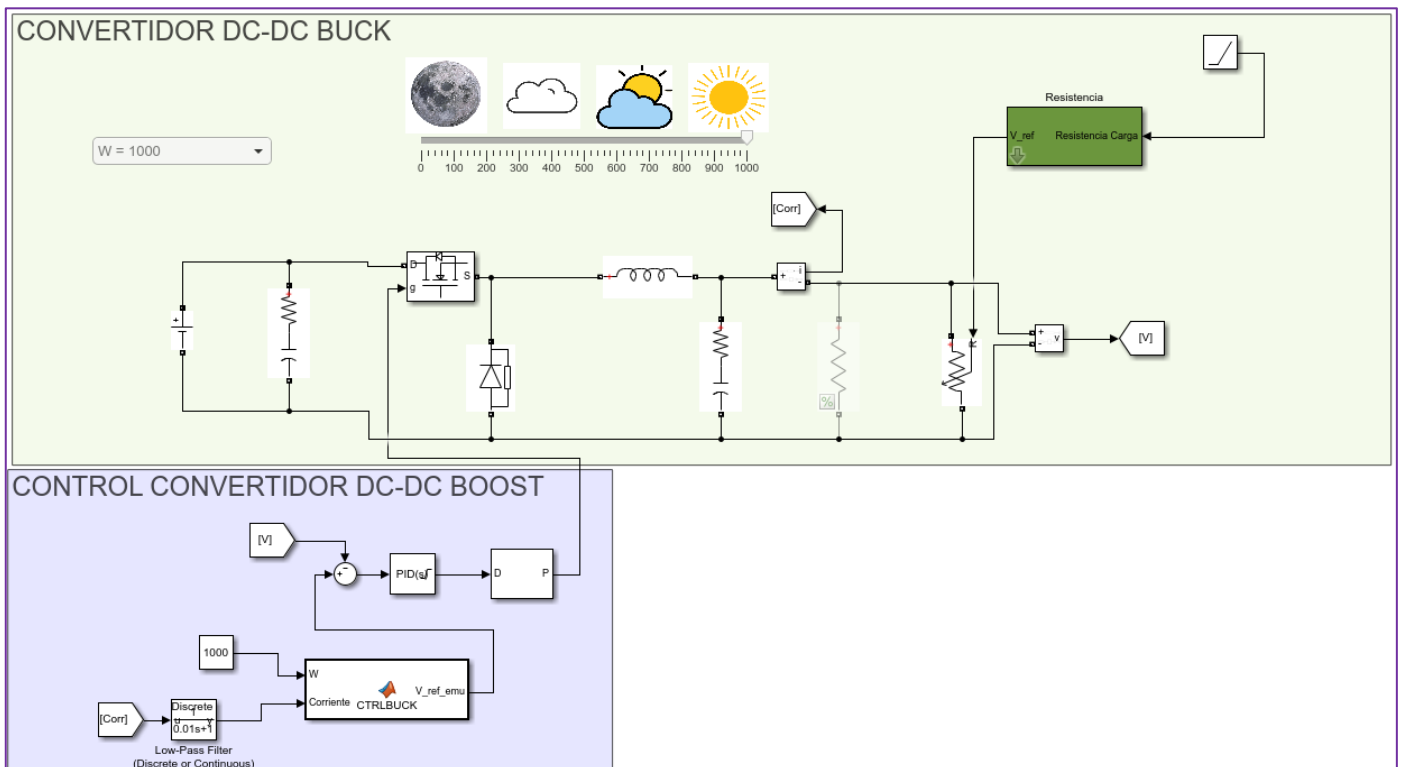


Figura 25: Sistema completo, convertidor electrónico de potencia tipo Buck Simulink y control de este

6.4.1. Convertidor electrónico de potencia Buck en Simulink

En el esquema realizado en Simulink (Fig. 26) se puede observar que se ha seguido el modelo explicado en los convertidores electrónicos de potencia de tipo reductor; en este apartado se va a tratar lo relacionado con el convertidor.

Las características de empleadas para la simulación se muestran en la tabla siguiente (Tabla 2):

Componentes	Valor
Condensador de entrada	200 μ F
Bobina	40 μ H
Condensador de salida	4700 μ F
Resistencia de carga	27 Ω
Tensión de entrada	24 V
Fsw	200 kHz

Tabla 2: Parámetros de componentes

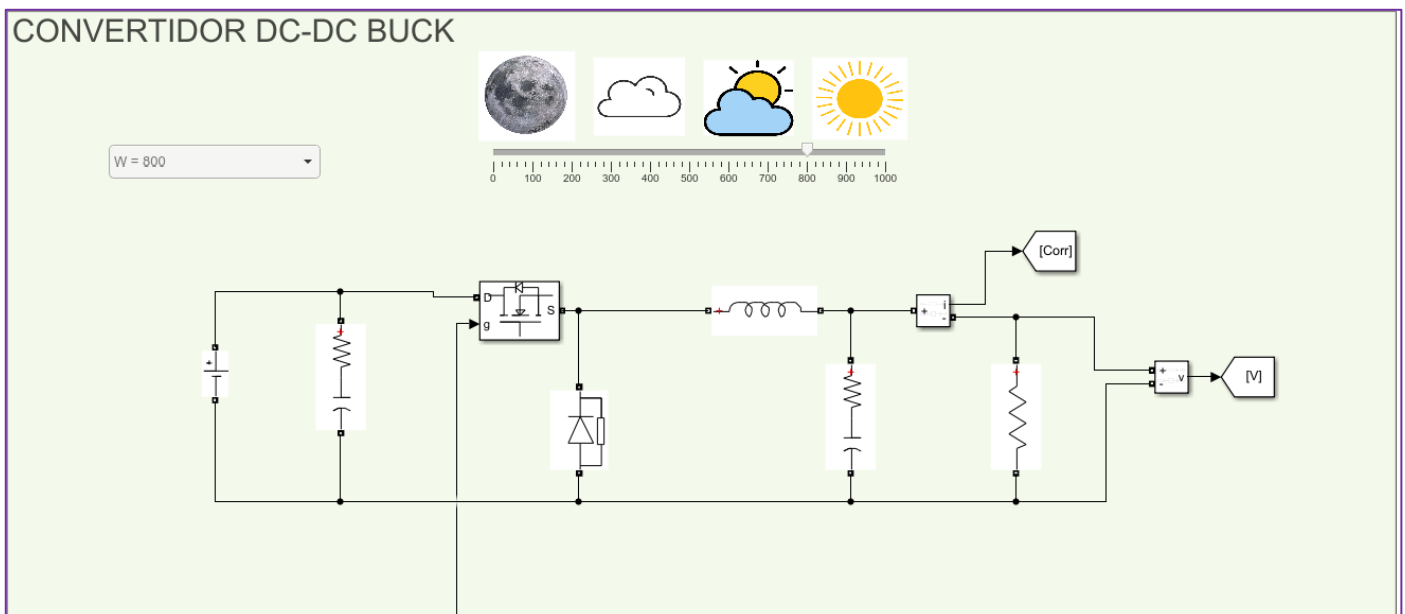


Figura 26: Convertidor electrónico de potencia Buck en Simulink

Se ha realizado el cálculo del rizado de la corriente en la bobina. Con los parámetros de los componentes anteriores y utilizando una irradiancia de 1000. Con dicha irradiancia y la resistencia determinada se obtiene una tensión de 22.88 V de salida. Sustituyendo los valores en la siguiente ecuación:

$$I_{LRiz} = \frac{V_o}{L_a} \cdot \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right) \cdot \frac{1}{F_{sw}} = 0.13 A$$

Para la simulación, como este sistema va a emular un panel solar se ha utilizado un “Slider” y un “Combo Box” para determinar la irradiancia (Fig. 27). De manera que en el “Combo Box” es donde se va a modificar el valor de la irradiancia, ya que están definidos los valores para las ecuaciones generadas en la función de control.

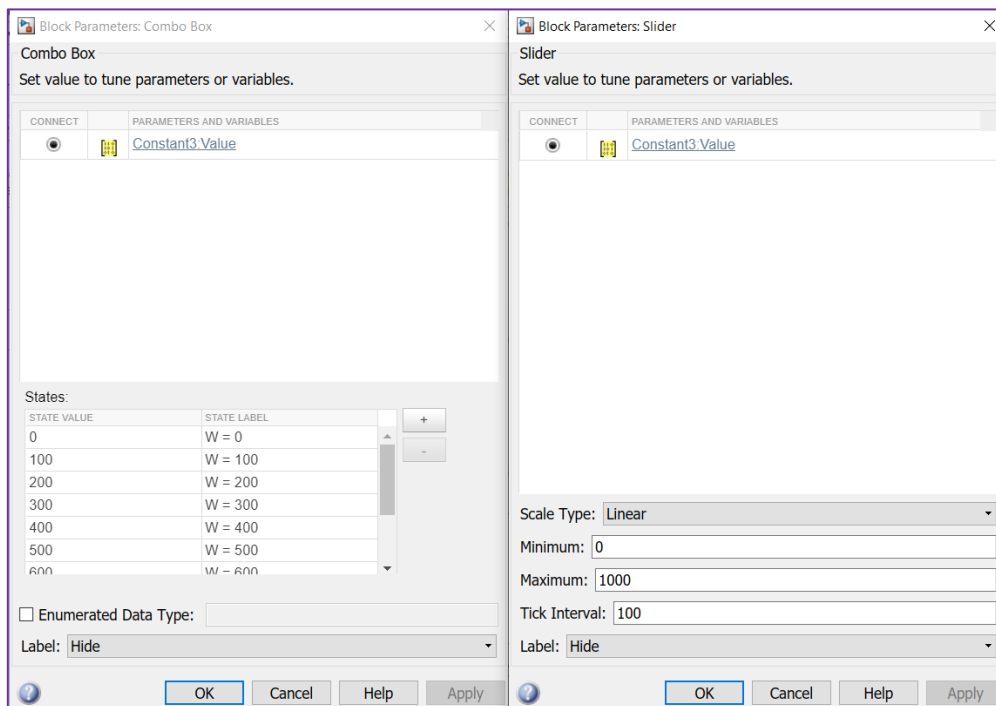


Figura 27: Configuración del Slider y Combo Box

En cambio, el “Slider” (Fig. 28) es una herramienta visual que, junto a las imágenes, representa que tipo de irradiancia puede haber en función de la radiación solar que haya.

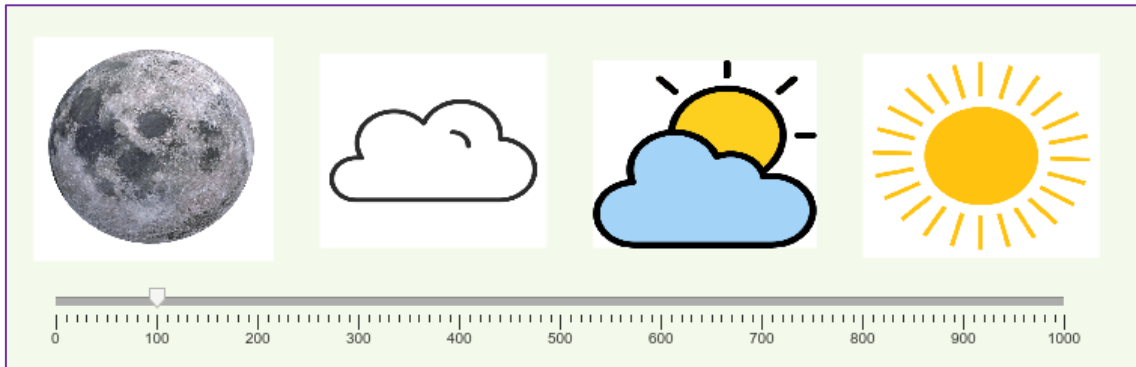


Figura 28: Slider, herramienta visual para entendimiento del funcionamiento

6.4.2. Control del convertidor electrónico de potencia

El control del convertidor (Fig. 29) sigue el esquema propuesto, añadiendo un filtro paso bajo para eliminar el ruido de la corriente de salida.

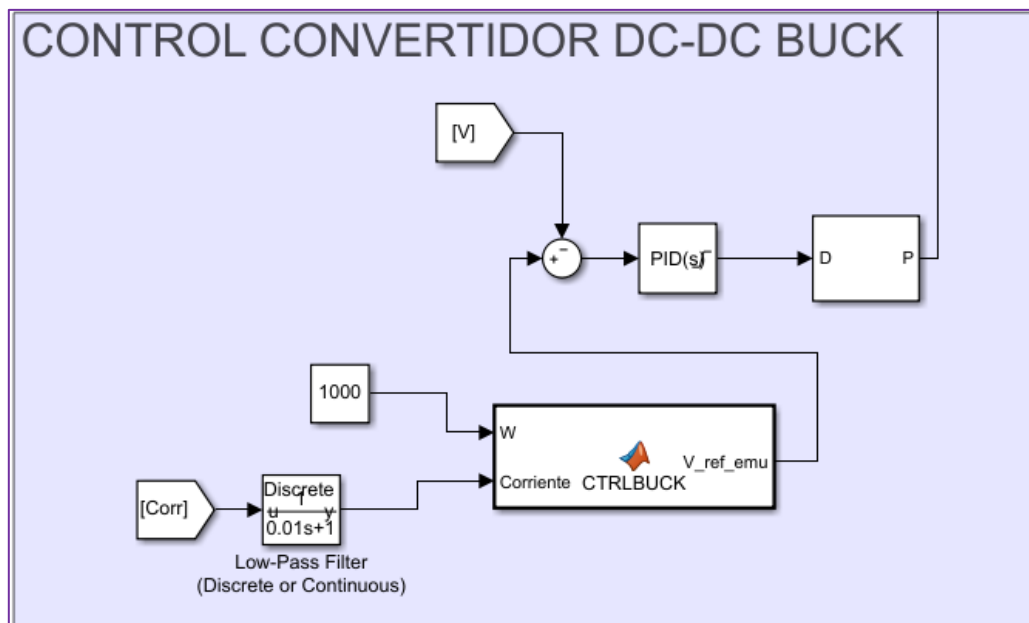


Figura 29: Control de convertidor DC-DC Buck

La señal PWM generada por el bloque “PWM Generator” (bloque posterior al bloque del controlador PID) va directamente conectada al MOSFET que hace de interruptor en el sistema (Fig. 30)

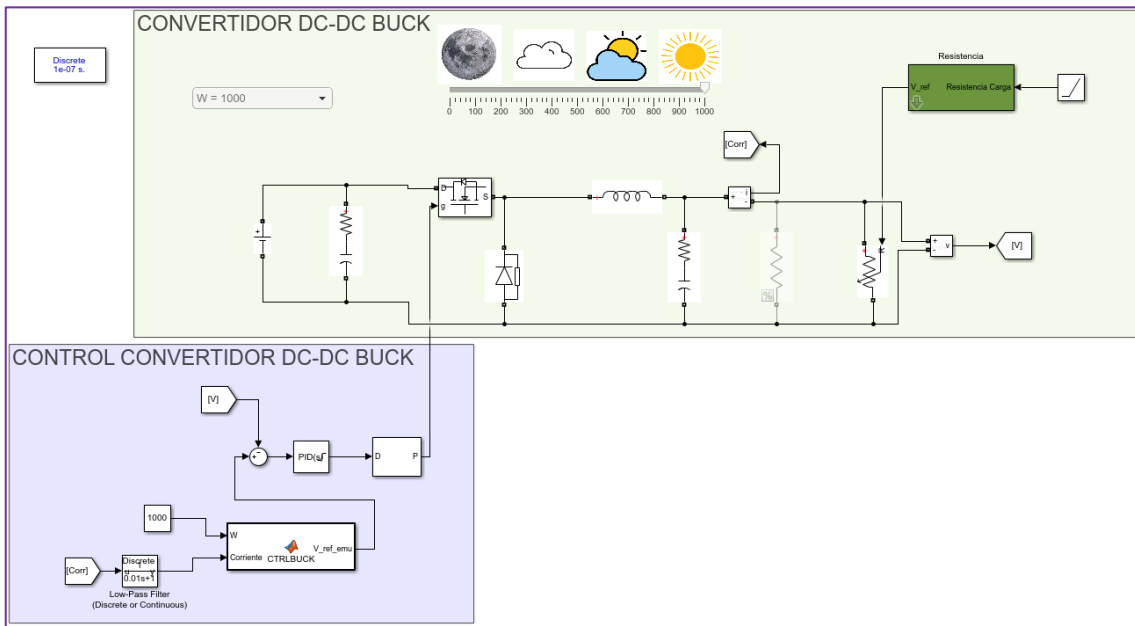


Figura 30: Simulación completa del sistema

La función de control de la tensión de referencia (Fig. 31) cada vez que se ejecuta se lee el parámetro de irradiancia y la corriente actual de salida del sistema. Esa tensión de referencia es dada por una función polinómica para los casos de irradiancia de la 'Fig. 31'.

```
function V_ref_emu = CTRLBUCK(W,Corriente)

if W == 1000
    V_ref_emu = -81.683178783777730*Corriente^10 + 7.657054694437912e+02*Corriente^9 - 3.019725406292003e+03*Corriente^8 + 6.52545
elseif W == 900
    V_ref_emu = -2.338644697259632e+02*Corriente^10 + 1.976339576598445e+03*Corriente^9 - 7.026476566461904e+03*Corriente^8 + 1.36
elseif W == 800
    V_ref_emu = -7.659423530765459e+02*Corriente^10 + 5.772546591950217e+03*Corriente^9 - 1.831326505225137e+04*Corriente^8 + 3.16
elseif W == 750
    V_ref_emu = 114.8815919096*Corriente^6 - 497.4055065728*Corriente^5 + 781.3454864781*Corriente^4 - 554.9352424022*Corriente^3
elseif W == 700
    V_ref_emu = -2.887485805383917e+03*Corriente^10 + 1.904694232864399e+04*Corriente^9 - 5.285664846157705e+04*Corriente^8 + 8.03
elseif W == 600
    V_ref_emu = -1.386159462711585e+04*Corriente^10 + 7.886973092525502e+04*Corriente^9 - 1.890906945776171e+05*Corriente^8 + 2.48
elseif W == 500
    V_ref_emu = -8.470807346819490e+04*Corriente^10 + 4.016180564589928e+05*Corriente^9 - 8.017276257006022e+05*Corriente^8 + 8.77
elseif W == 400
    V_ref_emu = -8.130526625769403e+05*Corriente^10 + 3.108558606806941e+06*Corriente^9 - 5.014452106946026e+06*Corriente^8 + 4.44
elseif W == 300
    V_ref_emu = -1.400671673368634e+07*Corriente^10 + 4.013961609621852e+07*Corriente^9 - 4.846841551372761e+07*Corriente^8 + 3.21
elseif W == 250
    V_ref_emu = 89663.0361778736*Corriente^6 - 131731.1413967920*Corriente^5 + 70494.9045677912*Corriente^4 - 17083.3886341796*Co
elseif W == 200
    V_ref_emu = -8.900188510975896e+08*Corriente^10 + 1.724927956311757e+09*Corriente^9 - 1.412389260848357e+09*Corriente^8 + 6.36
elseif W == 100
    V_ref_emu = 2.006666182921877e+08*Corriente^7 - 1.250691907399599e+08*Corriente^6 + 2.959234547975924e+07*Corriente^5 - 3.36173
else
    V_ref_emu = 0;
end
```

Figura 31: Función de tensión de referencia

Por último, para definir los parámetros del controlador PI se ha utilizado el método de Ziegler y Nichols. Primeramente, se propuso controlarlo por el primer método el cual hay que sustituir el bloque del PID por una entrada escalón, hacer que el sistema esté en bucle abierto y comprobar que la salida del sistema sea de tipo sigmoïdal (Fig. 32).

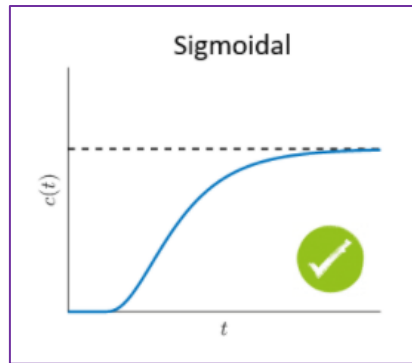


Figura 32: Respuesta de tipo sigmoïdal

Con un escalón de valor 0,3 se obtiene la siguiente gráfica, en la cual se puede observar una tensión de referencia y la tensión de salida del sistema que nunca llega a seguir a la referencia (Fig. 33).

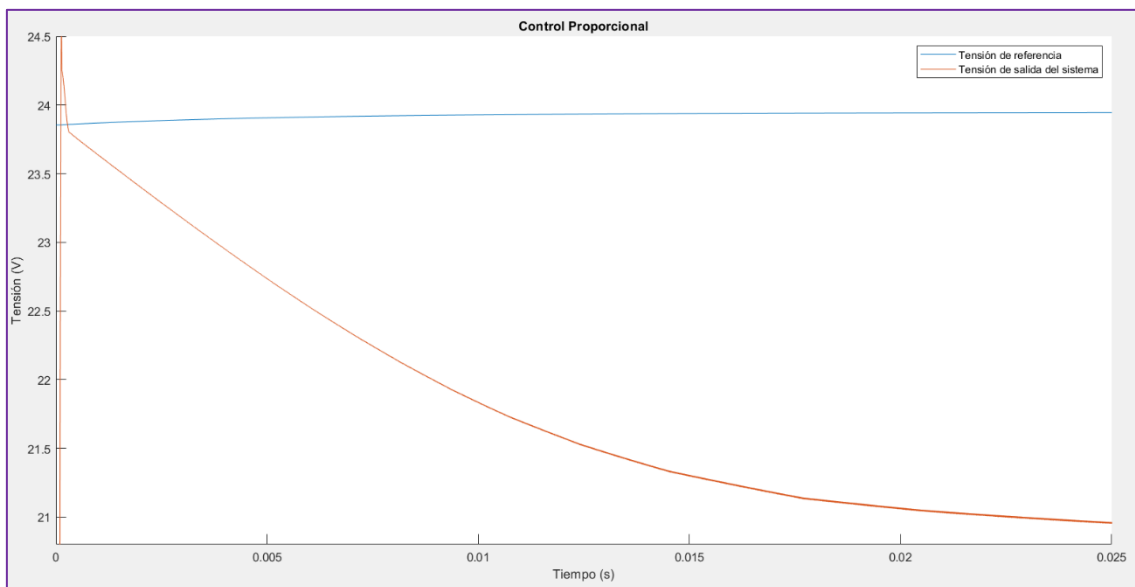


Figura 33: Ziegler y Nichols con entrada escalón de 0.3

La fórmula a seguir para proponer una acción Proporcional es la siguiente (Fig. 34). Siendo “dX” el escalón de entrada de valor 0,3, “T1” se corresponde con el tiempo muerto, es decir, el tiempo en el que el sistema tarda en responder.

“T2” es el tiempo desde que acaba el tiempo muerto hasta que finaliza la curva descendiente; y por último, “dY” es la variación desde el inicio de “T2” hasta el final del mismo.

$$K_o = (dX \cdot T2) / (dY \cdot T1)$$

Figura 34: Fórmula Ziegler y Nichols (Pardo, 2021)

$$K_o = \frac{(0.3 \cdot (0.02 - 0.003))}{(2.742 \cdot 0.003)} \approx 0.62$$

Una vez calculada “Ko” en un control Proporcional, equivale a la ganancia Proporcional del sistema, en este caso con este tipo de control no debería poder llegar a seguir la referencia (Fig. 35), por lo que se implementará un parámetro Integral.

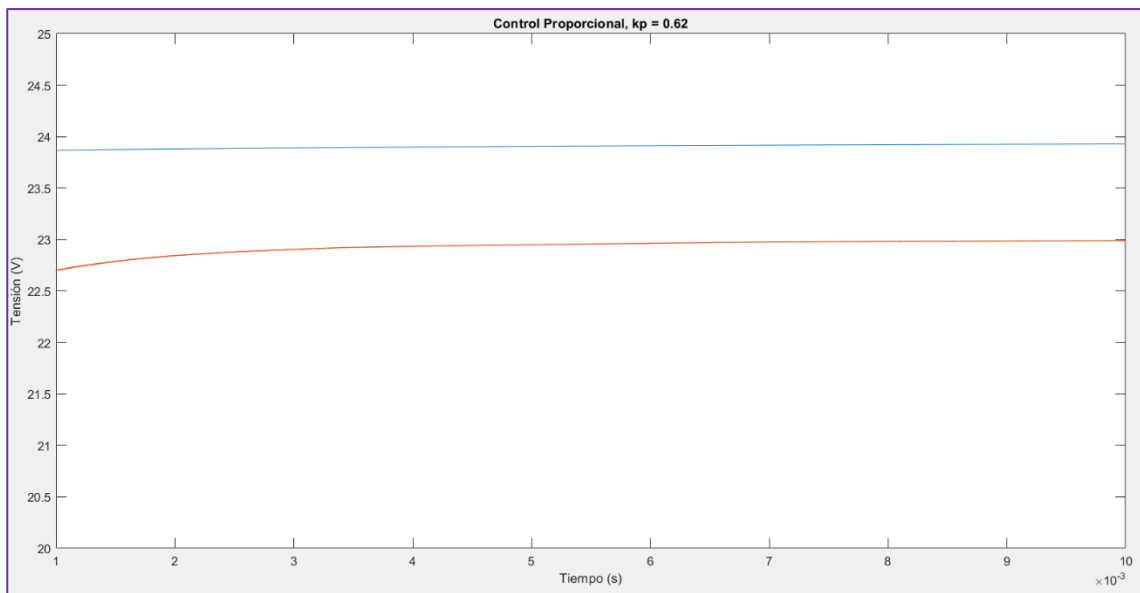


Figura 35: Control Proporcional $k_p = 0.62$

Para realizar un control PI, también cambiará la acción Proporcional y habrá que calcular la acción Integral (Fig. 36).

Control	Kp	Ki
P	Ko	
PI	0.9*Ko	0.27*Ko/T1

Figura 36: Fórmulas calculo PI

$$Kp = 0.9 \cdot 0.62 = 0.558$$

$$Ki = \frac{0.27 \cdot 0.62}{0.003} = 55.8$$

Estás variables hay que añadirlas al bloque de Controlador PID dejando la variable derivativa como nula (Fig. 37).

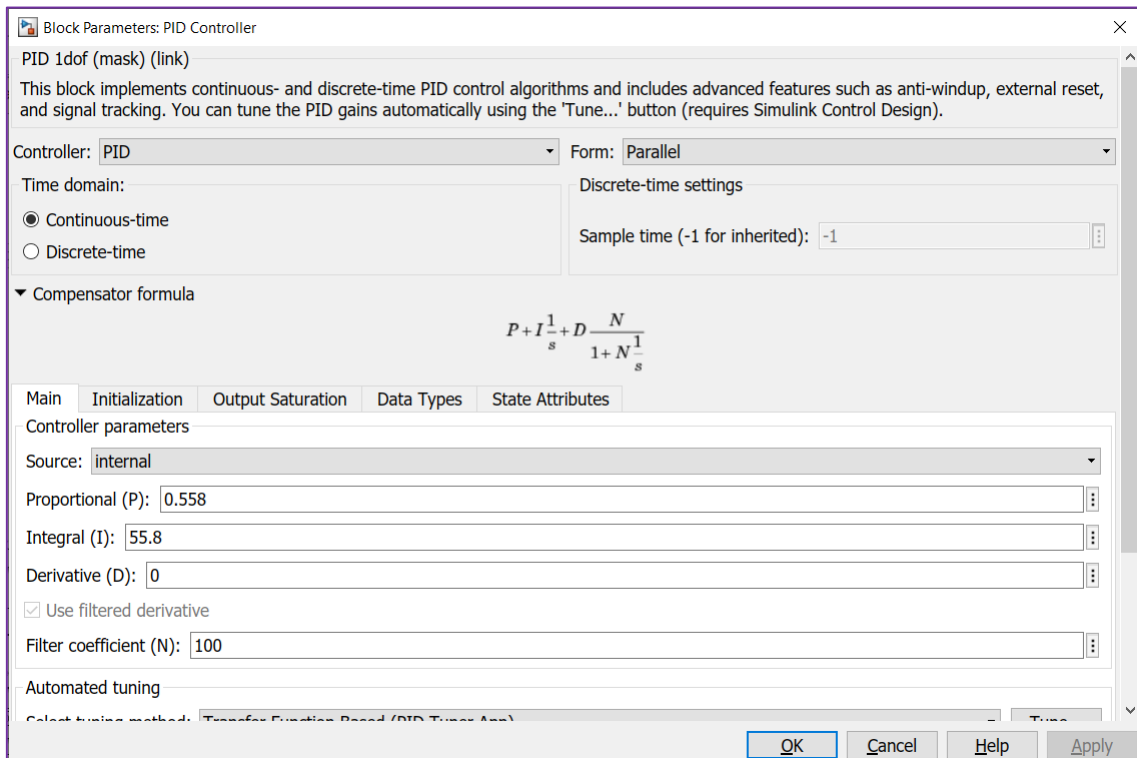


Figura 37: Parámetros del controlador PID

Finalmente, con los parámetros obtenidos del controlador PI, la salida del sistema puede seguir la referencia en un tiempo de 0,05 segundos (Fig. 38).

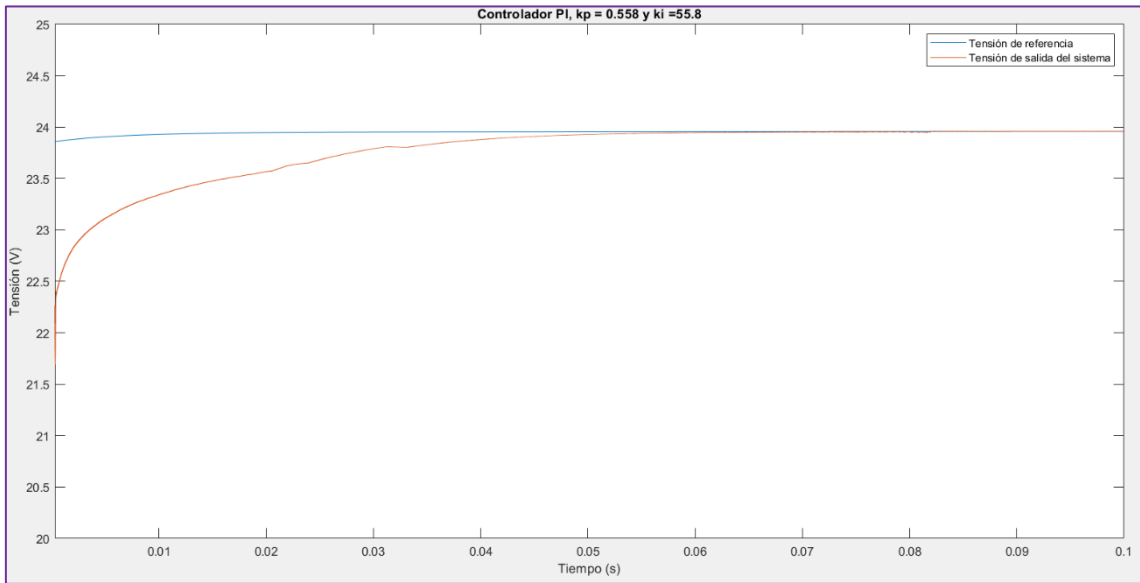


Figura 38: Resultado controlador PI

6.4.3. Resultados de la Simulación

Anteriormente, se ha calculado el rizado de la corriente en la bobina, en esta simulación (Fig. 39) se corrobora el cálculo efectuado anteriormente con un valor de 0.1196 A, que es prácticamente lo obtenido con el cálculo teórico.

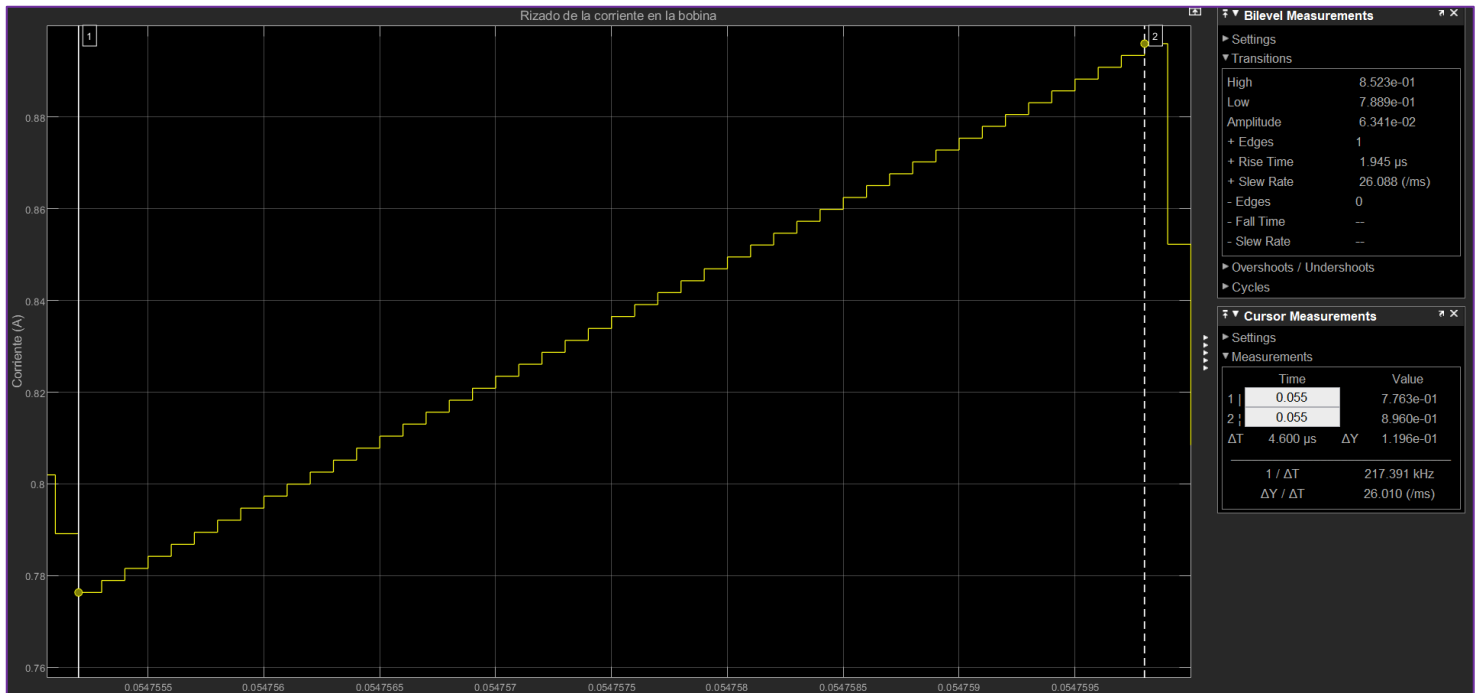


Figura 39: Rizado de la corriente en la bobina

También se ha realizado captura de la tensión de salida para poder observar el rizado de este (Fig. 40). La tensión de rizado es la diferencia entre la tensión máxima y mínima. Se puede observar que existe un rizado de 0.01149 V.

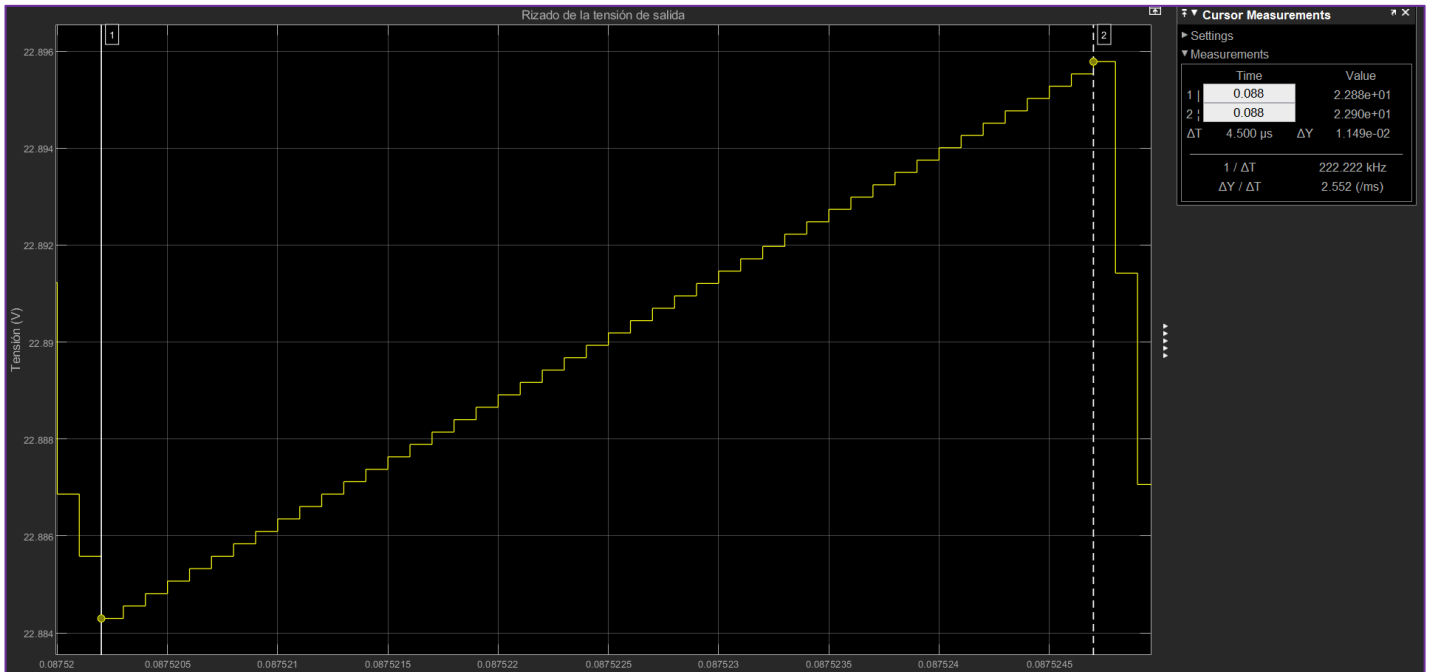


Figura 40: Rizado de la tensión de salida

A continuación, se va a realizar el cálculo del factor de rizado:

$$Fr = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \cdot 100 = \frac{0.01149}{22.896} \cdot 100 = 0.05 \%$$

Para evaluar el correcto funcionamiento del sistema de control, se ha realizado una simulación del sistema empleando una carga resistiva, debido a que el experimento tiene una resistencia en la salida, para la simulación se ha empleado una resistencia de carga de 18 Ω . Durante la simulación se ha variado el parámetro de irradiancia, determinando la tensión de referencia mediante la corriente de salida, y variando así la tensión de salida y por lo tanto también la corriente (Fig. 41).

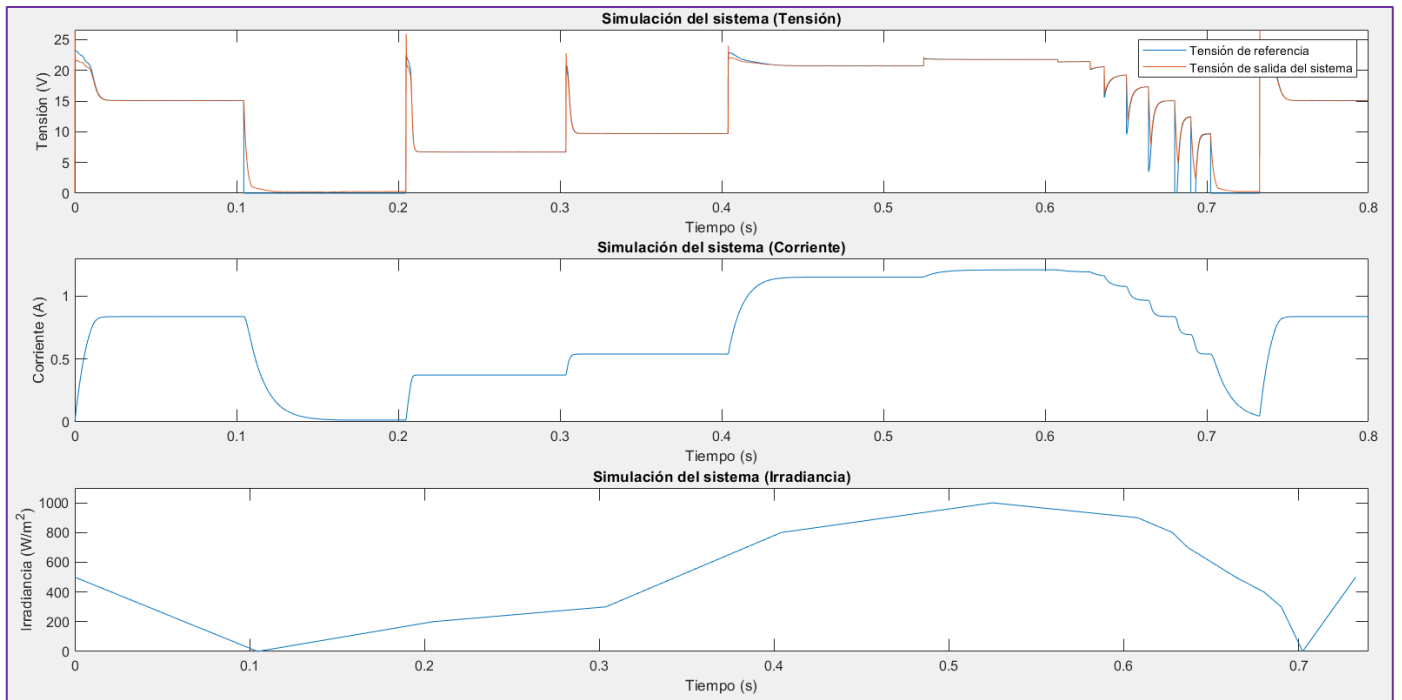


Figura 41: Simulación del sistema con una carga

También, se ha realizado una simulación con una carga variable (Fig. 42), para observar la curva que sigue el sistema de relación de corriente y tensión para una determinada irradiancia. Esta carga variable facilita obtener esta curva, debido a la ley de ohm, en la cual, para un cambio del valor de la resistencia, creará un cambio en los valores de la tensión y la corriente inversamente proporcionales. Es decir, para una resistencia de alto valor, se obtendrá una tensión alta y una corriente baja. Sin embargo, para una resistencia de bajo valor, se obtendrá una tensión baja y una corriente alta.

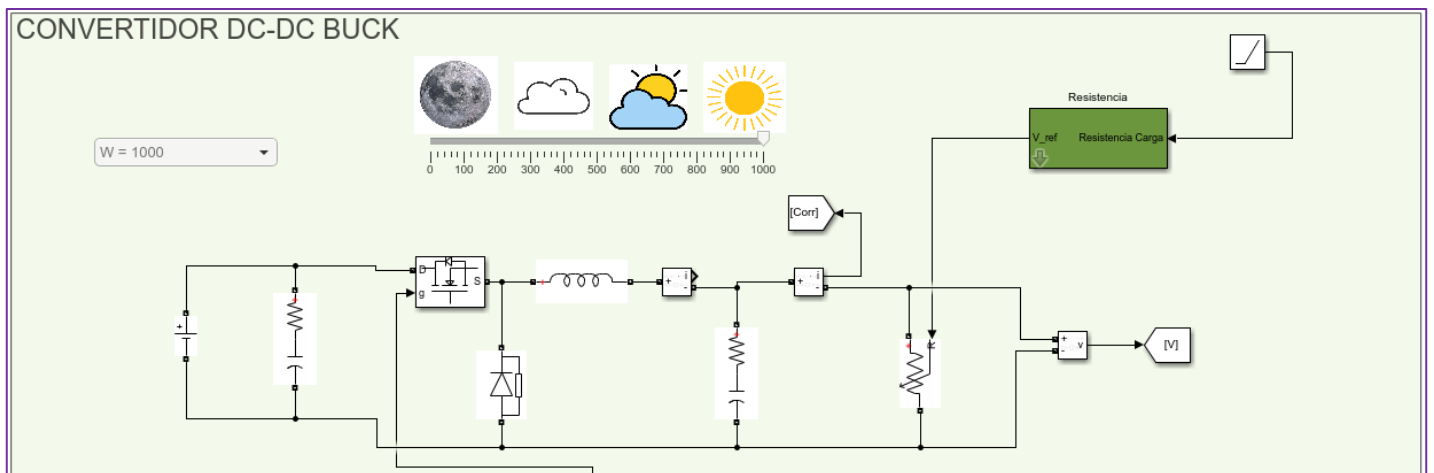


Figura 42: Sistema con carga variable

Esta carga variable tiene un rango de $0,1 \Omega$ a 1000Ω , variando la resistencia creará una variación de la tensión y la corriente. Esta variación de la resistencia se ha creado con una rampa cuyo valor varía de 1000 a 0 de manera decreciente, en un tiempo de un segundo (Fig. 43 y 44). Esta resistencia satura su mínimo en $0,1 \Omega$ para evitar que el sistema deje de funcionar o entre en una indeterminación, debido al funcionamiento del programa.

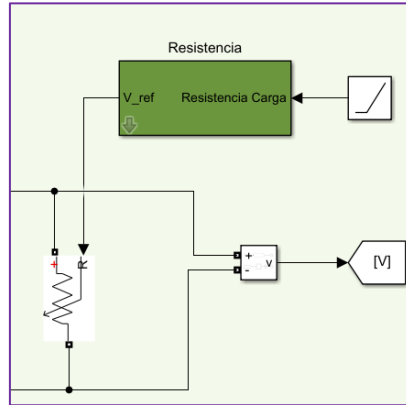


Figura 43: Bloques de Simulink para la variación de la resistencia de manera decreciente

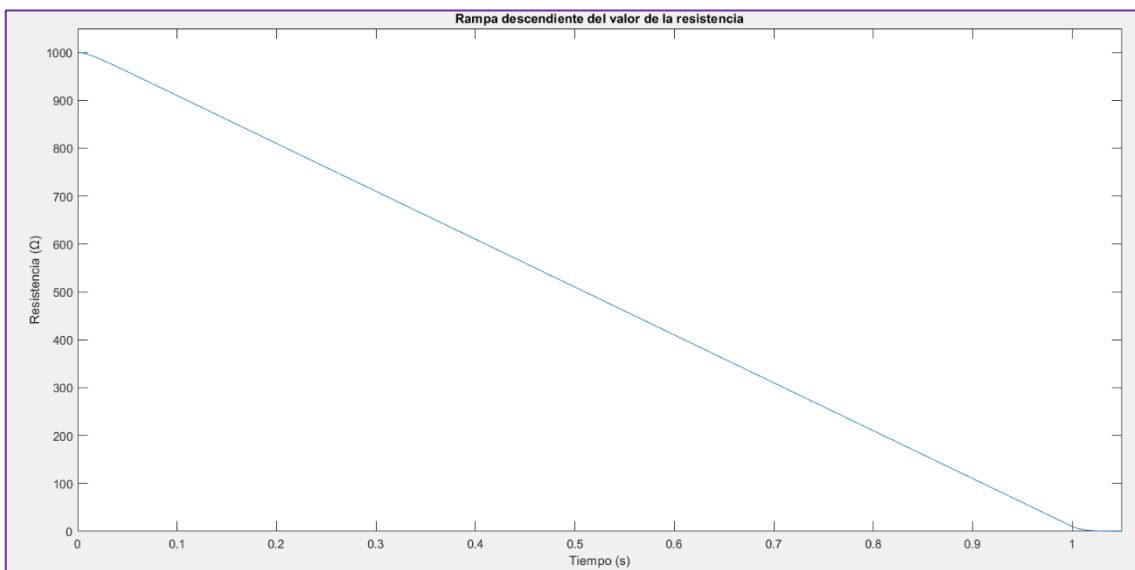


Figura 44: Resultado de la variación de la resistencia de manera decreciente

Con la resistencia variable se pueden crear las curvas de relación de corriente-tensión (Fig. 45), se tiene que variar la irradiancia entre valores 100 y 1000, siendo múltiplos de 100, y fijándolo para cada simulación con la variación de la resistencia de la figura anterior.

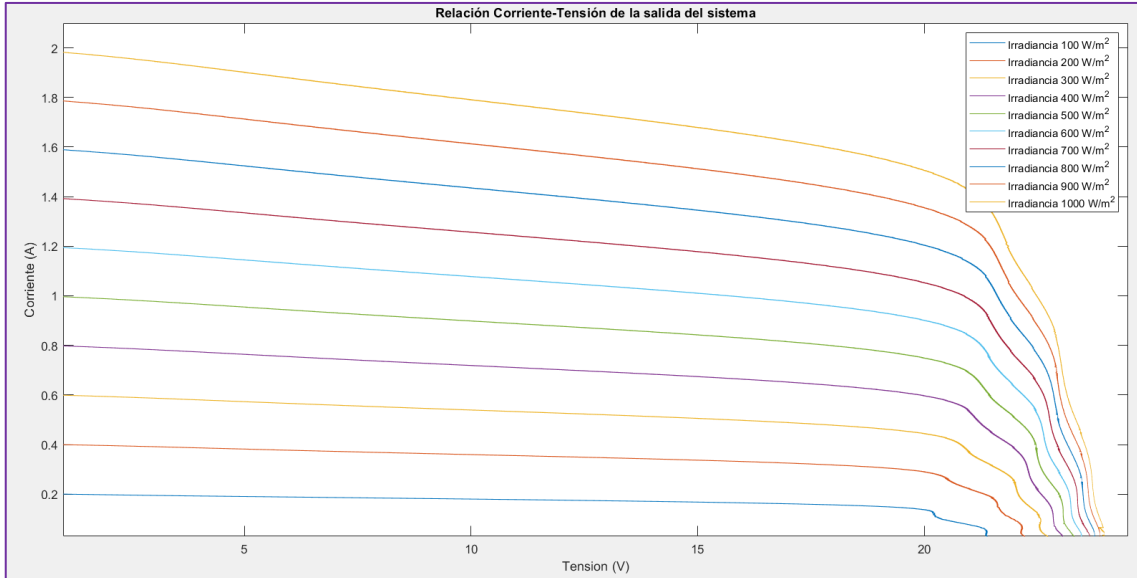


Figura 45: Curvas corriente-tensión para las irradiancias determinadas

Por último, se ha comparado la tensión de referencia con la tensión de salida del sistema, para verificar el correcto funcionamiento del control PI, utilizando la resistencia variable, ya que se quiere comprobar el cambio de la tensión de salida frente a la tensión de referencia. Variando la tensión de salida desde el máximo hasta 0 V debido a la resistencia variable (Fig. 46).

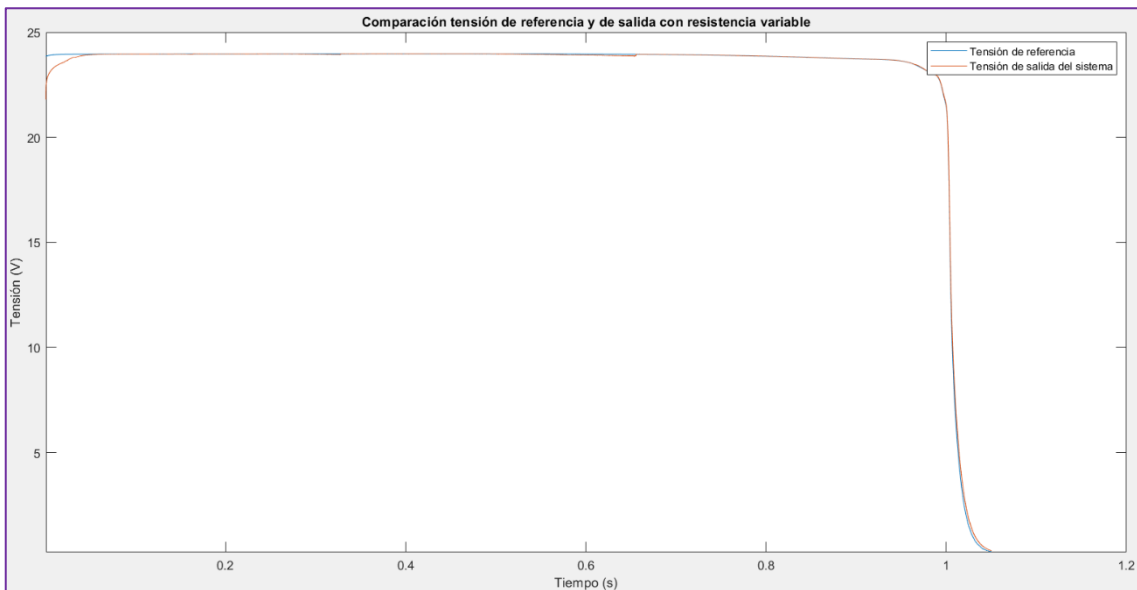


Figura 46: Tensión de referencia y tensión de salida del sistema con una resistencia variable

6.5. Estudio de la plataforma hardware a emplear

El hardware utilizado ha sido una tarjeta de circuito impreso (PCB), que el tutor del proyecto ha proporcionado al alumno (Fig. 47). Este tipo de circuito tiene dos modos de funcionamiento, elevador o reductor, aunque no pueden ser empleados de forma simultánea.



Figura 47: Tarjeta de circuito impreso (PCB)

La tarjeta de circuito impreso está dividida en dos zonas, la parte de control y la de potencia. En la zona de control (Fig. 48), se encuentran las conexiones para el microcontrolador. Conectado a las salidas PWM del microcontrolador, se encuentra el “*driver*” o circuito de disparo que adapta las señales de activación de los MOSFETS, provenientes del microcontrolador a los niveles necesarios para la activación de los transistores. El “*driver*” dispone de dos salidas para el disparo de dos transistores. Para el disparo del MOSFET que controla el funcionamiento tipo “*Buck*”, el “*driver*” implementa una salida flotante mediante la técnica de “*Bootstrap*”.

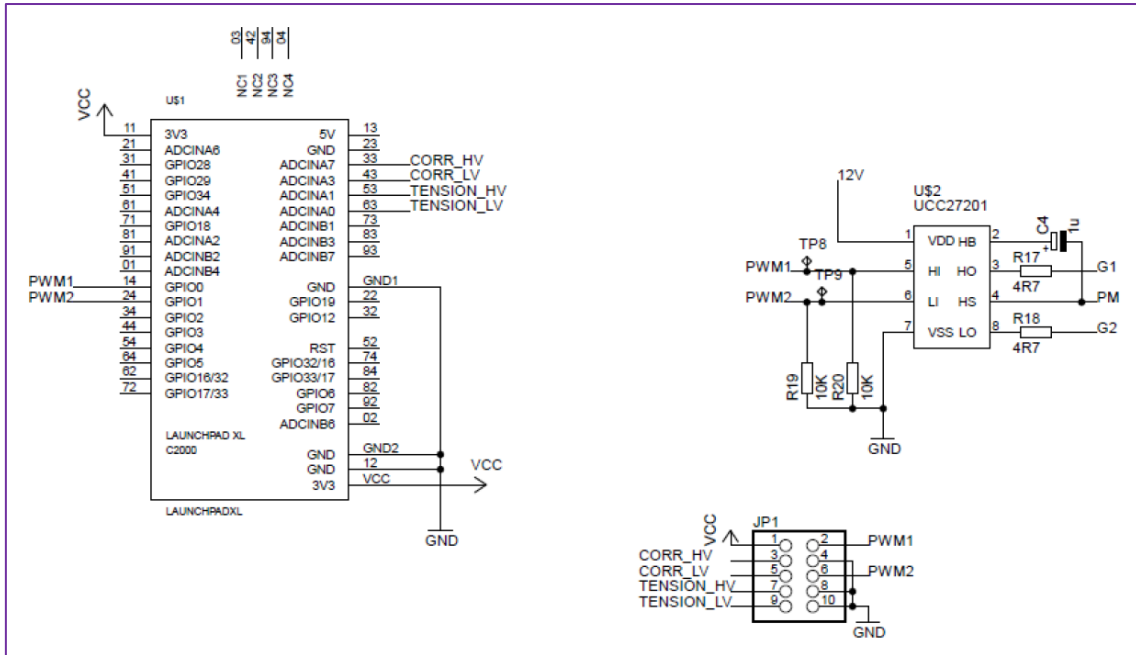


Figura 48: Esquema etapa de control

En la figura 49 se muestra el esquema de la etapa de potencia del circuito.

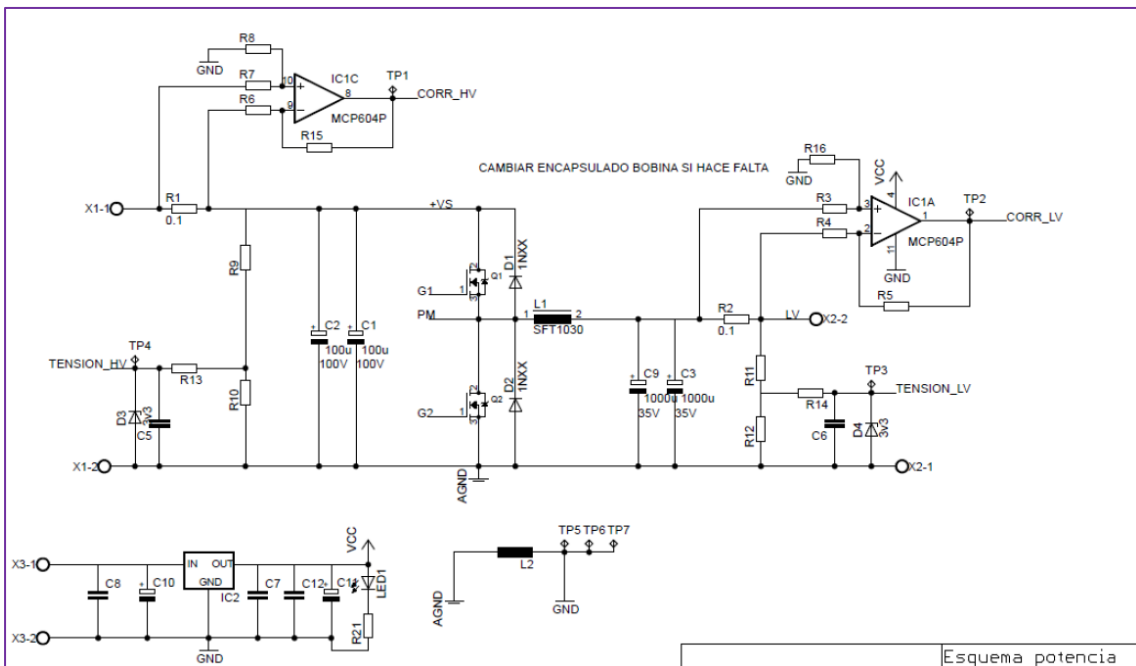


Figura 49: Esquemático de potencia

Esta tarjeta tiene dos modos de funcionamiento, modo elevador y modo reductor. Si se desea trabajar en modo "Buck", la tensión de la fuente de entrada debe conectarse en los conectores "X1-1" y "X1-2". Mientras que la salida, serán los conectores "X2-1" y "X2-2", entre estos conectores se conectará la resistencia de carga.

Sin embargo, si se conecta al revés, este convertidor trabajará en modo “Boost”, y por tanto elevará la tensión de salida por encima de la de entrada, aunque no será utilizado durante el proyecto.

El modo a utilizar será el primero de los dos explicados anteriormente. Esta doble funcionalidad es debida al componente “UCC27201” (Fig. 50).

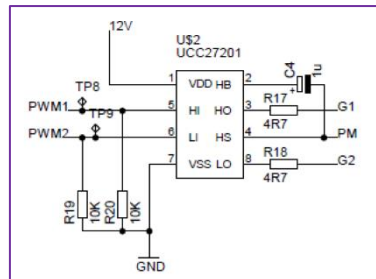


Figura 50: Componente UCC27201

La tabla de a continuación (Fig. 51), indica que “HO” y “LO” son las salidas de alta y baja correspondientes a las entradas alta y baja. Este “driver” adapta los niveles de tensión y corriente para poder disparar a los MOSFETS, además genera una salida con referencia flotante para poder disparar transistores que no estén conectados a masa, como el “Q1” que es el empleado en el modo “Buck”. En este caso se le envía la señal PWM al pin “HI”. Esta señal se acondiciona en “HO” con los niveles correctos para el MOSFET. Además, para disparar “Q1” se tiene que emplear la masa flotante “PM” generada mediante el “Bootstrap”.

HI PIN	LI PIN	HO ⁽¹⁾	LO ⁽²⁾
L	L	L	L
L	H	L	H
H	L	H	L
H	H	H	H

Figura 51: Configuración UCC27201

A continuación, se muestra un ejemplo de las conexiones que se deben realizar en esta tarjeta (Fig. 52). La conexión inferior es para alimentar a los amplificadores.

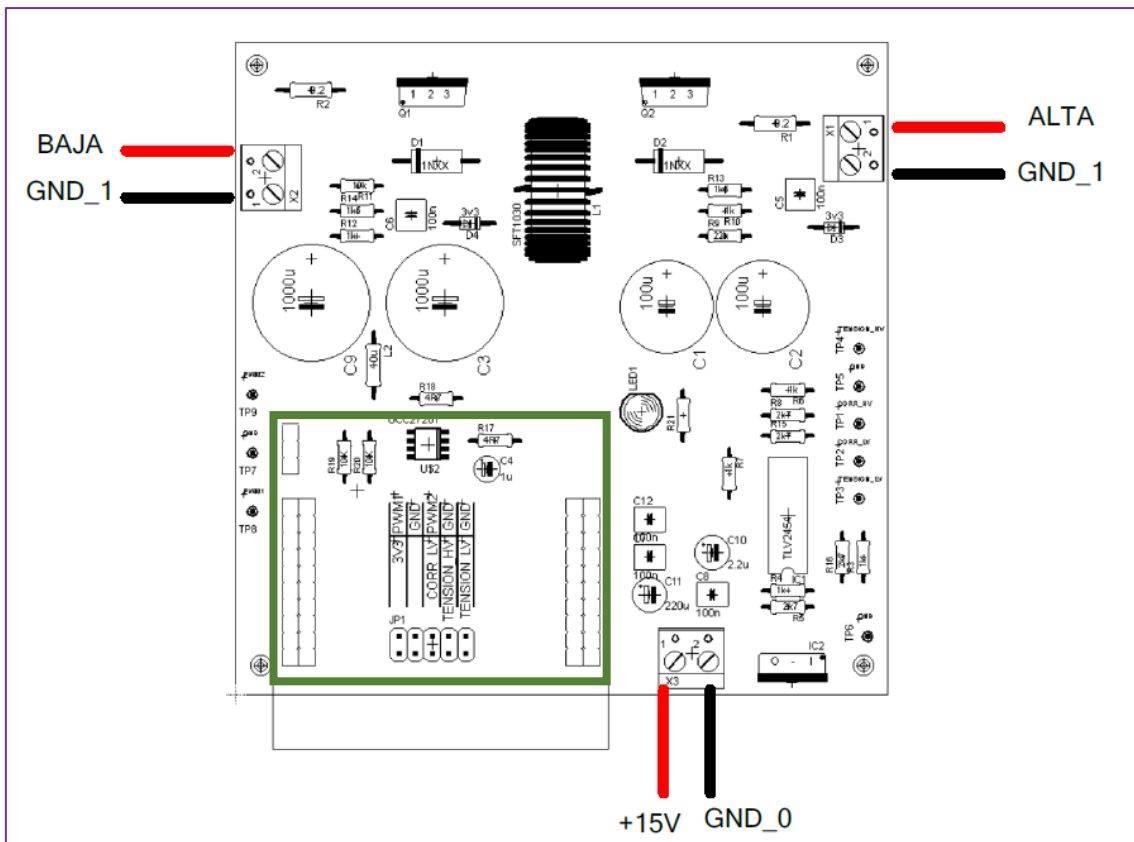


Figura 52: Esquema de conexiones de la tarjeta

En un principio se planteó conectar directamente el DSP TMS320F28027 para su control en el recuadro marcado en 'Fig. 52' pero, eso creaba un cortocircuito, por lo que se optó por extraer las conexiones necesarias para controlar el sistema. Se necesitaba conocer el valor de baja tensión (TENSION_LV), la corriente de baja tensión (CORR_LV), una masa para conectarla al DSP (GND) y por último se necesitaba también conectar una señal de modulación ancho de pulsos generada por el DSP (PWM). Las demás conexiones son irrelevantes para este proyecto.

6.6. Desarrollo del software e implementación sobre el DSP del control del convertidor Buck para realizar la emulación del comportamiento de un panel solar a partir del parámetro de radiación que se configure.

El software se va a implementar en un microcontrolador LAUNCHXL-F28027F de Texas Instruments, por lo tanto, el programa se va a desarrollar en el entorno de desarrollo integrado "*Code Composer Studio*" de Texas Instruments.

A continuación, se van a mostrar diagramas de flujo para explicar el funcionamiento del programa utilizado para emular el comportamiento de un panel solar.

En este apartado se va a separar las figuras y la explicación, y se hará referencia a estas debido al gran espacio que ocupan.

6.6.1. Figuras del diagrama de flujo

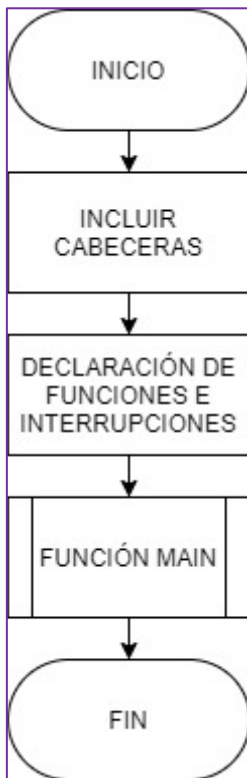


Figura 54: Comienzo del programa

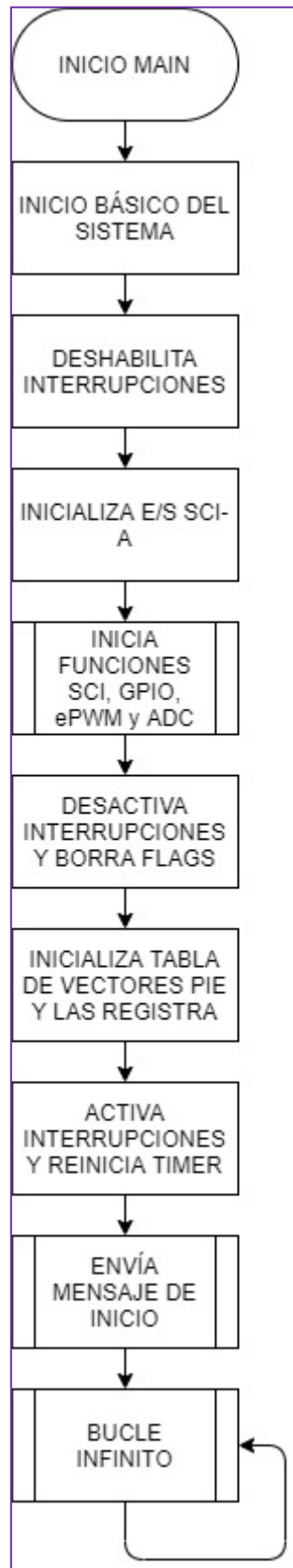


Figura 55: Macroetapa "main"

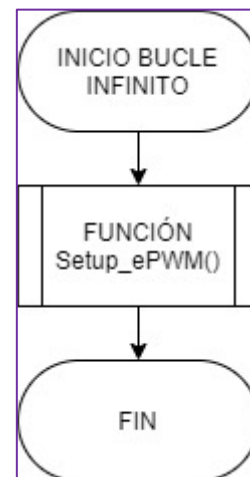


Figura 53: Bucle infinito

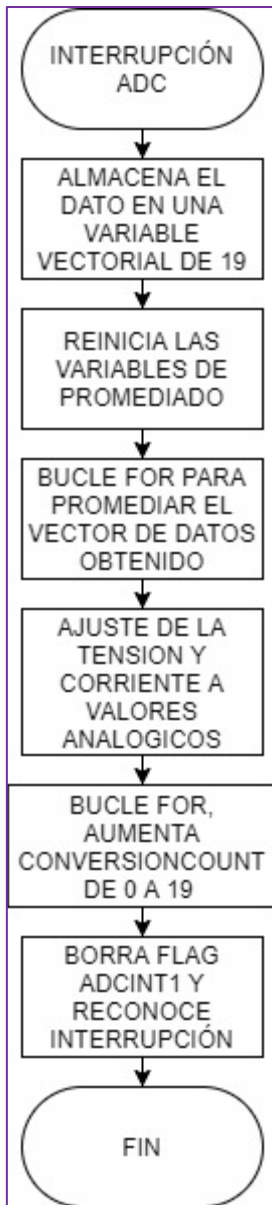


Figura 59: Interrupción ADC

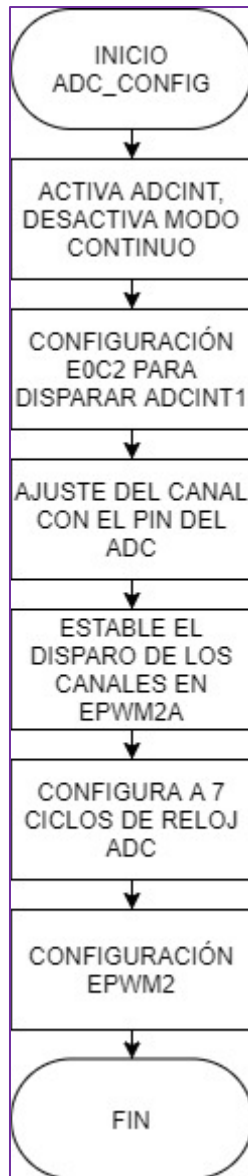


Figura 58: Configuración del ADC

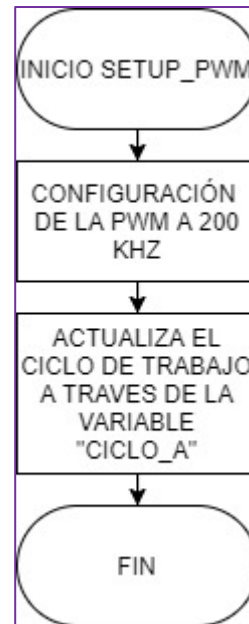


Figura 56: Función "Setup_PWM"

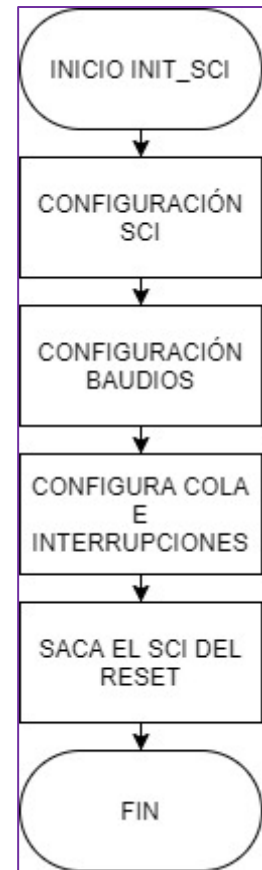


Figura 57: Función Init_Sci

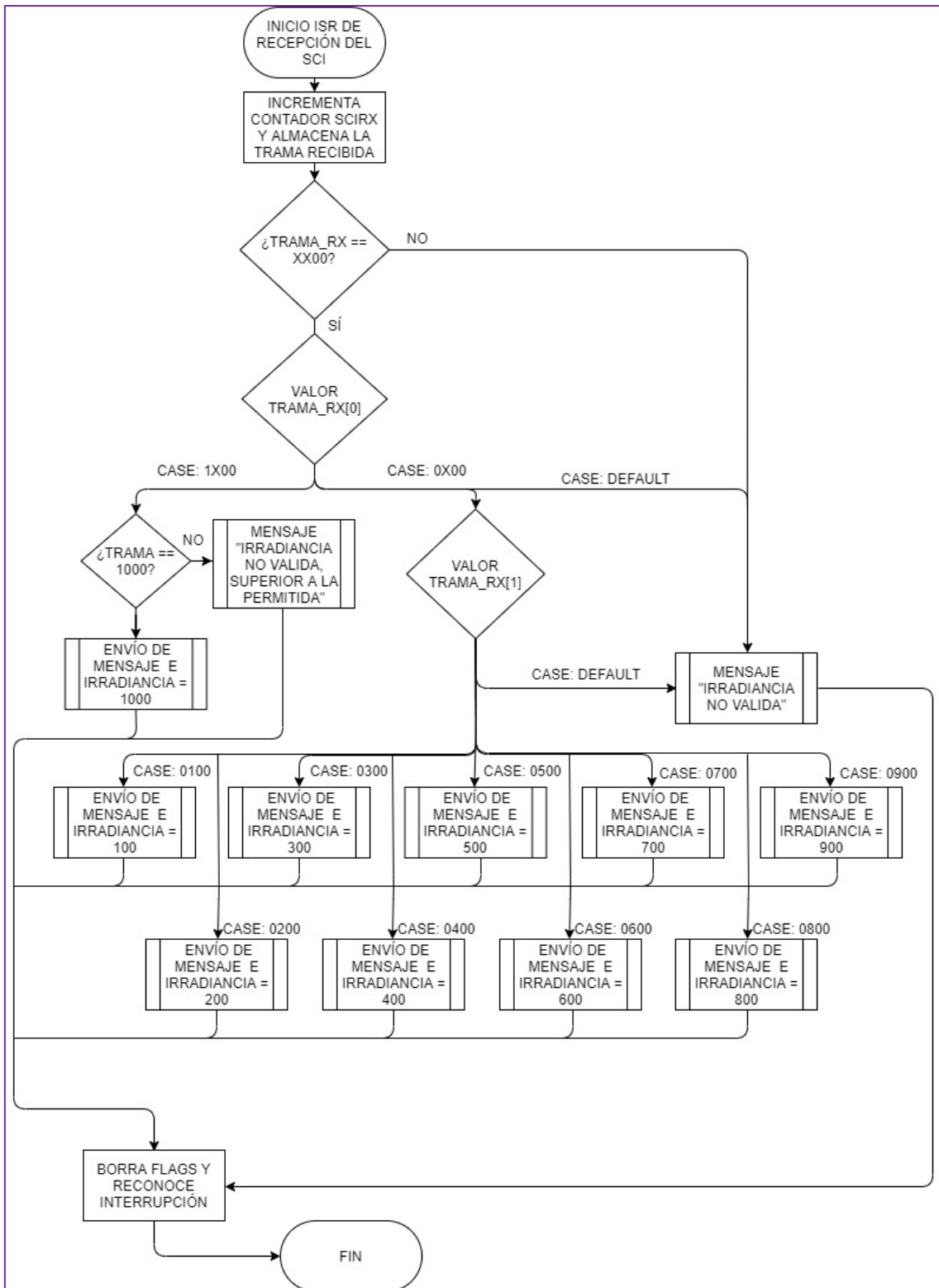


Figura 60: Función de recepción de datos

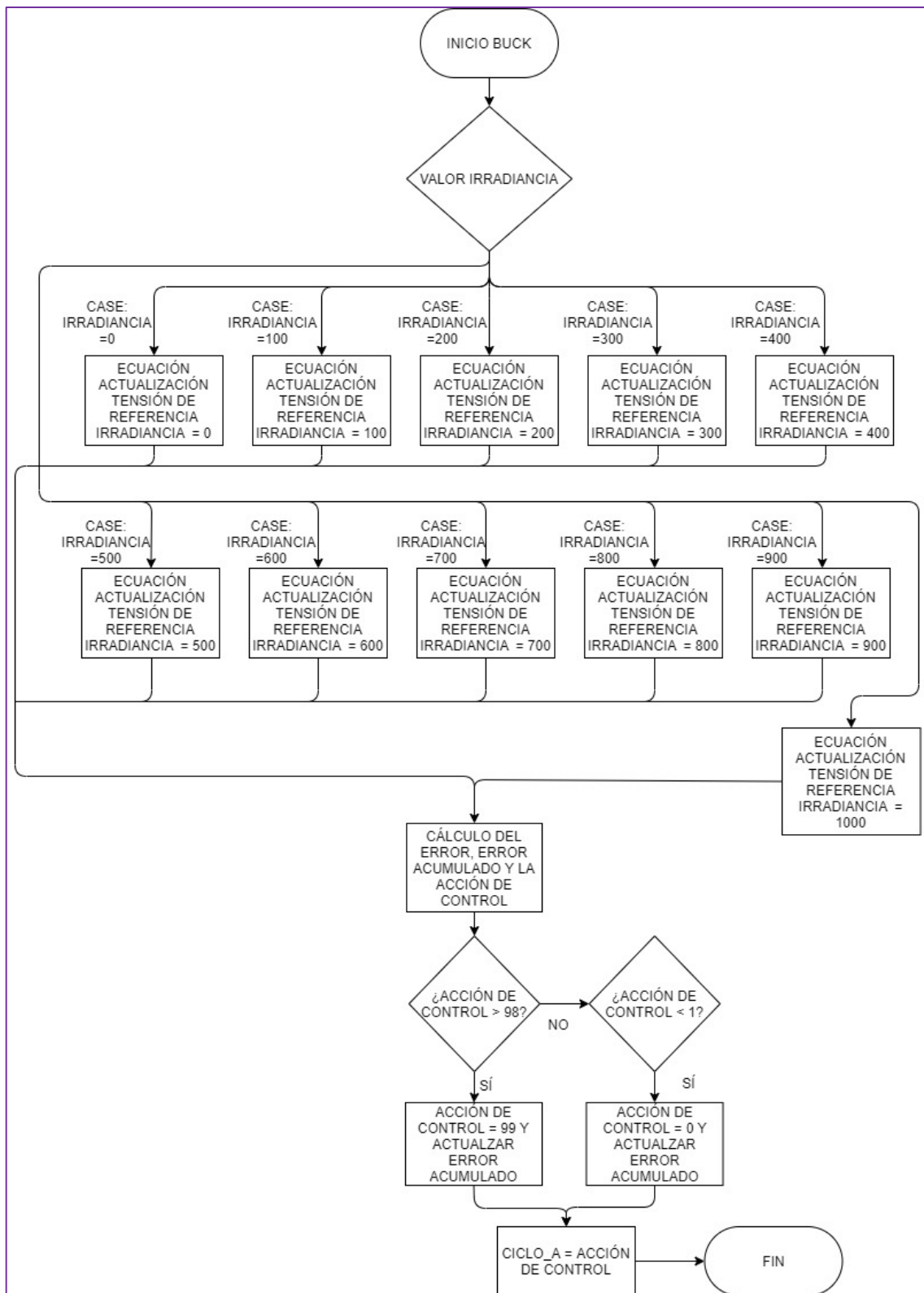


Figura 61: Función de control del convertidor "Buck"

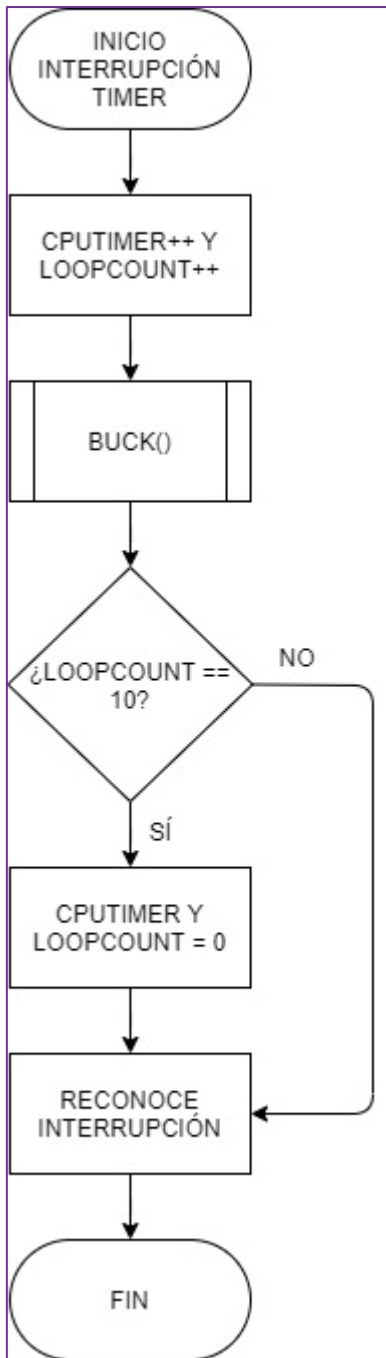


Figura 62: Función interrupción Timer0

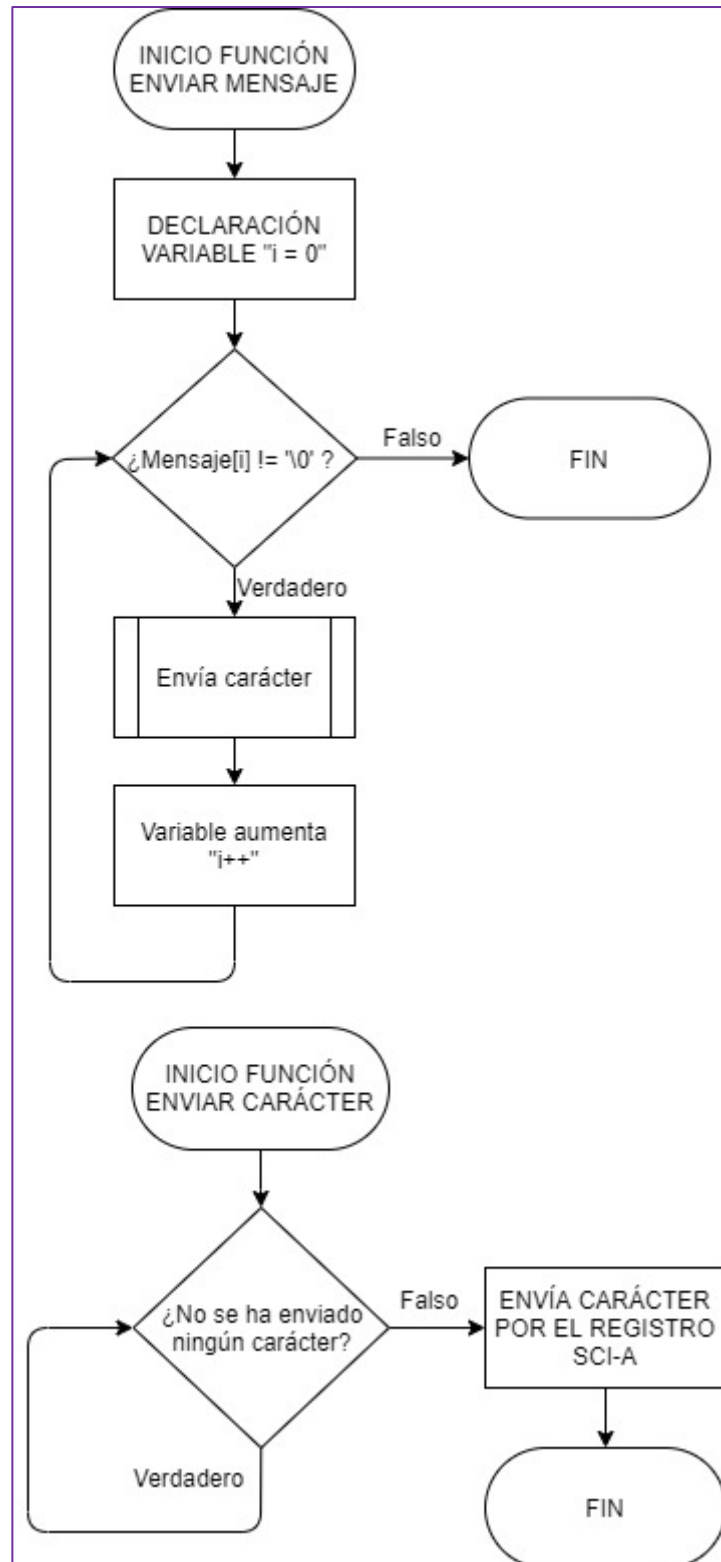


Figura 63: Función de envío de mensaje

6.6.2. Explicación de los diagramas de flujo del programa

El programa inicia en 'Fig. 54', donde se incluyen las cabeceras y se declaran todas las funciones e interrupciones utilizadas a lo largo del programa. A continuación, esta es una macroetapa de la función "main" y con eso finaliza el resumen del inicio del programa.

La macroetapa de la función "main" (Fig. 55), se basa en la inicialización de todo y el bucle infinito.

Esta función comienza con una función de inicio básico del sistema; tras esto se deshabilitan las interrupciones; se inicializan las entradas y salidas del "sci-a"; se inician todas las funciones de entradas y salidas, "Init_Sci", "Setup_ePWM", "Adc_Config"; se desactivan las interrupciones y se borran los "flags"; inicializa la tabla de vectores "PIE" con punteros y registra las interrupciones en esta tabla; inicializa la interrupción por "timer" y se configura para que se ejecute cada 500 ms; se activan las interrupciones "ADCINT1" y "RX_SCI" y se reinicia "CPUTIMERO"; y se envía mensaje de inicio.

El bucle infinito (Fig. 53) es activar la macroetapa de función "Setup_ePWM".

La función de interrupción del "ADC" (Fig. 59), se activa cuando hay un cambio en la lectura de la tensión. Esta función almacena el dato obtenido en un vector de extensión de veinte datos, concretamente se guarda en el registro del número correspondiente a "ConversionCount" (Fig. 64), el cual aumenta en uno cada vez que se accede a la interrupción (Fig. 65).

```
Corriente_LV[ConversionCount] = AdcResult.ADCRESULT2; // Lectura de corriente en ADCIN3
Voltaje_LV[ConversionCount] = AdcResult.ADCRESULT3; // Lectura de tensión en ADCIN0
```

Figura 64: Almacenaje de datos obtenidos

```
// Bucle para aumentar la variable que recorre el vector de acumulación de datos
if(ConversionCount == 19){
    ConversionCount = 0;
}
else ConversionCount++;
```

Figura 65: Aumento de la variable de ConversionCount al acceder a la interrupción

Una vez realizada la lectura de la variable, se hace un reinicio de esta que se utiliza a continuación, como es una variable acumulativa y sirve para promediar los diecinueve datos obtenidos, se puede observar un dato más estable.

Después, se hace un ajuste para cambiar el formato del dato de digital a analógico para conocer de forma analógica la tensión y corriente.

Por último, se accede al bucle de aumentar la variable "ConversionCount", se borra el "flag" y se reconoce la interrupción.

En la función de configuración del “ADC” (Fig. 58); primero, se configura y activa el disparo del “ADCINT1”, se desactiva la lectura en modo continuo y se configura el “EOC2” para que dispare “ADCINT1”.

A continuación, se ajusta la selección del canal con la lectura de las entradas analógicas; se selecciona el canal 2 con la entrada “ADCIN3” y el canal 3 con la entrada “ADCIN0”.

Se establece que el disparo de los dos canales sea a través del “TRIGSEL = 7”, esto quiere decir que el disparo se realiza a través de la “EPWM2A”. Se ajusta la velocidad de los dos canales a 7 ciclos de reloj.

Por último, se configura la “EPWM2A” para realizar el disparo, con la frecuencia más lenta posible.

La función “Setup_PWM” (Fig. 56), está encargada de actualizar el valor del ciclo de trabajo de la señal de modulación por ancho de pulso, inicialmente se ha programado para que esta funcione a una frecuencia de 200 kHz debido a que se necesita este valor para un correcto funcionamiento del hardware empleado.

Cuando se accede a esta función en el bucle infinito lo que hace es actualizar el valor del ciclo de trabajo según el parámetro que sea necesario para que la tensión de salida siga a la tensión de referencia.

La función “Init_Sci” (Fig. 57), es la función que inicia la interfaz de comunicación serie, esta función es fundamental para realizar la comunicación con el ordenador. Se activan todas las interrupciones necesarias para la comunicación y se configuran los baudios a utilizar para la comunicación en función de la frecuencia del procesador.

Se habilita la cola, la interrupción de recepción de la trama y se configura la interrupción cuando haya cuatro caracteres en cola.

La función de recepción de datos (Fig. 60), es una función a la que se accede cuando la trama de cuatro cifras está completa. Esta trama se adquiere en un vector para conocer cada cifra individualmente.

Para clasificar el valor de la irradiancia, primero se comprueban los dos últimos dígitos que sean cero con un “if”, si es así se continua con la comprobación del número, por el contrario, se manda un mensaje de error.

Después, hay una función “switch case” que se considera una selección de alternativa múltiple, el cual comprueba el valor de la primera cifra para saber si es un ‘1’ o un ‘0’. En caso de que sea ‘1’, se comprueba con una función “if”, si la segunda cifra es ‘0’, se corresponde con el número ‘1000’ y se actualiza la variable de irradiancia, si la segunda cifra no es ‘0’, se deriva en un mensaje de error.

En la anterior función de “*switch case*” en caso de que sea ‘0’ el primer dígito, se opta por un número múltiplo de ‘100’ menor a ‘1000’. En este “*switch case*” hay otro “*switch case*” para clasificar los números múltiplos de ‘100’ menores a ‘1000’. En este se comprueba el número del segundo dígito. Y en cualquier caso se actualiza la variable de irradiancia y se manda un mensaje.

La función “*Buck*” (Fig. 61), es para realizar el control del convertidor electrónico de potencia. Se ha utilizado una función “*switch case*” para clasificar el valor de la irradiancia obtenido. Una vez clasificado, se actualiza el valor de la tensión de referencia teniendo en cuenta el valor de la corriente actual.

Una vez actualizado dicho valor de tensión de referencia, se hace el cálculo del error, siendo la diferencia entre el valor de tensión de referencia y el valor de tensión de la salida del sistema. Se actualiza el valor del error acumulado, y se calcula la acción de control. Los valores de “*kp*” y “*ki*” son definidos al principio del programa.

$$error = Valor_tension_referencia - Valor_tension_real$$

$$error_acumulado = error_acumulado + error$$

$$Acción_Control = kp \cdot error + ki \cdot error_acumulado$$

La función de interrupción del “*Timer0*” (Fig. 62) es una interrupción que se ejecuta cada vez que llega a un tiempo determinado al principio del programa, en este caso, cada medio segundo. En esta se aumentan las variables “*LoopCount*” y “*CPUTimer0*” y, se ejecuta la función “*Buck*”.

Después, hay una comprobación, con una función “*if*”, de si la variable “*LoopCount*” es igual a 10, en el caso de que lo sea se reiniciarán ambas variables “*LoopCount*” y “*CPUTimer0*”. Finalmente, después de la función “*if*” se reconoce la interrupción.

6.7. Comunicación vía serie con el DSP para la monitorización y configuración del sistema.

El desarrollo del programa para la comunicación serie se ha realizado en el apartado anterior. En este apartado se va a tratar el programa utilizado y configuración del mismo para poder hacer una comunicación efectiva con el DSP. Y se ejemplifican los resultados obtenidos cuando el programa y la comunicación están activos.

El programa utilizado, “Hercules SETUP utility”, es un programa gratuito y sencillo de utilizar.

La configuración del programa es básica (Fig. 66). Primero hay que seleccionar el apartado “*serial*”, para realizar la comunicación serie. En la columna de la derecha se configura a 9600 baudios, un ancho de datos de ocho, sin paridad, “*handshake*” apagado y el modo libre.

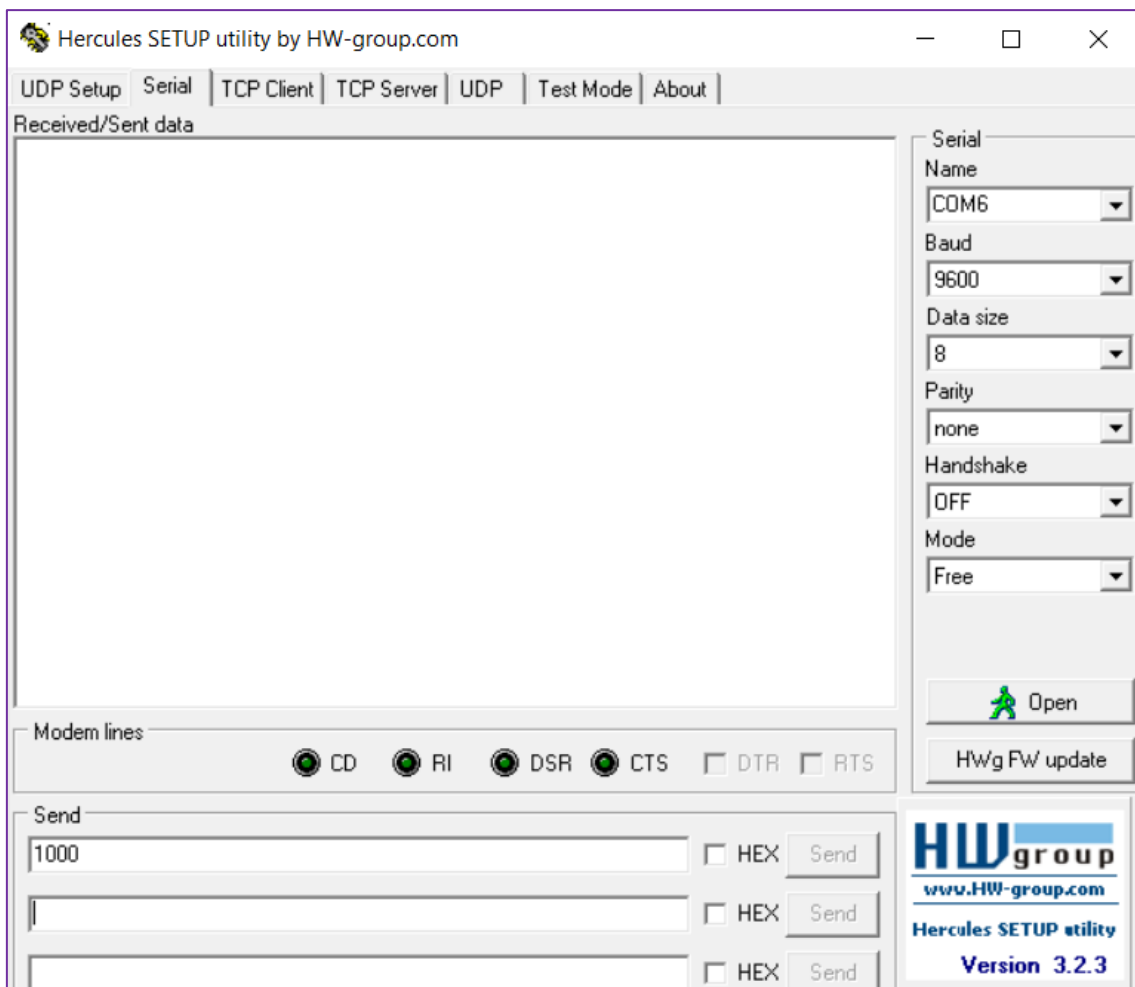


Figura 66: Programa Hercules SETUP utility

Para su uso, se tiene que acceder al administrador de dispositivos del ordenador una vez conectado del DSP, y buscar en “Puertos (COM y LPT)” la conexión “USB Serial Port” y observar en que número de puerto está conectado. A continuación, introducir ese número en la configuración del programa “Hercules” en el apartado de nombre.

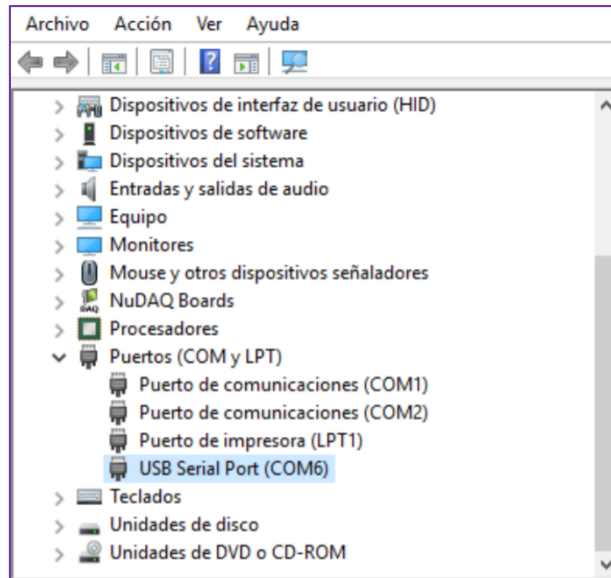


Figura 67: Conexión con el puerto serie

Una vez conectado, hay que darle al botón de abrir y la comunicación estará abierta y a la espera de enviar una trama. Posteriormente, se van a mostrar unas ilustraciones donde se pueden observar el cambio de irradiancia mediante la comunicación serie (Fig. 68 y 69).

ciclo_A	unsigned int	99	0x00008804@Data
ConversionCount	unsigned int	14	0x00008803@Data
Voltaje_LV	unsigned int[20]	[1197,1156,1160,1239,1590...]	0x00008854@Data
Corriente_LV	unsigned int[20]	[1191,1210,1269,1424,1993...]	0x00008822@Data
Voltaje_LVR	float	10.593792	0x00008808@Data
Corriente_LVR	float	0.38694644	0x00008806@Data
Irradiancia	int	100	0x00008801@Data
trama_RX	char[4]	[48 '0',49 '1',48 '0',48 '0']	0x0000881E@Data

Figura 69: Ejemplo del cambio de irradiancia (100)

Expression	Type	Value	Address
ciclo_A	unsigned int	99	0x00008804@Data
ConversionCount	unsigned int	1	0x00008803@Data
Voltaje_LV	unsigned int[20]	[1606,1867,1928,1627,1343...]	0x00008854@Data
Corriente_LV	unsigned int[20]	[2005,2329,2266,1726,1314...]	0x00008822@Data
Voltaje_LVR	float	10.6324863	0x00008808@Data
Corriente_LVR	float	0.388490647	0x00008806@Data
Irradiancia	int	1000	0x00008801@Data
trama_RX	char[4]	[49 '1',48 '0',48 '0',48 '0']	0x0000881E@Data

Figura 68: Ejemplo del cambio de irradiancia (1000)

A continuación, se puede observar la comunicación serie desde el programa "Hercules" tanto los mensajes iniciales como los del programa (en color rosa), como los enviados desde el microcontrolador al programa "Hercules" (Fig. 70).

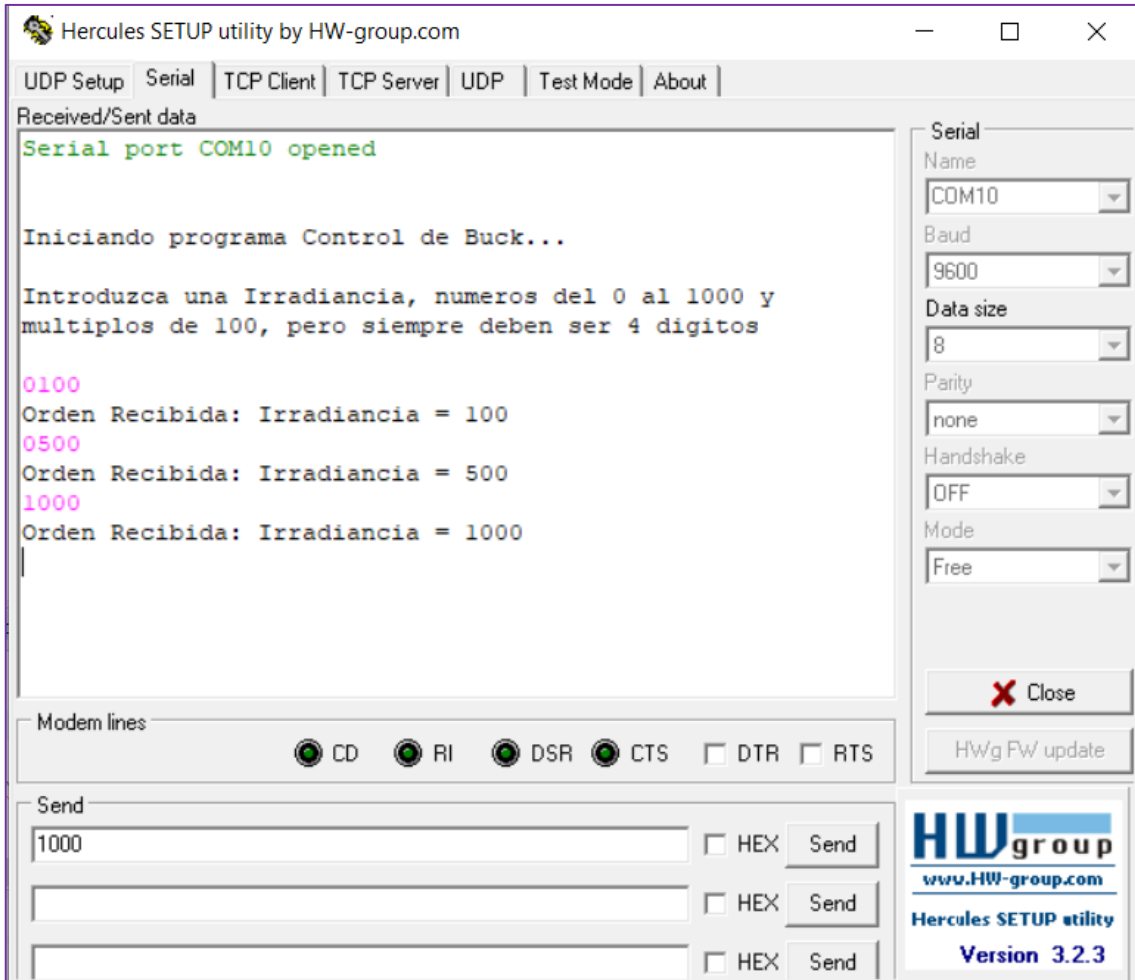


Figura 70: Comunicación serie desde el programa "Hercules"

6.8. Implementación sobre el hardware disponible y realización de los ensayos experimentales.

Para la implementación del sistema se ha de conectar la tarjeta de circuito impreso como se ha explicado. Para la lectura de las señales se han utilizado los pines del hardware, en concreto, los que se encuentran en la parte digital de la tarjeta (Fig. 71).

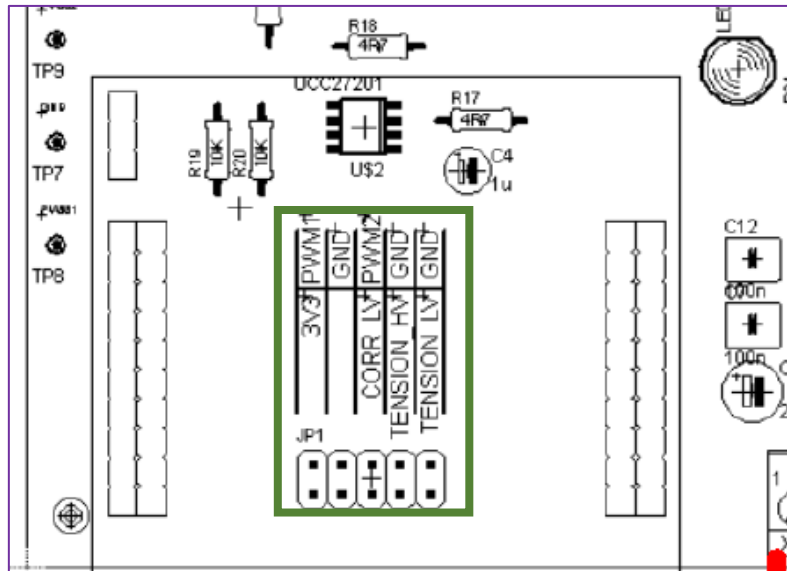


Figura 71: Tarjeta de Circuito impreso, pines de lectura de señales

Para la lectura de la corriente de salida de la tarjeta (CORR_LV), se tiene que conectar a la entrada “ADCIN3” del DSP, y para la lectura de la tensión de salida (TENSION_LV) se conectará a la entrada “ADCIN0” del mismo (Fig. 73). Para la señal de modulación de ancho de pulso (PWM1) se conecta a la salida del microcontrolador “GPIO0” (Fig. 72).

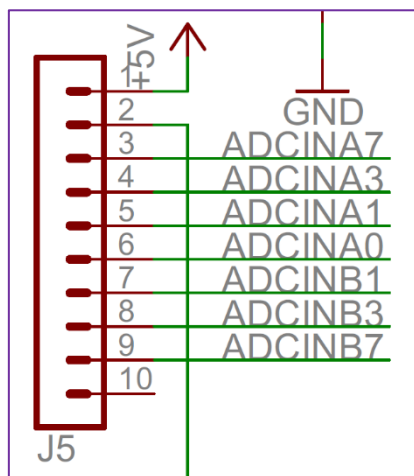


Figura 73: Entradas conversor analógico digital

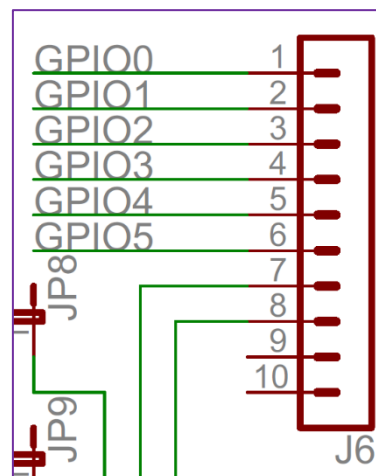


Figura 72: Salidas del microcontrolador

Para la lectura de la tensión de salida, no se ha utilizado el pin de la tarjeta debido a que cuando se conectaba con el DSP aparecía un offset en la tensión. Por tanto, se optó por hacer un divisor de tensión externo, en paralelo a la resistencia de carga. En este caso, se han utilizado dos resistencias, una “R1” de 27.000 Ω y otra “R2” de 3.900 Ω.

Se han diseñado de esta manera para evitar que, ante una salida de tensión máxima de 24 V se obtenga una tensión máxima de 3,03 V en la resistencia de 3.900 Ω, de esta manera se evita que llegue a su tensión máxima de entrada en el microcontrolador, 3,3 V.

$$V_{R2} = \frac{R2}{(R2 + R1)} \cdot V_{salida\ máxima}$$

$$V_{R2} = \frac{3900\ \Omega}{(3900\ \Omega + 27000\ \Omega)} \cdot 24\ V = 3,03\ V$$

Finalmente, se han realizado unas capturas del programa “Code Composer Studio” para las distintas irradiancias (color naranja), las distintas tensiones de salida (color azul), corrientes (color negro) y tensiones de referencia (color gris), para una resistencia de carga fija (Fig. 74, 75, 76 y 77). Se puede observar que, a menor irradiancia, menor corriente y menor voltaje en la salida del sistema.

☞ ciclo_A	unsigned int	77	0x00008804@Data
☞ ConversionCount	unsigned int	4	0x00008803@Data
> ☞ Voltaje_LV	unsigned int[20]	[2791,2550,2910,2900,2896...]	0x00008854@Data
> ☞ Corriente_LV	unsigned int[20]	[352,340,323,317,326...]	0x00008822@Data
☞ Voltaje_LVR	float	20.3706894	0x00008808@Data
☞ Corriente_LVR	float	0.0741441846	0x00008806@Data
☞ Irradiancia	int	100	0x00008801@Data
> ☞ trama_RX	char[4]	[48 '0',49 '1',48 '0',48 '0']	0x0000881E@Data
☞ e	float	0.224206924	0x00008816@Data
☞ eacc	float	77.6243591	0x00008818@Data
☞ U	float	77.6467819	0x00008810@Data
☞ Kp	float	0.100000001	0x00008814@Data
☞ V_ref_emu	float	20.9979687	0x0000881A@Data
☞ counter	unknown	identifier not found: counter	
☞ ciclo_A	unsigned int	77	0x00008804@Data
☞ Voltage2	unknown	identifier not found: Voltage2	
☞ LoopCount	unsigned int	5	0x00008800@Data

Figura 74: Resultados experimentales (I)

Expression	Type	Value	Address
☞ ciclo_A	unsigned int	0	0x00008804@Data
☞ ConversionCount	unsigned int	16	0x00008803@Data
> ☞ Voltaje_LV	unsigned int[20]	[56,60,54,59,60...]	0x00008854@Data
> ☞ Corriente_LV	unsigned int[20]	[0,0,0,0...]	0x00008822@Data
☞ Voltaje_LVR	float	0.409162253	0x00008808@Data
☞ Corriente_LVR	float	0.0	0x00008806@Data
☞ Irradiancia	int	0	0x00008801@Data
> ☞ trama_RX	char[4]	[48 '0',48 '0',48 '0',48 '0']	0x0000881E@Data
☞ e	float	-0.420985669	0x00008816@Data
☞ eacc	float	1.29491878	0x00008818@Data
☞ U	float	0.0	0x00008810@Data
☞ Kp	float	0.100000001	0x00008814@Data
☞ V_ref_emu	float	0.0	0x0000881A@Data
☞ counter	unknown	identifier not found: counter	
☞ ciclo_A	unsigned int	0	0x00008804@Data
☞ Voltage2	unknown	identifier not found: Voltage2	
☞ LoopCount	unsigned int	7	0x00008800@Data

Figura 77: Resultados experimentales (II)

☞ ciclo_A	unsigned int	73	0x00008804@Data
☞ ConversionCount	unsigned int	19	0x00008803@Data
> ☞ Voltaje_LV	unsigned int[20]	[3791,3065,3030,3001,3030...]	0x00008854@Data
> ☞ Corriente_LV	unsigned int[20]	[350,184,334,346,339...]	0x00008822@Data
☞ Voltaje_LVR	float	21.7877121	0x00008808@Data
☞ Corriente_LVR	float	0.0891366601	0x00008806@Data
☞ Irradiancia	int	800	0x00008801@Data
> ☞ trama_RX	char[4]	[48 '0',56 '8',48 '0',48 '0']	0x0000881E@Data
☞ e	float	-0.140609741	0x00008816@Data
☞ eacc	float	73.1447906	0x00008818@Data
☞ U	float	73.1307297	0x00008810@Data
☞ Kp	float	0.100000001	0x00008814@Data
☞ V_ref_emu	float	21.5625458	0x0000881A@Data
☞ ciclo_A	unsigned int	73	0x00008804@Data
☞ LoopCount	unsigned int	3	0x00008800@Data

Figura 76: Resultados experimentales (III)

Expression	Type	Value	Address
☞ ciclo_A	unsigned int	76	0x00008804@Data
☞ ConversionCount	unsigned int	17	0x00008803@Data
> ☞ Voltaje_LV	unsigned int[20]	[3123,3135,3027,2717,3136...]	0x00008854@Data
> ☞ Corriente_LV	unsigned int[20]	[3832,351,468,382,348...]	0x00008822@Data
☞ Voltaje_LVR	float	22.4000206	0x00008808@Data
☞ Corriente_LVR	float	0.129573718	0x00008806@Data
☞ Irradiancia	int	1000	0x00008801@Data
> ☞ trama_RX	char[4]	[49 '1',48 '0',48 '0',48 '0']	0x0000881E@Data
☞ e	float	0.00881767273	0x00008816@Data
☞ eacc	float	76.2700806	0x00008818@Data
☞ U	float	76.2709656	0x00008810@Data
☞ Kp	float	0.100000001	0x00008814@Data
☞ V_ref_emu	float	22.4550571	0x0000881A@Data
☞ ciclo_A	unsigned int	76	0x00008804@Data
☞ LoopCount	unsigned int	0	0x00008800@Data

Figura 75: Resultados experimentales (IV)

Los resultados de las anteriores figuras (Fig. 74, 75, 76 y 77), se muestra en ellas las tensiones y corrientes obtenidas ante distintas irradiancias (0, 100, 800 y 1000), donde se puede observar que, en todas las figuras, la tensión de salida consigue alcanzar prácticamente la tensión de referencia. Además, a mayor irradiancia, se muestra una mayor tensión y corriente de salida, cumpliendo el objetivo de poder funcionar a distintas potencias.

Por último, se ha modificado la resistencia de carga con un valor menor para poder aumentar la corriente de salida. Se ha utilizado una resistencia de 27Ω , y se han añadido representaciones de las lecturas desde el osciloscopio (Fig. 78, 79, 80 y 81).

Expression	Type	Value	Address
> Corriente LV	unsigned int[20]	[0,0,0,0...]	0x00008822@Data
⚡ Voltaje LVR	float	0.385157079	0x00008808@Data
⚡ Corriente LVR	float	0.0	0x00008806@Data
⚡ Irradiancia	int	0	0x00008801@Data
> trama_RX	char[4]	[48 '0',48 '0',48 '0',48 '0']	0x0000881E@Data
⚡ e	float	-0.383365661	0x00008816@Data
⚡ eacc	float	85.1826782	0x00008818@Data
⚡ U	float	0.0	0x00008810@Data
⚡ Kp	float	0.0557999983	0x00008814@Data
⚡ V_ref_emu	float	0.0	0x0000881A@Data
⚡ ciclo_A	unsigned int	0	0x00008804@Data
⚡ LoopCount	unsigned int	4	0x00008800@Data
⚡ Ki	float	0.0120000001	0x0000880E@Data

Figura 78: Resultados con una resistencia de 27Ω con irradiancia 0 en CCS

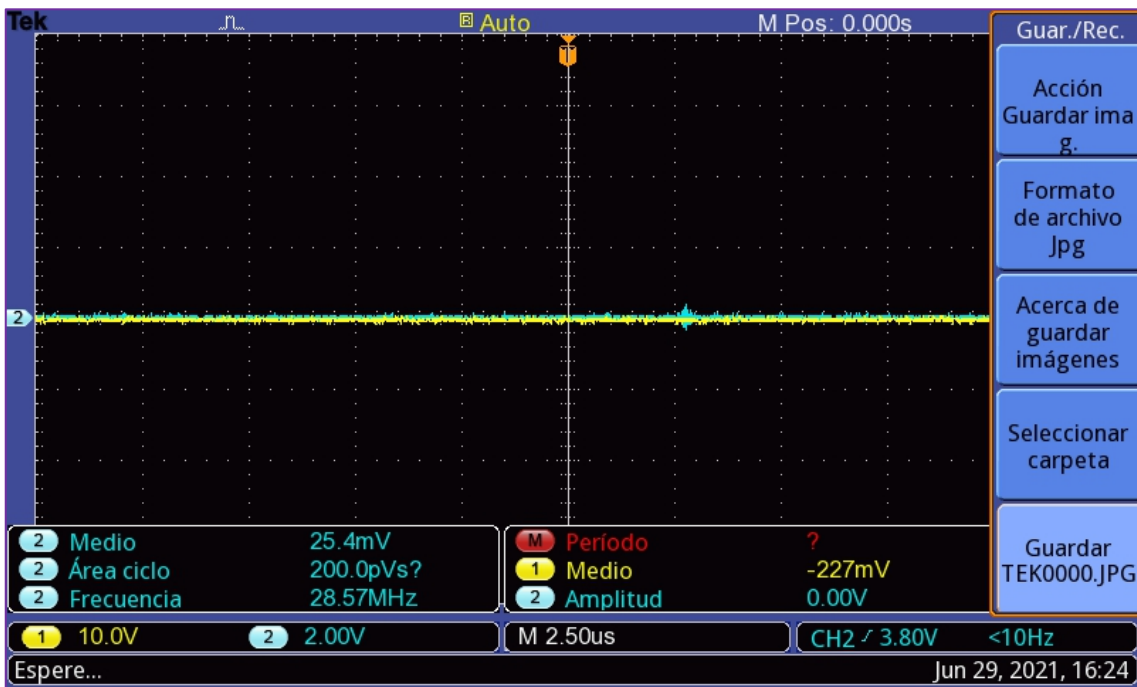


Figura 79: Resultados con una resistencia de 27Ω con irradiancia 0 en el osciloscopio

Expression	Type	Value	Address
> Corriente_LV	unsigned int[20]	[147,184,140,1063,173...]	0x00008822@Data
⊞ Voltaje_LVR	float	22.9016209	0x00008808@Data
⊞ Corriente_LVR	float	0.837490797	0x00008806@Data
⊞ Irradiancia	int	1000	0x00008801@Data
> trama_RX	char[4]	[49 '1',48 '0',48 '0',48 '0']	0x0000881E@Data
⊞ e	float	-0.0147228241	0x00008816@Data
⊞ eacc	float	7595.93652	0x00008818@Data
⊞ U	float	91.1504135	0x00008810@Data
⊞ Kp	float	0.0557999983	0x00008814@Data
⊞ V_ref_emu	float	22.8965702	0x0000881A@Data
⊞ ciclo_A	unsigned int	91	0x00008804@Data
⊞ LoopCount	unsigned int	10	0x00008800@Data
⊞ Ki	float	0.0120000001	0x0000880E@Data

Figura 81: Resultado con una resistencia de 27Ω con irradiancia 1000 en CCS

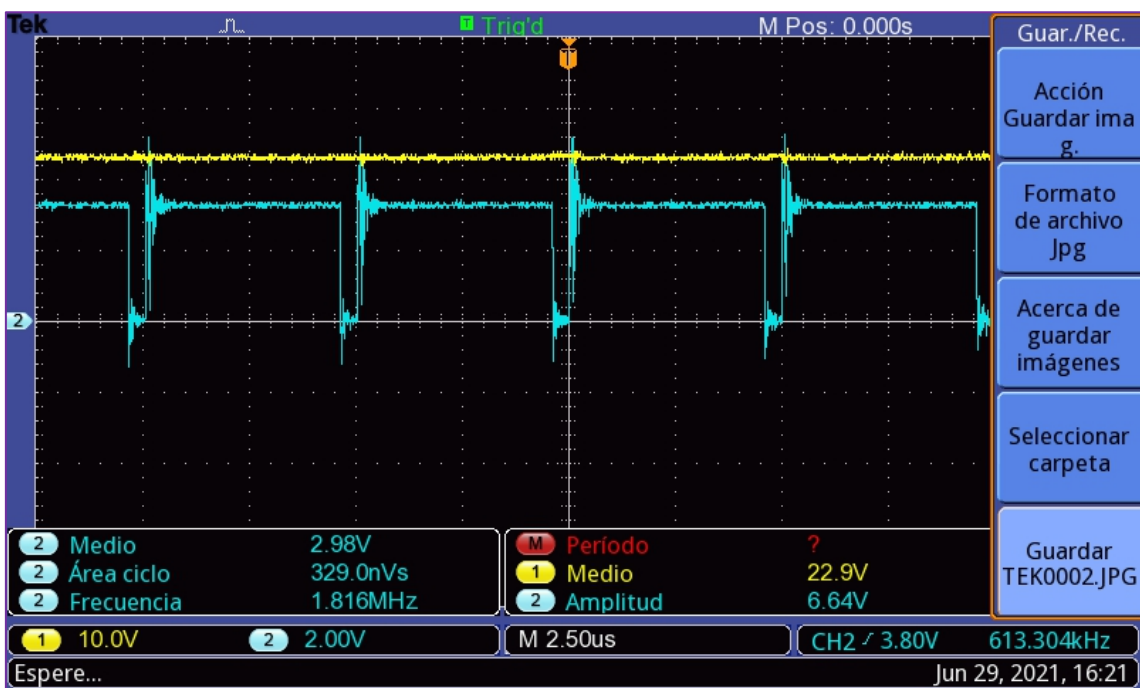


Figura 80: Resultado con una resistencia de 27Ω con irradiancia 1000 en el osciloscopio

Los resultados obtenidos (Fig. 78 y 79) son los esperados, debido a que, con una irradiancia de cero, su tensión de salida tendría que ser prácticamente cero, aunque la tensión de salida leída no es cero, esto puede tratarse de ruido, ya que la corriente de lectura sí que es cero.

Por último, los resultados con una irradiancia de 1000 (Fig. 80 y 81), se puede observar que la tensión de referencia es alcanzada por la tensión de salida, y también se cumple que la lectura del osciloscopio concuerda con la lectura del microcontrolador.

7. Propuestas de mejora o ampliación

En este apartado se van a dar distintas ideas de ampliación del proyecto o mejoras de este por si se desean realizar en un futuro.

Se podría utilizar un sensor de iluminación, para hacer el sistema más real sin quitar la opción de utilizar un parámetro de irradiancia determinado. Esto sería útil para poder seguir utilizando la solución adoptada actual, y se implementaría una opción de usar una irradiancia determinada o un sensor de iluminación para un estudio o una representación más real en función del clima.

Además, se han realizado unos modelos de Simulink para una posible ampliación, utilizando un convertidor de potencia electrónico de tipo "Boost" para aumentar la tensión de salida del emulador (Fig. 82), y un inversor de corriente para inyectar directamente en red (Fig. 83).

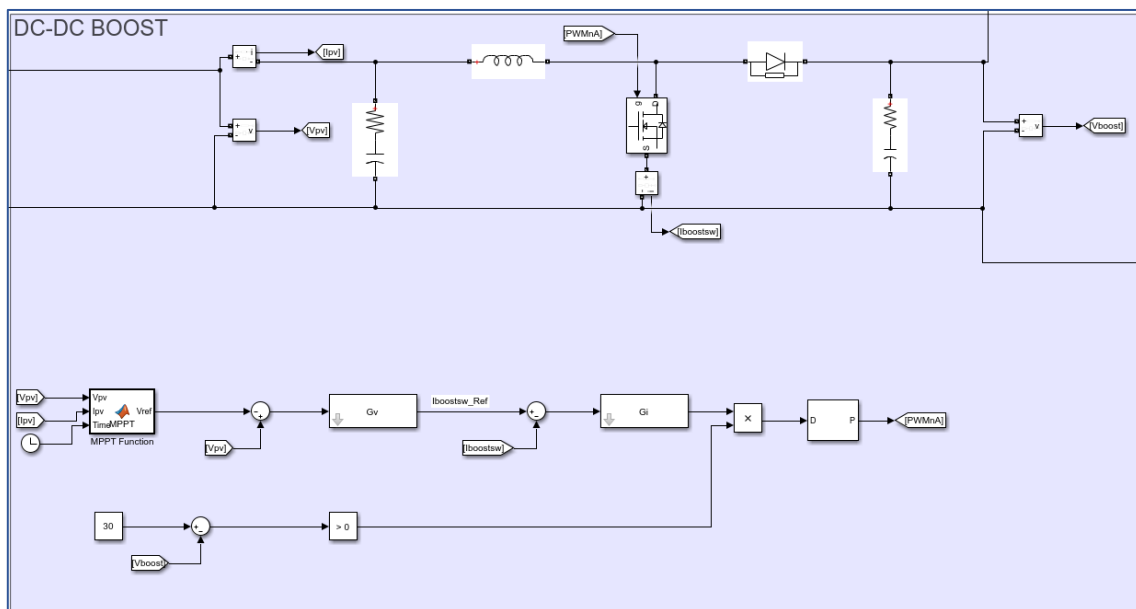


Figura 82: Convertidor de electrónico de potencia "Boost"

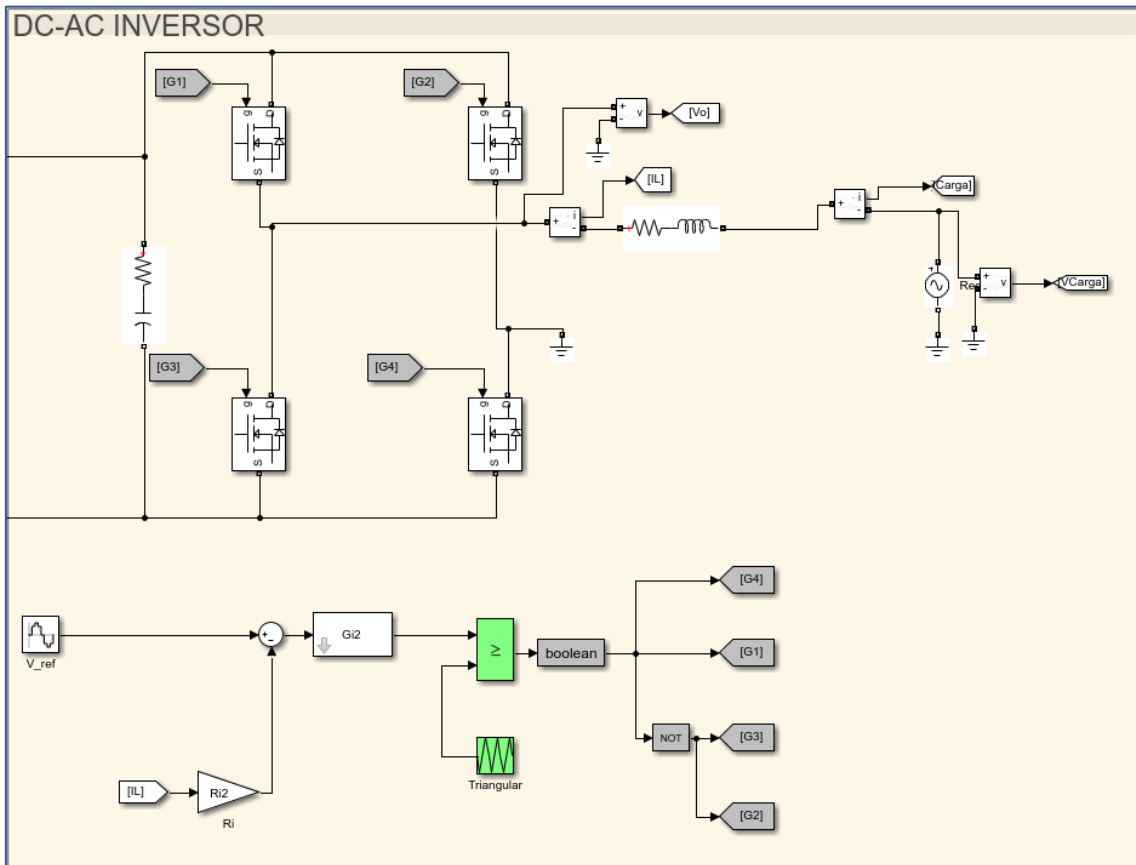


Figura 83: Inversor de corriente continua con inyección a red

Por tanto, se podría recrear una simulación del funcionamiento de la conversión de la energía de luz solar, hasta su transformación en corriente alterna (Fig. 84).

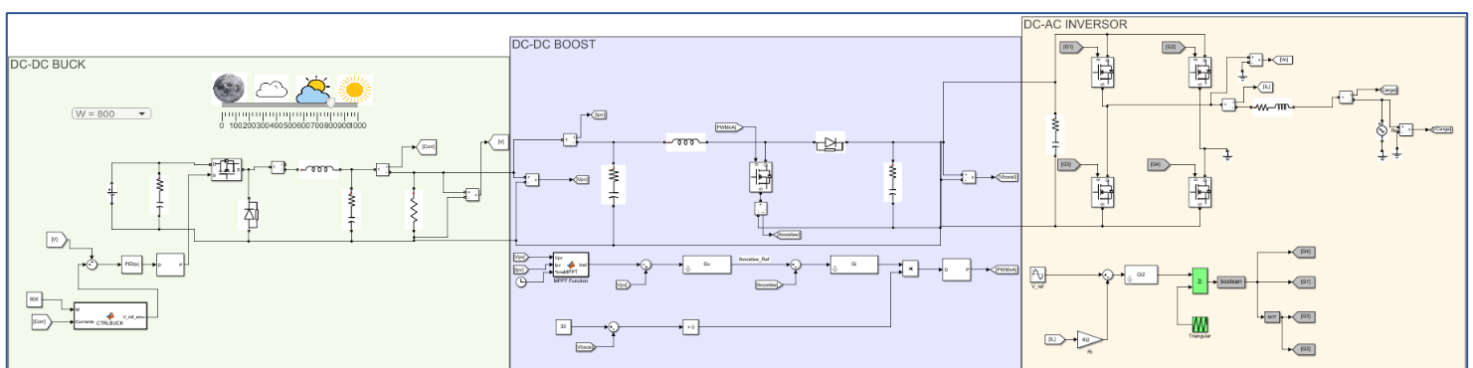


Figura 84: Simulación del funcionamiento de transformación de energía solar a corriente alterna

8. Conclusiones

Los principales objetivos del proyecto se han alcanzado correctamente. En el apartado de simulación, en la solución adoptada se ha observado un correcto funcionamiento con las curvas diseñadas. Además, ha sido la parte en la que menos problemas se han tenido.

El apartado del hardware empleado ha sido una de las partes más complejas, ya que al principio del desarrollo del proyecto hubo problemas. Estos eran debidos a que la tarjeta del circuito impreso había sido modificada respecto a los planos principales de este.

Dicha modificación creaba un problema de cortocircuito, por lo tanto, se tuvo que verificar la continuidad de gran parte de las pistas de cobre de la tarjeta. Finalmente, el cortocircuito se detectó en la modificación que se hizo previamente al desarrollo de este proyecto.

Además, se rediseñó una pequeña parte de la tarjeta, en concreto en el circuito de potencia, debido a la modificación previa (Fig. 85). Debido a esto, se han diseñado en el programa Proteus los nuevos esquemáticos de la parte de potencia de la tarjeta, esta modificación solo afecta a la conexión del amplificador operacional.

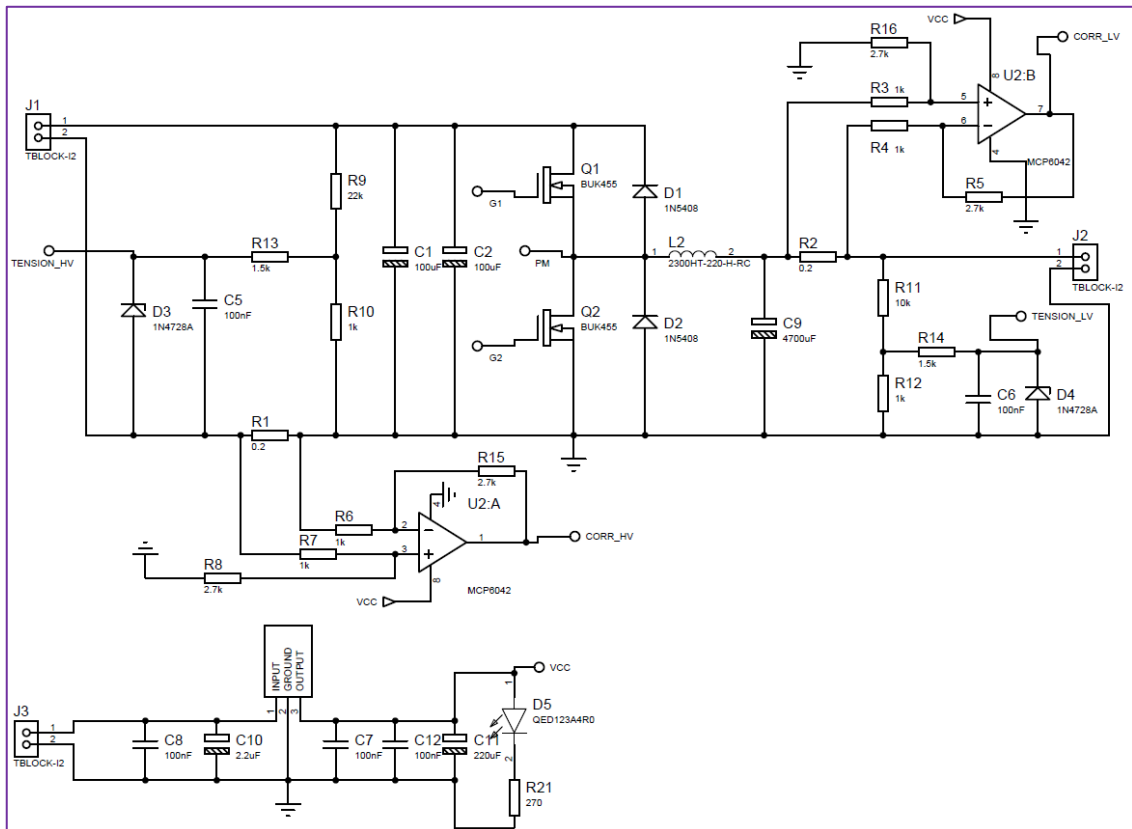


Figura 85: Esquemático de la modificación de la tarjeta de circuito impreso

Posteriormente, se ha realizado un modelo 3D de la tarjeta en el programa de Proteus (Fig. 86).

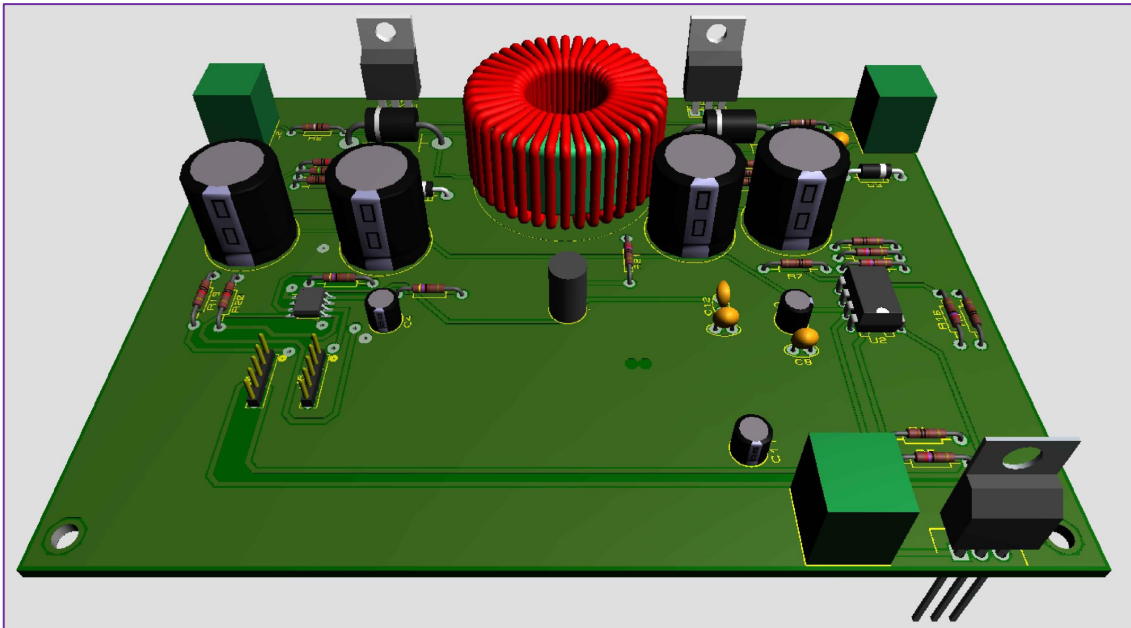


Figura 86: Modelo 3D de la modificación de la tarjeta de circuito impreso

Otra dificultad encontrada en el hardware ha sido debido a que se ha tenido que implementar una frecuencia de conmutación muy alta en el componente MOSFET para un correcto funcionamiento. Esto ha provocado que se hayan ido dañando diversos componentes del hardware y se hayan tenido que reemplazar.

Al no disponer de otro hardware con la misma funcionalidad, se ha utilizado este en concreto y se han ido sustituyendo los componentes que se han ido perjudicando a lo largo del proyecto.

En definitiva, ha sido un proyecto completo ya que se ha realizado una simulación, y se ha utilizado tanto electrónica de potencia, como electrónica digital. Sin embargo, la mayor parte del tiempo de este proyecto ha sido invertido en la implementación; tanto en la programación del microcontrolador como en el entendimiento del hardware.

Finalmente, el proyecto se ha podido llevar a cabo con buenos resultados en todos los apartados de la solución adoptada.

9. Bibliografía

- Global Solar Atlas*. (2021). Recuperado el Junio de 2021, de <https://globalsolaratlas.info/map?c=23.841026,-73.546847,2>
- Naciones Unidas. (s.f.). *un.org*. Recuperado el 07 de Junio de 2021, de [un.org: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/](https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/)
- Pardo, C. (Junio de 2021). *Picuíno*. Recuperado el 9 de Junio de 2021, de <https://www.picuíno.com/es/arduprog/control-ziegler-nichols.html>
- Puerto, K. (27 de Junio de 2017). *Xataka*. Recuperado el Junio de 2021, de Xataka: <https://www.xataka.com/energia/hay-futuro-para-los-paneles-solares-en-el-techo-de-tu-coche>
- Research Gate*. (s.f.). Recuperado el 9 de Junio de 2021, de https://www.researchgate.net/publication/28174764_Dinamica_de_un_C_onvertidor_Buck_con_Controlador_PI_Digital/figures?lo=1
- Rus, C. (14 de Mayo de 2020). *Xataka*. Recuperado el Junio de 2021, de <https://www.xataka.com/energia/nueva-tecnica-permite-a-paneles-solares-transpirar-para-mejorar-su-eficiencia-conservacion-energia>
- Santos, M. (11 de Marzo de 2018). *Hardzone*. Recuperado el Junio de 2021, de <https://hardzone.es/2018/03/11/uso-pwm-pc/>
- Texas Instruments. (9 de Junio de 2021). *Texas Instruments*. Obtenido de <https://www.ti.com/lit/an/sprabr4a/sprabr4a.pdf>
- Wikipedia*. (s.f.). Recuperado el 9 de Junio de 2021, de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buck_operating.svg
- Wikipedia*. (s.f.). Recuperado el 9 de Junio de 2021, de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buck_chronogram.svg
- Wikipedia*. (s.f.). Recuperado el 9 de Junio de 2021, de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buck_chronogram_discontinuou_s.png



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS

DOCUMENTO II: PLANOS

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

Cuevas Cuartero, Borja

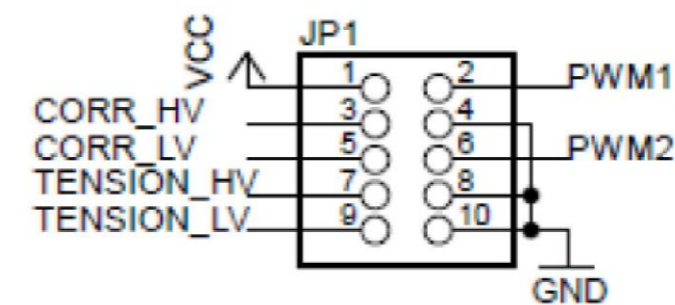
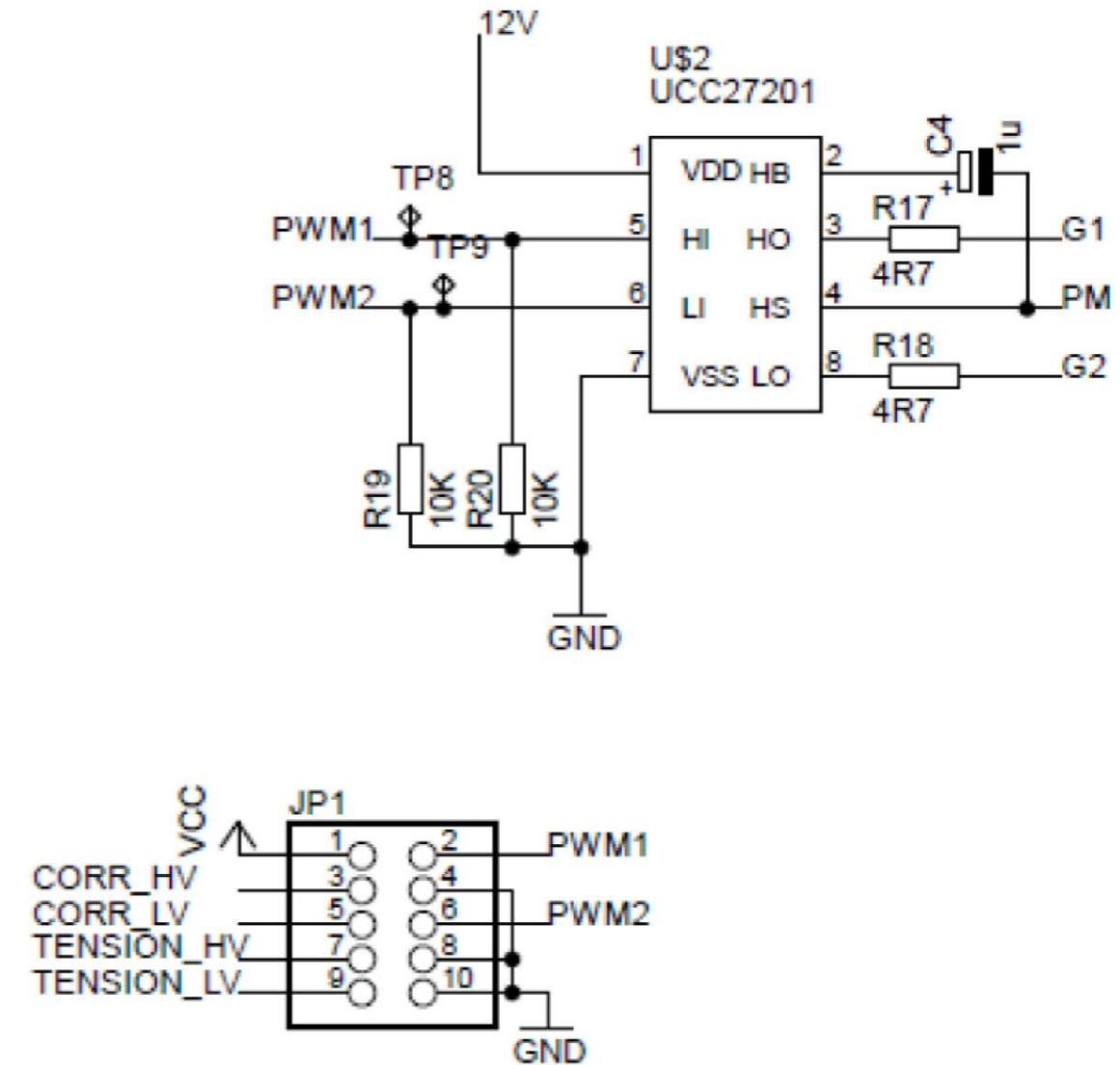
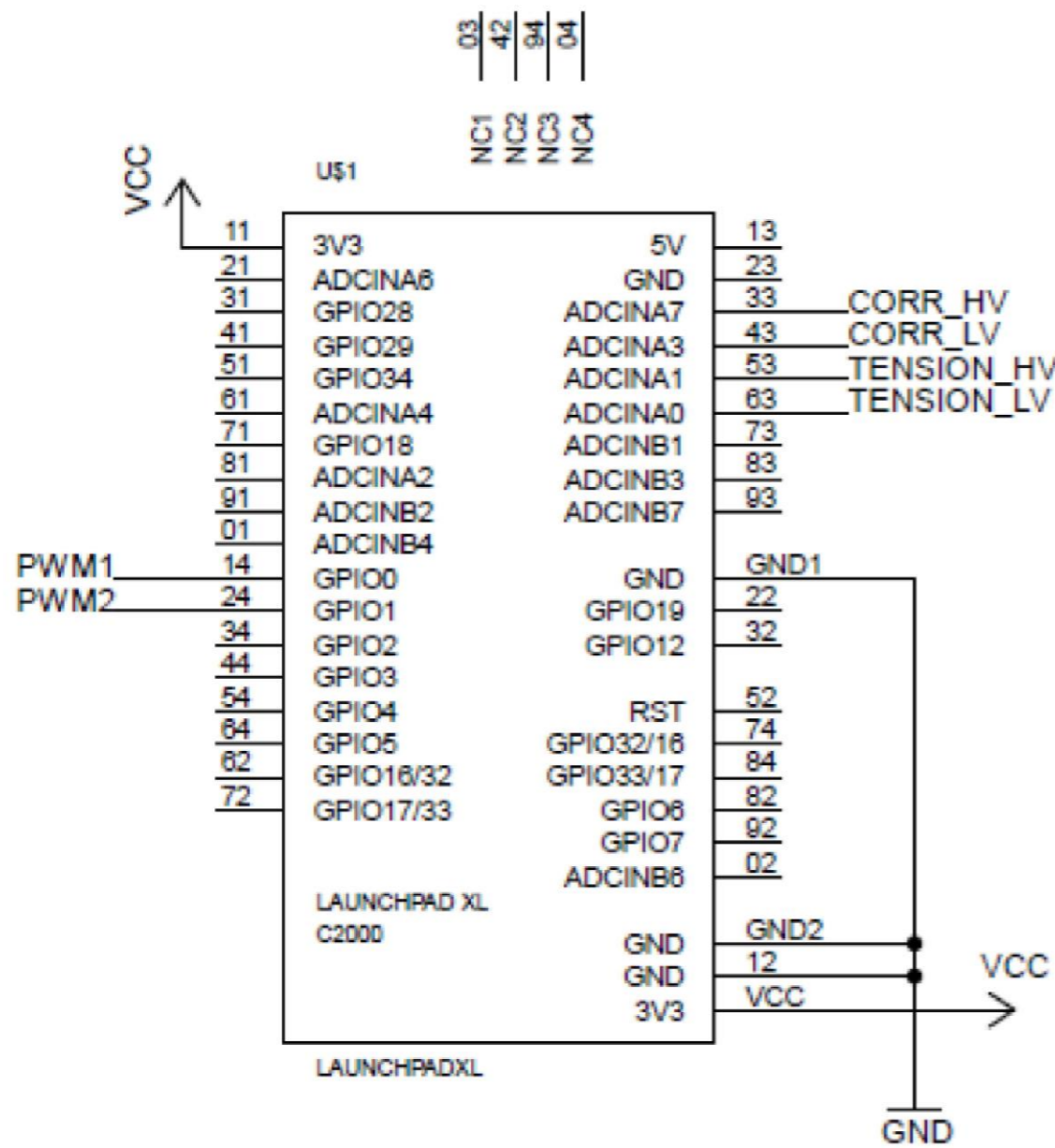
TUTORIZADO POR

Orts Grau, Salvador

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Índice

1. Esquema de control PCB	82
2. Esquema de potencia PCB.....	83
3. Diseño PCB - Serigrafía	84
4. Emulador – XDS100v2	85
5. Piccolo F2802x	86
6. Diseño LAUNCHXL – F28027	87
7. PCB – Modificación de potencia.....	88
8. Diseño PCB Modificada.....	89
9. PCB Modificada – 3D	90
10. Simulación del Emulador	92
11. Ampliación del proyecto.....	93



Pin del DSC- 28027	Descripción
ePWM 1A	Modulación PWM del transistor del convertidor BUCK
ePWM 1B	Modulación PWM del transistor del convertidor BOOST
ADCINA0	Lectura del Sensor de Tensión de Baja
ADCINA1	Lectura del Sensor de Tensión de Alta
ADCINA3	Lectura del Sensor de Corriente de Baja
ADCINA7	Lectura del Sensor de Corriente de Alta

PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS

Autor: Pablo Cholbi

Plano:

ESQUEMA DE CONTROL PCB

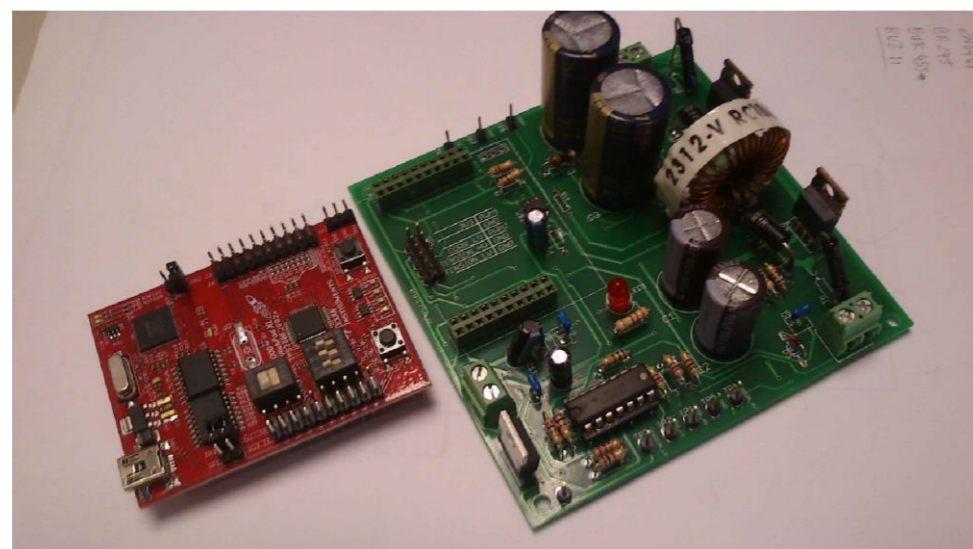
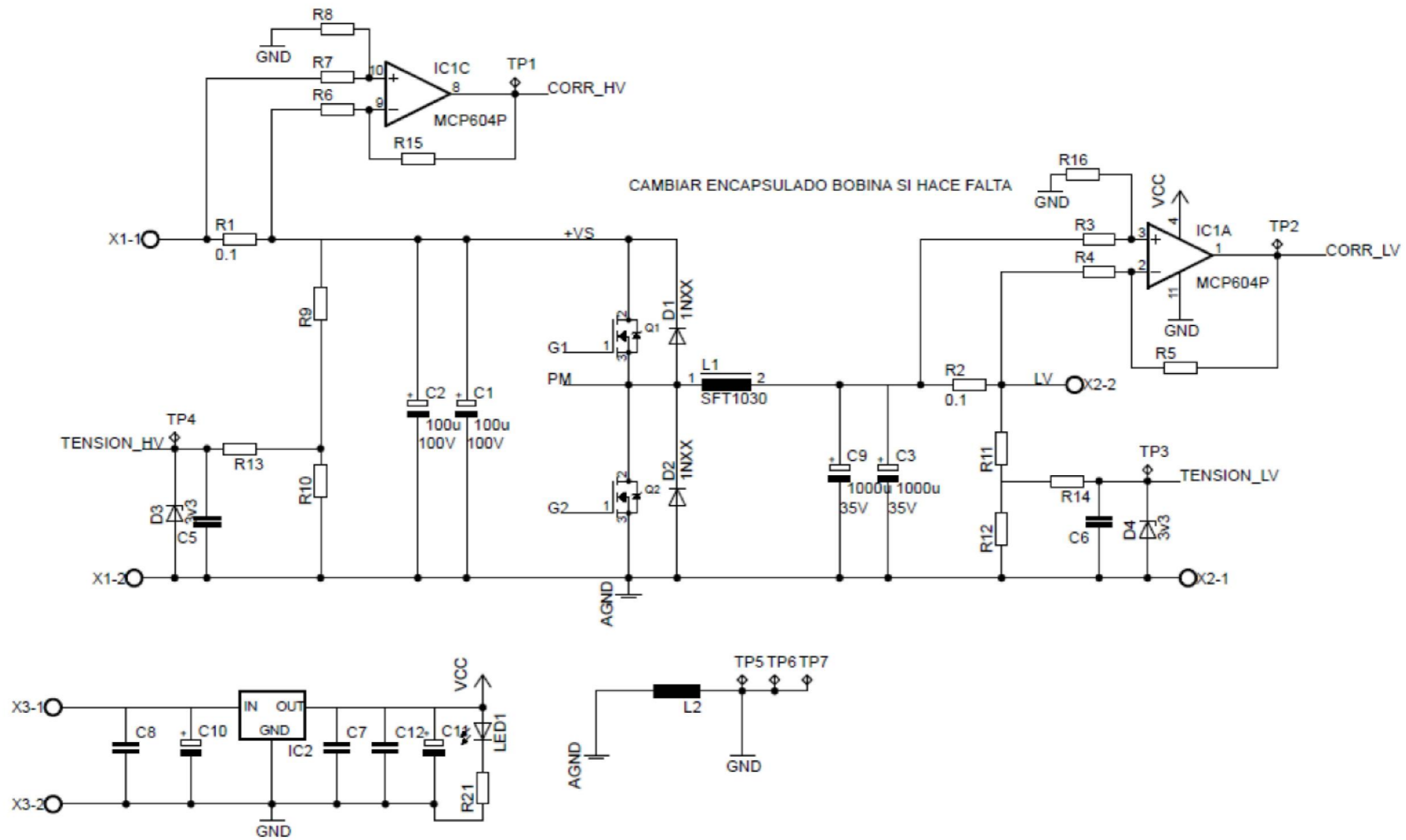
Fecha: 15/06/2021

Escala

S/E

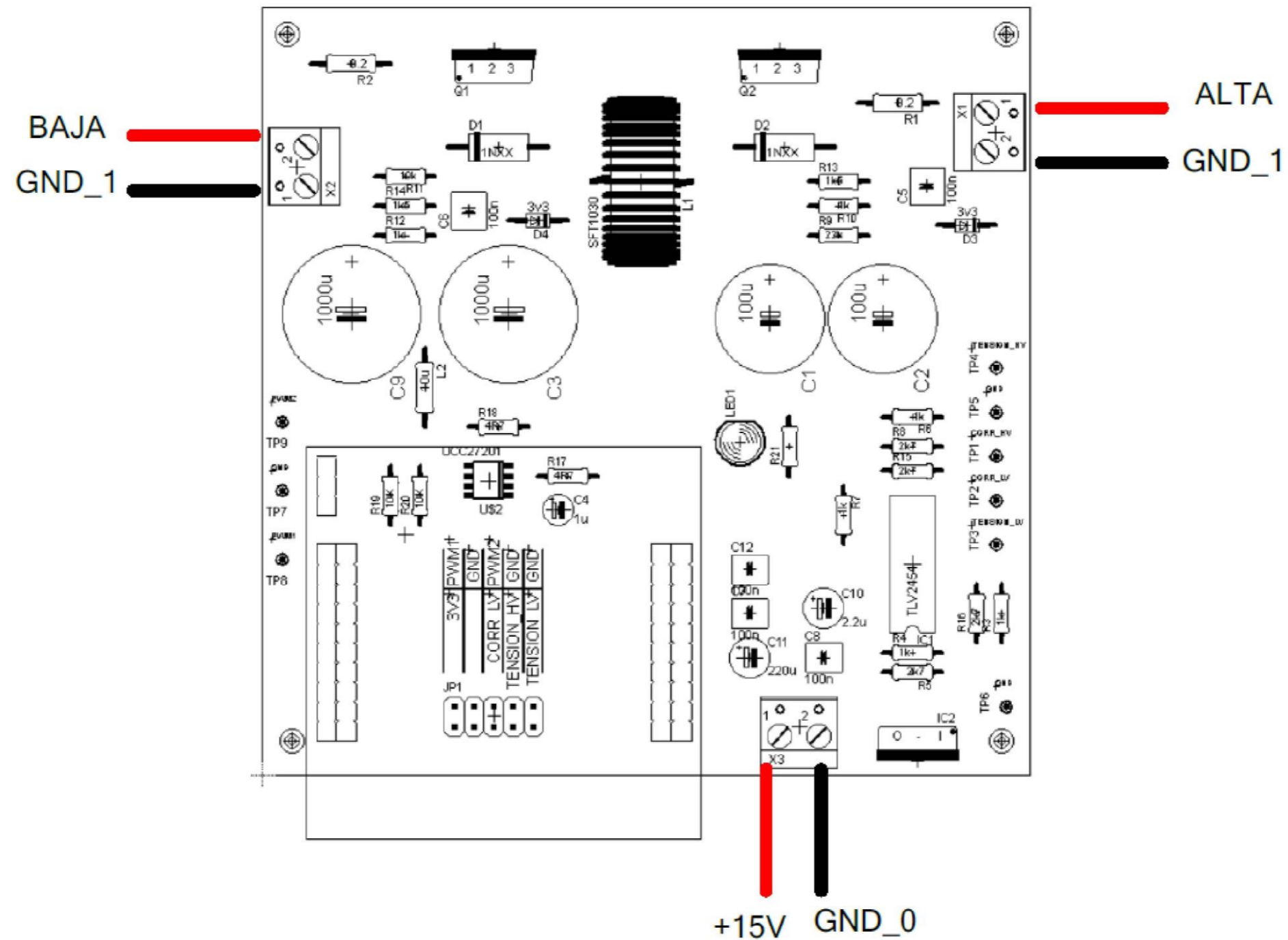
Plano N°

00



PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS		Fecha: 15/06/2021
		Escala S/E
Autor: Pablo Cholbi	Plano:	Plano N°
ESQUEMA DE POTENCIA PCB		01

BUCK-BOOST-BOARD:



PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS

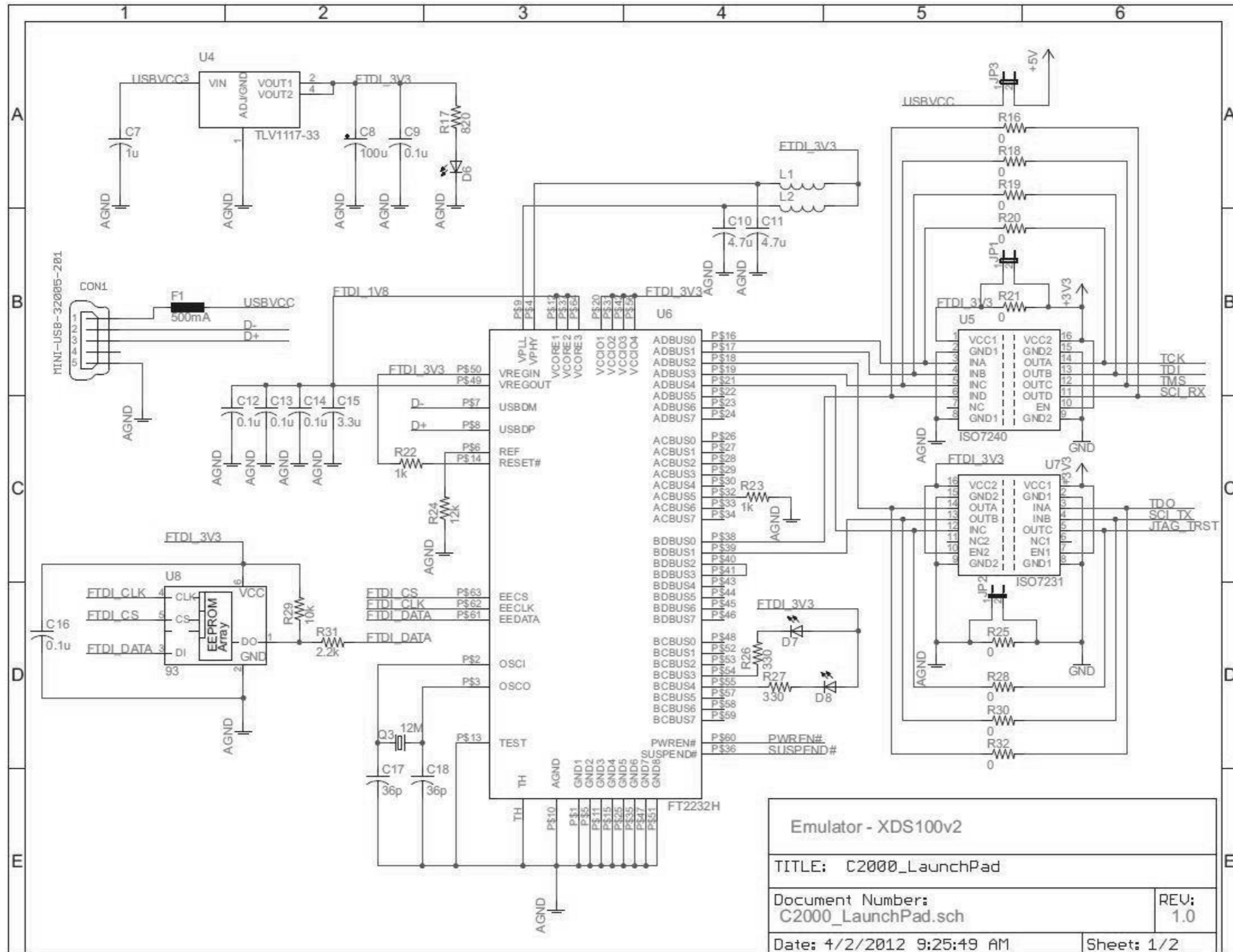
Fecha: 15/06/2021

Escala
S/E

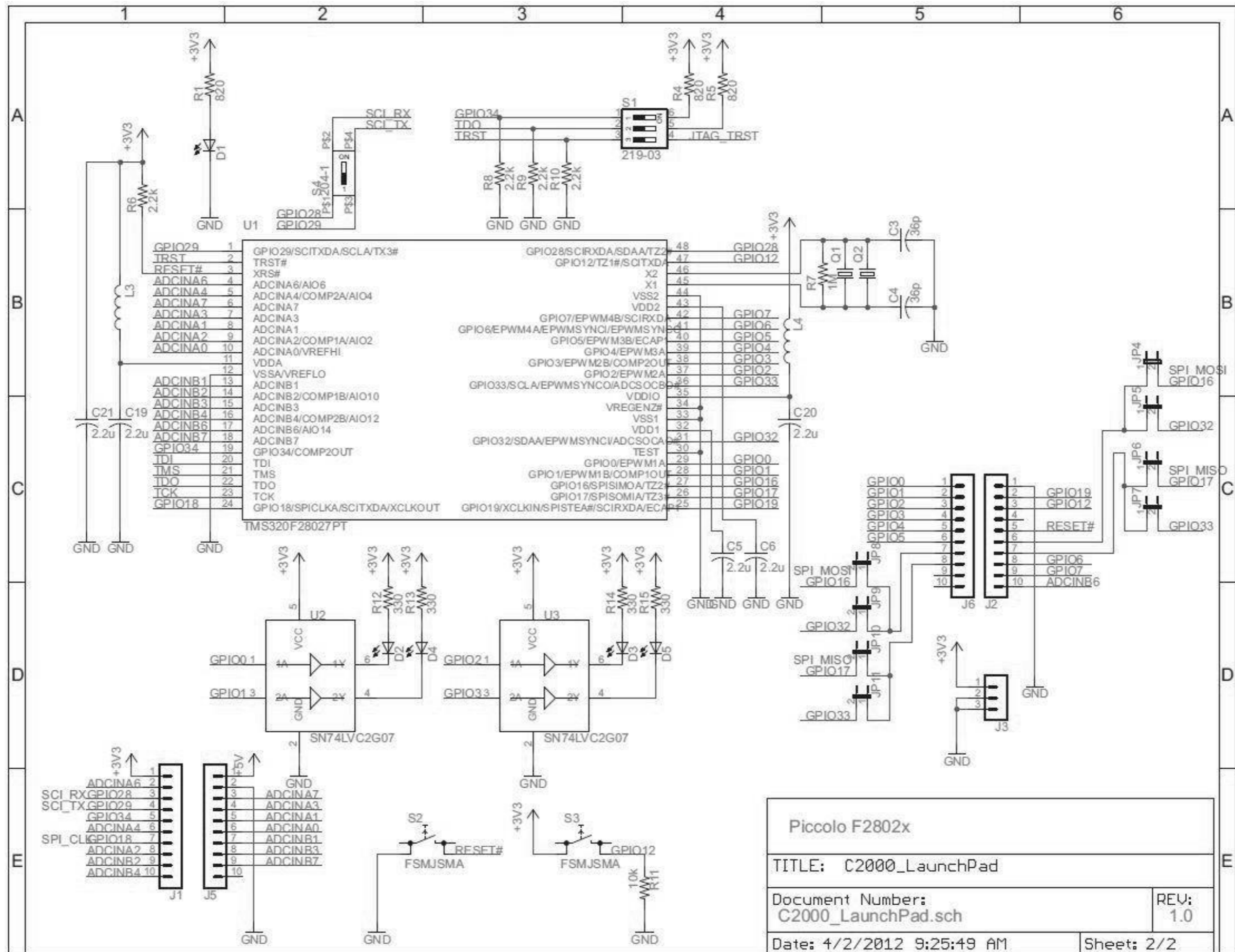
Autor: Pablo Cholbi

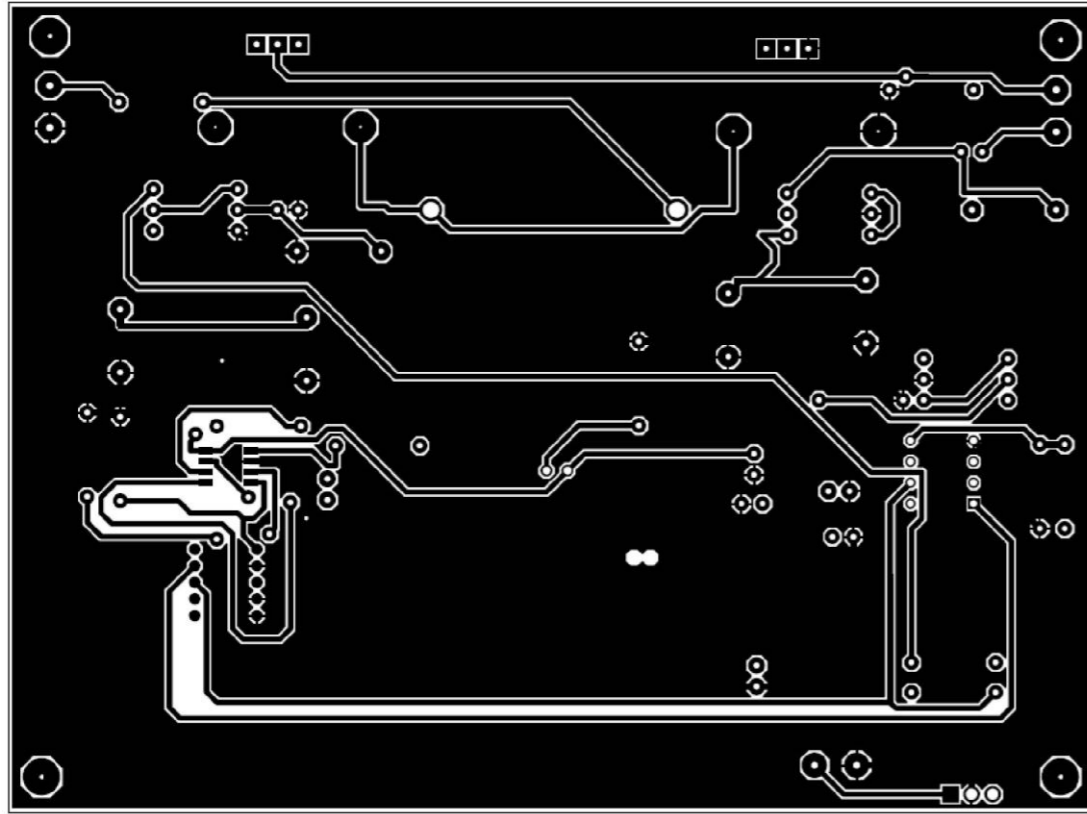
Plano:
DISEÑO PCB - SERIGRAFÍA

Plano Nº
02

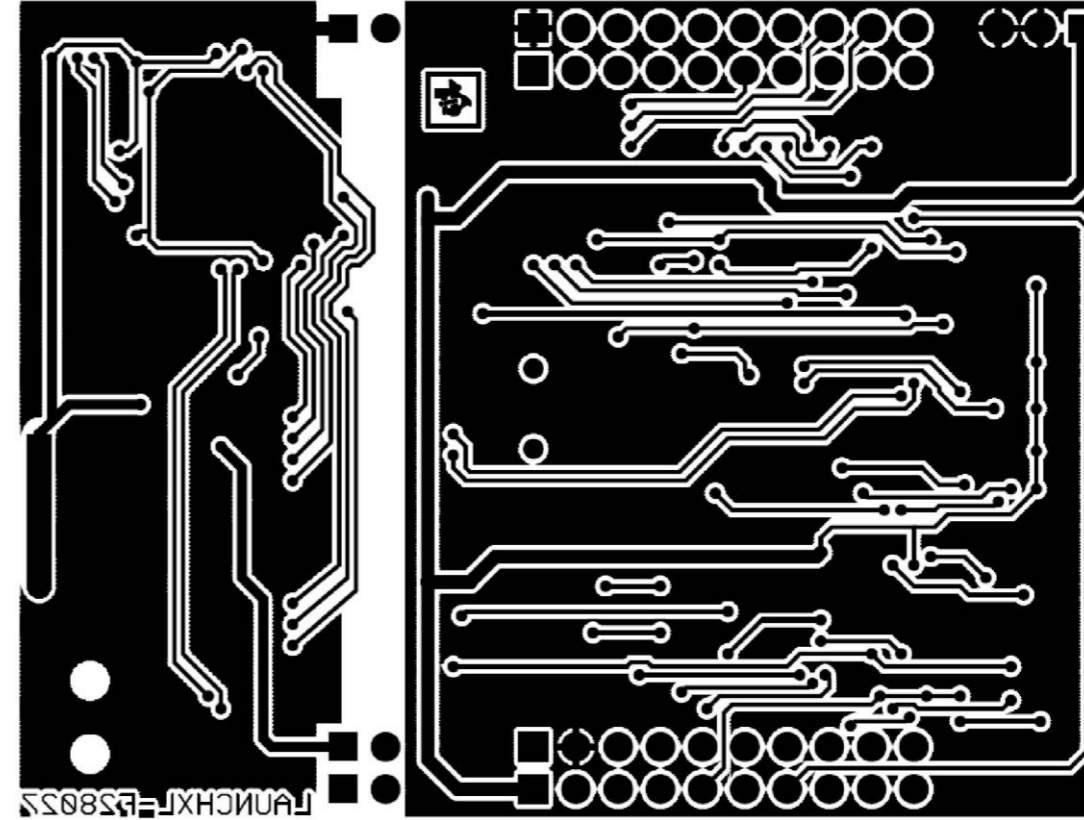


Emulator - XDS100v2	
TITLE: C2000_LaunchPad	
Document Number: C2000_LaunchPad.sch	REV: 1.0
Date: 4/2/2012 9:25:49 AM	Sheet: 1/2





DISEÑO CAPA SUPERIOR



DISEÑO CAPA INFERIOR

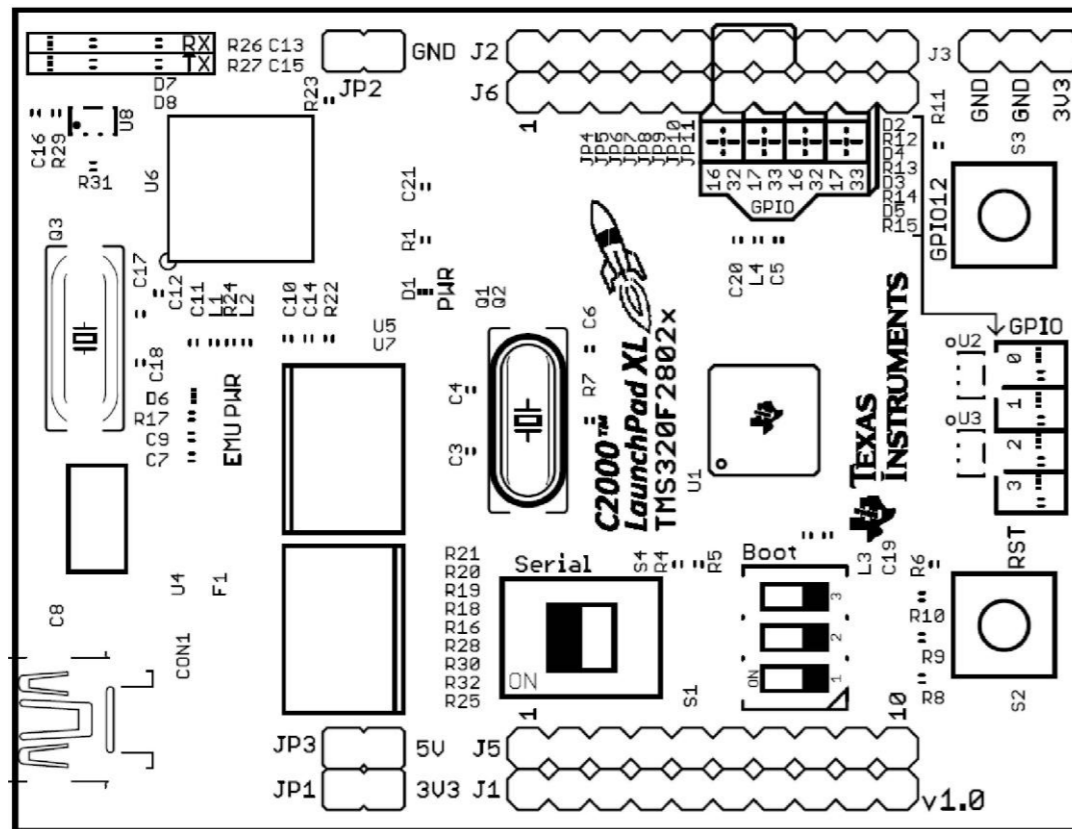
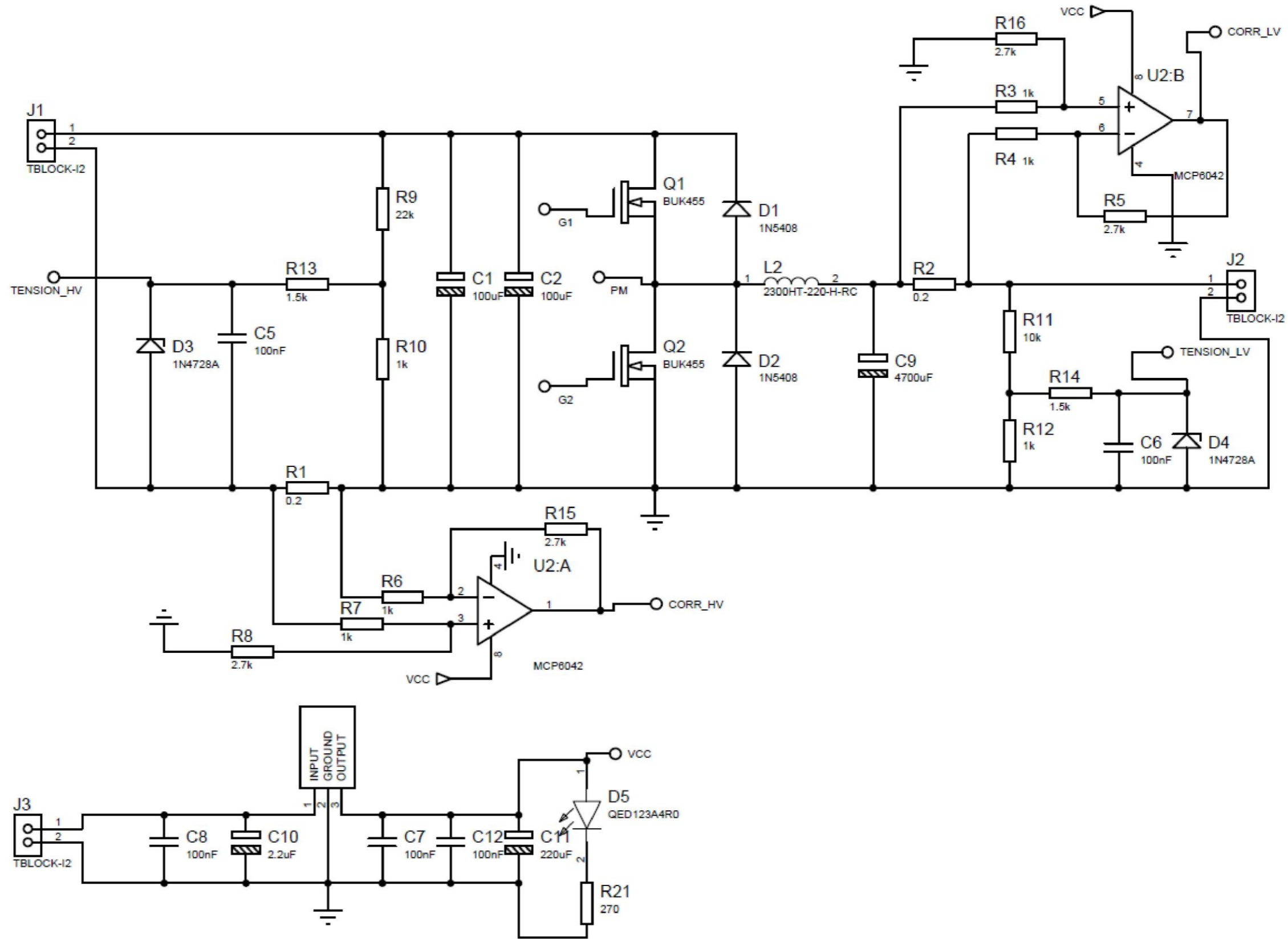
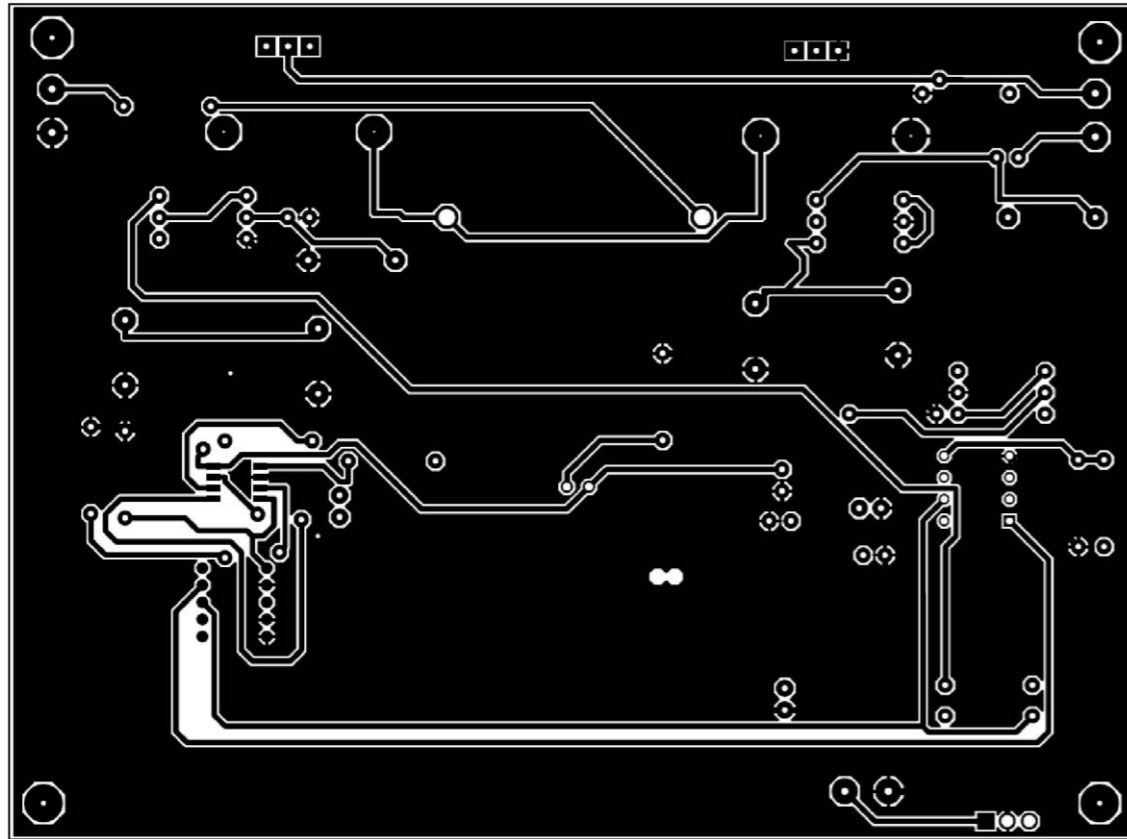


IMAGEN SERIGRAFIADA

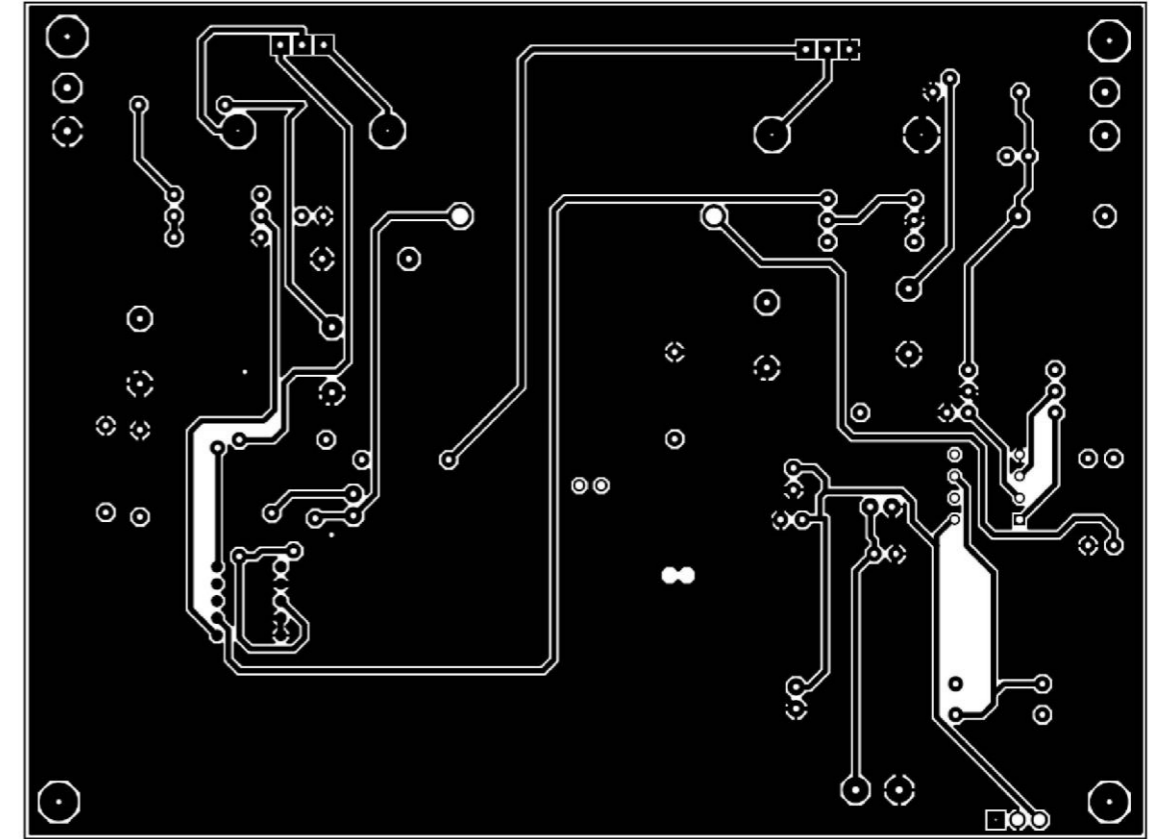
PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS		Fecha: 15/06/2021
Autor: Texas Instruments		Escala S/E
Plano: DISEÑO LAUNCHXL - F28027		Plano Nº 05



PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS		Fecha: 15/06/2021
		Escala S/E
Autor: Pablo Cholbi Modificado y testeado por: Borja Cuevas	Plano: PCB - MODIFICACIÓN DE POTENCIA	Plano Nº 06



DISEÑO CAPA SUPERIOR



DISEÑO CAPA INFERIOR

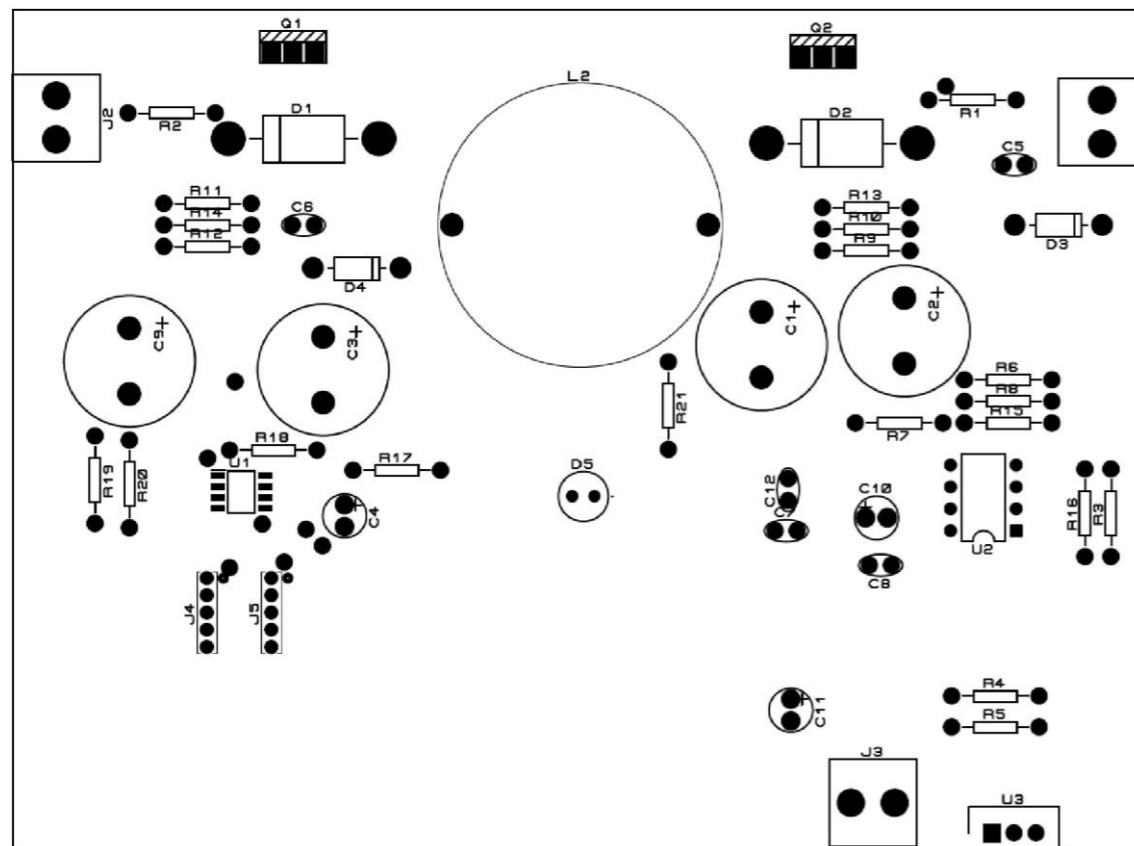
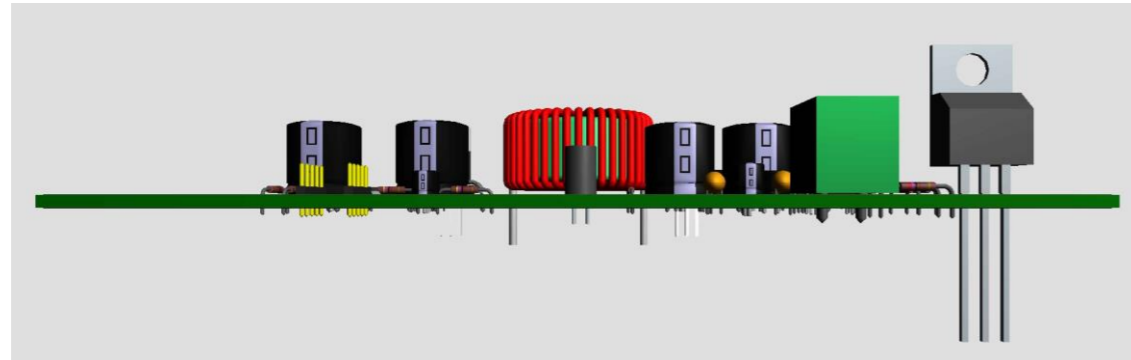
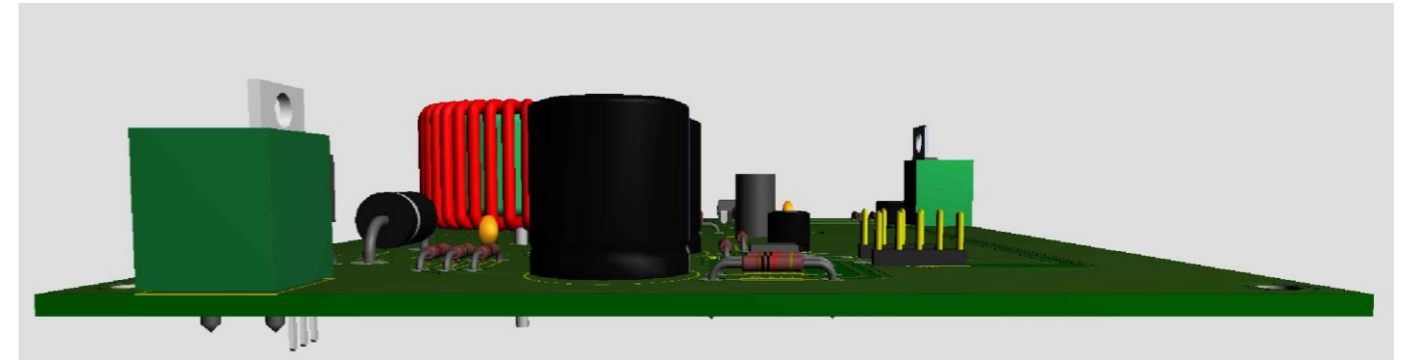


IMAGEN SERIGRAFIADA

PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS		Fecha: 15/06/2021
Autor: Pablo Cholbi Modificado y testado por: Borja Cuevas		Escala S/E
Plano: DISEÑO PCB MODIFICADA		Plano Nº 07



ALZADO

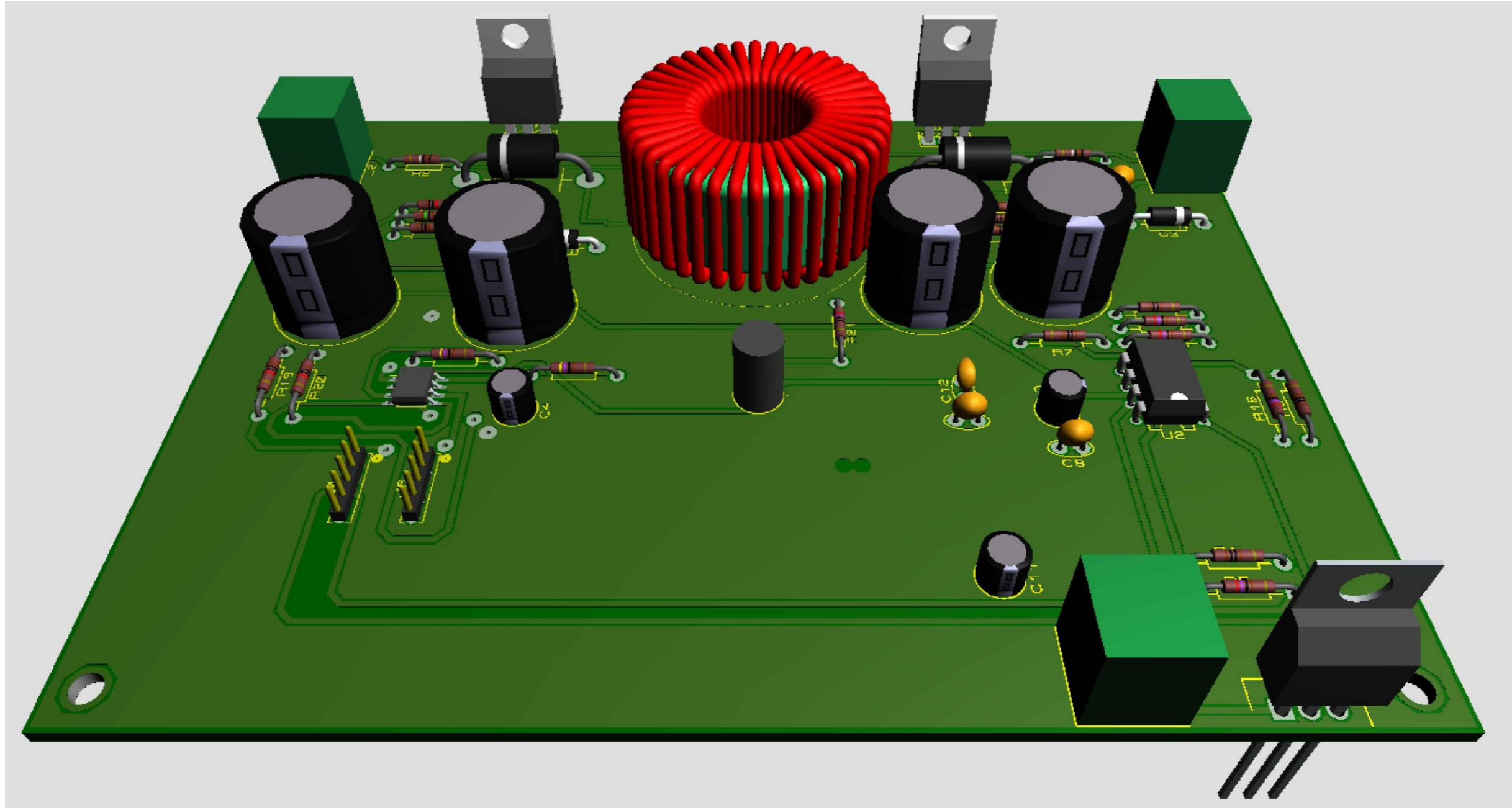


PERFIL IZQUIERDO



PLANTA

PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS		Fecha: 15/06/2021
		Escala S/E
Autor: Pablo Cholbi Modificado y testado por: Borja Cuevas	Plano: PCB MODIFICADA - 3D	Plano Nº 08



PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE
 PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK
 CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS
 INSTRUMENTS

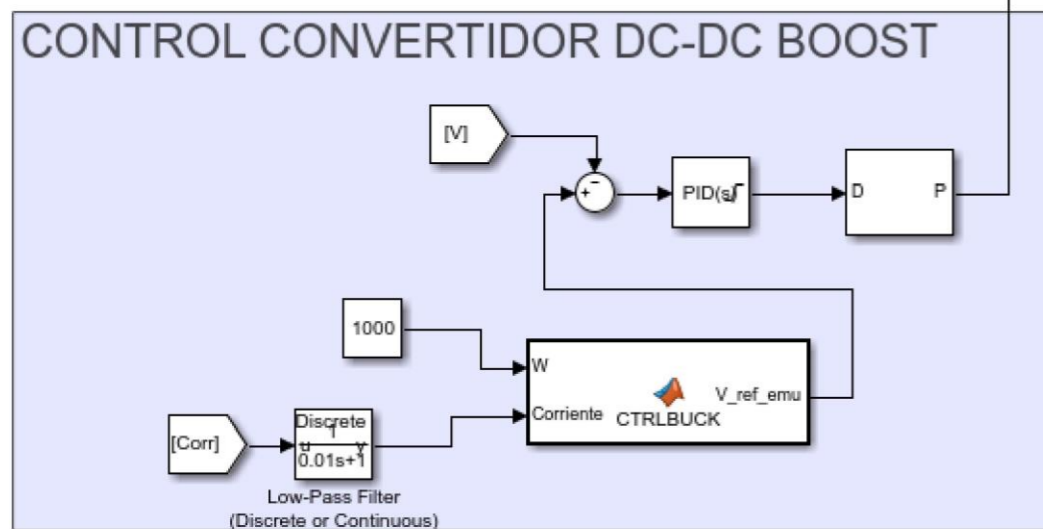
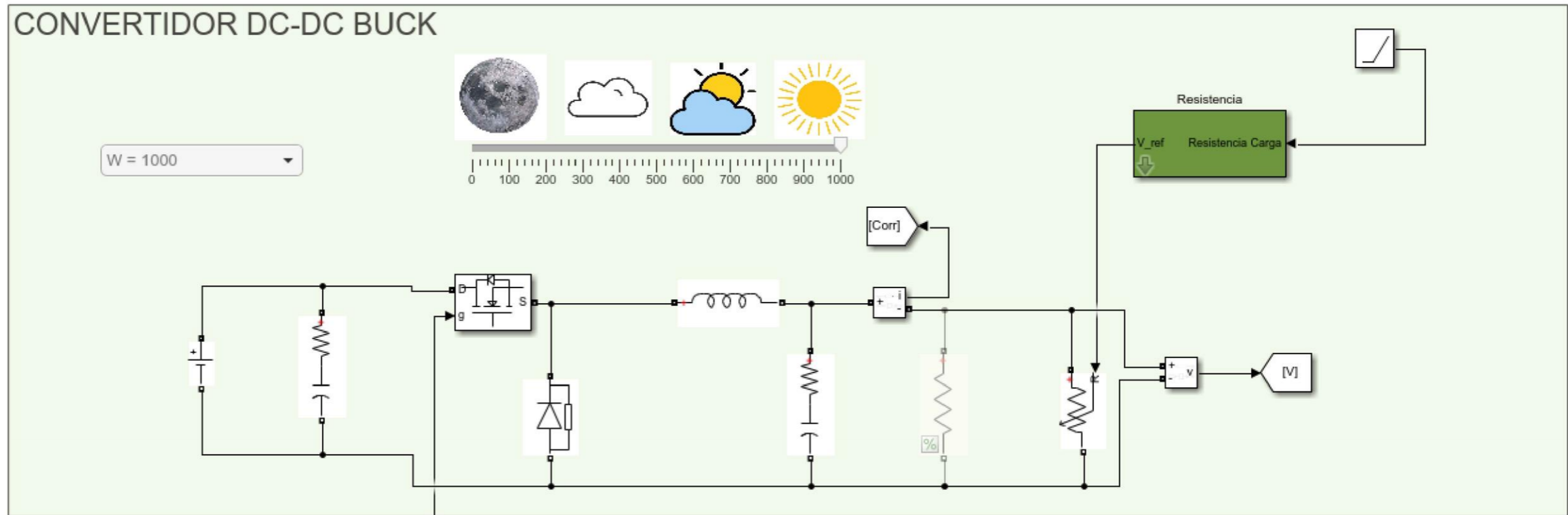
Autor: Pablo Cholbi
 Modificado y testado por:
 Borja Cuevas

Plano:
PCB MODIFICADA - 3D

Fecha: 15/06/2021

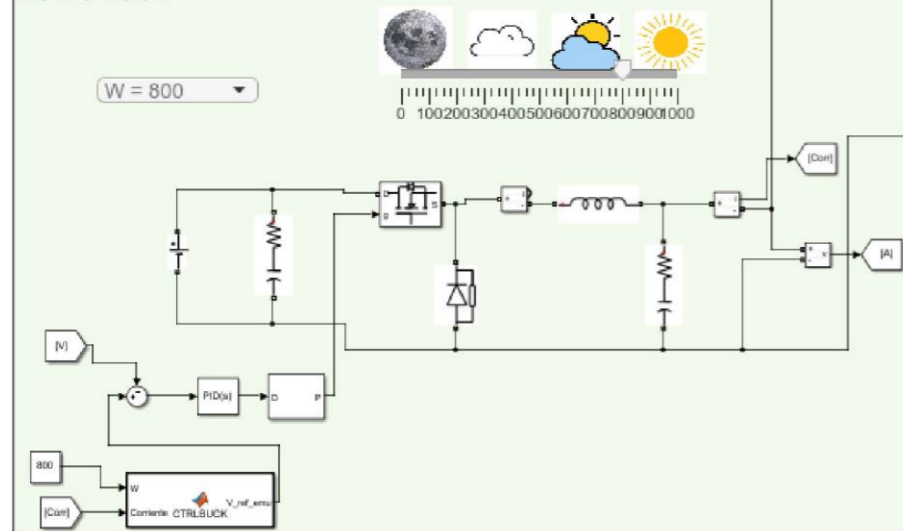
Escala
S/E

Plano Nº
09

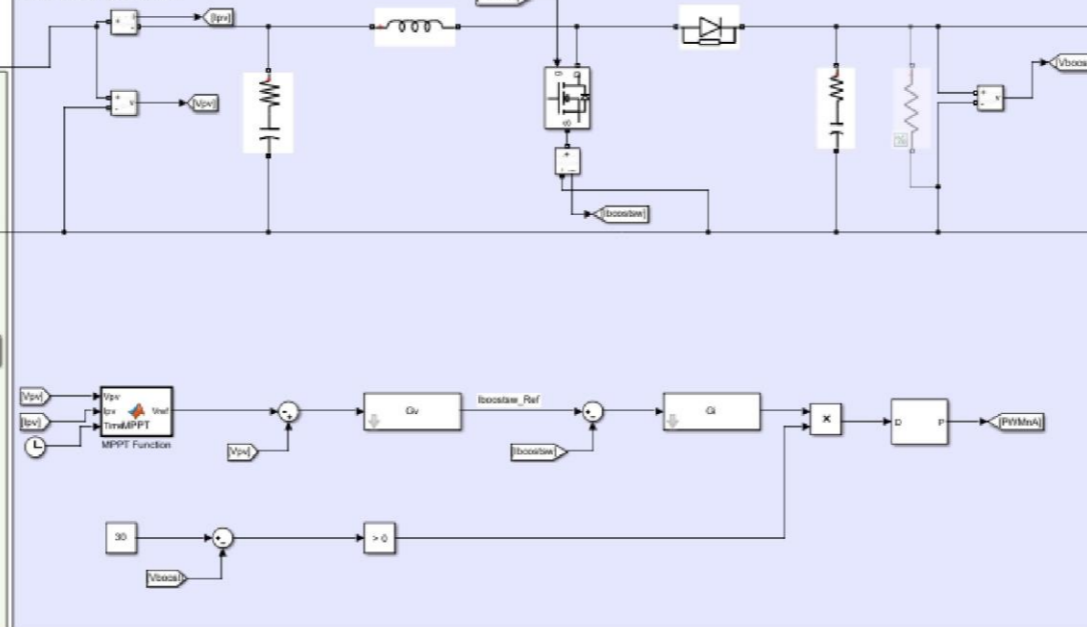


PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS		Fecha: 15/06/2021
		Escala S/E
Autor: Borja Cuevas Cuartero	Plano: SIMULACIÓN DEL EMULADOR	Plano N° 10

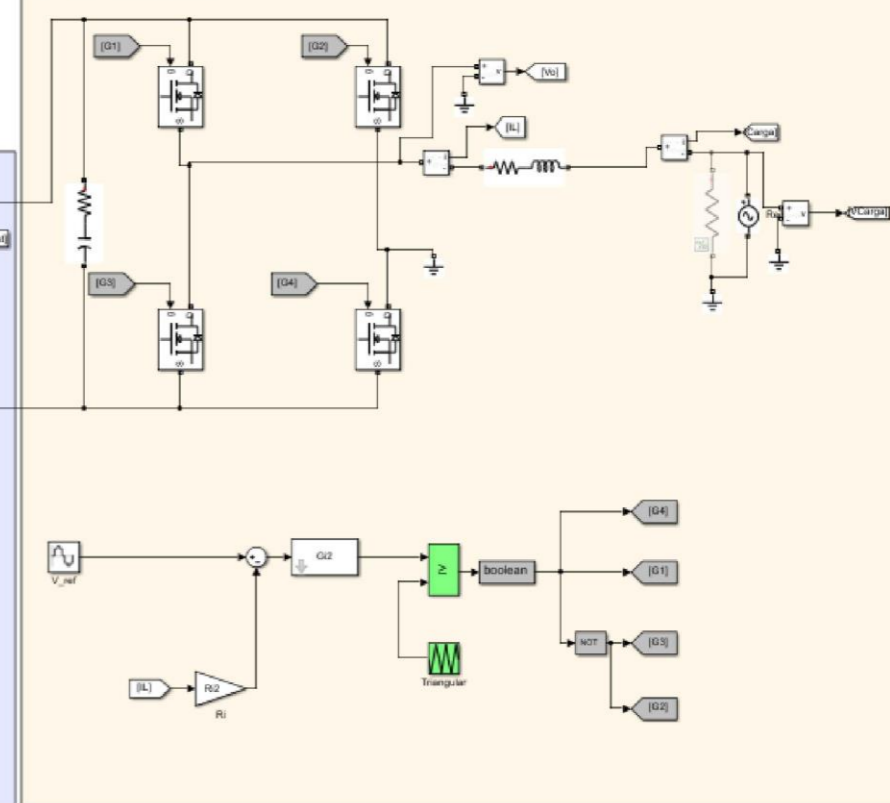
DC-DC BUCK



DC-DC BOOST



DC-AC INVERSOR



PROYECTO: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS		Fecha: 15/06/2021
		Escala S/E
Autor: Borja Cuevas Cuartero	Plano: AMPLIACIÓN DEL PROYECTO	Plano Nº 11



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS

DOCUMENTO III: PLIEGO DE CONDICIONES

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

Cuevas Cuartero, Borja

TUTORIZADO POR

Orts Grau, Salvador

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Índice

1. Objeto.....	98
2. Condiciones de los materiales.....	99
2.1. Descripción	99
2.1.1. Circuito de potencia	99
2.1.2. Circuito de digital	101
2.2. Control de calidad	101
3. Condiciones de la ejecución	102
3.1. Descripción	102
3.2. Control de calidad	102
4. Pruebas y ajustes finales o de servicio.....	103

1. Objeto

La presente especificación técnica se refiere a un convertidor electrónico de potencia tipo *"Buck"* y *"Boost"* con un funcionamiento de tipo bidireccional, donde solo se puede aplicar uno de los dos tipos dependiendo de la dirección.

En este caso, por tratarse de un proyecto y no de un producto, el cual se pueda vender, solo se va a tratar la descripción tanto de los materiales como de la ejecución, y los controles de calidad.

2. Condiciones de los materiales

En este apartado se van a definir las condiciones y la descripción de los materiales empleados.

2.1. Descripción

Dentro del apartado de descripción se va a diferenciar entre los materiales utilizados para el circuito de electrónica potencia y digital. Pero, la tarjeta de circuito impreso contiene ambos circuitos por ello se explicará previamente.

Tarjeta de circuito impreso:

- Dicha placa contiene pistas de cobre por ambos lados, tanto superior como inferior. Además, utiliza la tecnología de agujeros pasante (Through-hole technology). La cual puede ser comprada directamente.

2.1.1. Circuito de potencia

La unidad del circuito de potencia está compuesta por:

Resistencias

- Resistencias de la serie E24, las cuales tienen un 5 % de tolerancia, de los valores determinados en los planos o equivalente.

MOSFET:

- MOSFET BUK455-500B con una velocidad rápida de conmutación o equivalente o superior a 200 kHz.

Amplificador Operacional:

- Amplificador Operacional TLV2454, con cuatro amplificadores operacionales internos y una alimentación comprendida entre 2,7 V y 6,0 V de alimentación simple CMOS.

Condensadores cerámicos:

- Condensadores cerámicos de baja capacidad, utilizados a las entradas y salidas del sistema, para crear un filtro paso bajo de los valores determinados en los planos o equivalente. También utilizados para evitar caídas de tensión en el regulador de tensión.

Condensadores electrolíticos:

- Los condensadores electrolíticos han sido utilizados como condensadores formando parte del convertidor electrónico de potencia de valores determinados en los planos o equivalente.

Diodos:

- Se han utilizado diodos de la familia 1NXX o equivalentes, estos tienen la función de dirigir la corriente cuando el MOSFET abre el circuito.

Diodo Zener:

- El diodo Zener "DO34Z7" se ha utilizado para tener una tensión de salida equivalente a la de este, con un funcionamiento de 3,3 V.

Bobina:

- La bobina "SFT1030" es la elegida para el correcto funcionamiento del convertidor electrónico de potencia de valor 40 uH.

Regulador de tensión:

- Este regulador sirve para alimentar a los amplificadores, puede ser cualquier regulador de tensión de la familia "78XXS" o equivalente, el funcionamiento es dar tensión a los amplificadores operacionales, con una tensión de 3,3 V.

LED:

- LED de una medida de 5 mm o equivalente, la función de este es avisar que el regulador de tensión está en funcionamiento y por lo tanto los amplificadores operacionales están en funcionamiento.

Terminales de Cable a Placa:

- Este tipo de terminales sirven para conectar cables externos, por ejemplo, los de alimentación y estos terminales van conectados directamente a la tarjeta de circuito impreso.

2.1.2. Circuito de digital

La unidad de circuito digital está compuesta por:

LAUNCHXL – F28027:

- Microcontrolador para lectura de las tensiones, salida ePWM y el control del convertidor electrónico de potencia.

Driver:

- Driver de puerta MOSFET “UCC27201”, este componente es para el funcionamiento del control de los MOSFET con una señal previa PWM.

Conectores macho para PCB:

- Estos conectores sirven para acceder fácilmente a las señales que se van a leer a través del microcontrolador, o señales de control como por ejemplo la PWM.

2.2. Control de calidad

Primero, debería realizarse un control de calidad sobre los materiales del circuito de potencia, en este se debe comprobar con un multímetro el valor de las resistencias, condensadores y bobinas. Se comprueba también la continuidad del MOSFET, diodo, diodo Zener, LED, y de los terminales de conexión a la placa.

En el regulador de tensión y amplificadores operacionales se puede comprobar su correcto funcionamiento en una placa de pruebas (protoboard), realizando circuitos pequeños y, comprobando la tensión de salida con un multímetro.

Después, se puede comprobar la lectura del microcontrolador en una placa de pruebas leyendo tensiones inferiores a 3,3 V para no dañarlo. También se hará uso de un osciloscopio para leer la salida de la señal de modulación de ancho de pulso del microcontrolador y comprobar su correcto funcionamiento.

3. Condiciones de la ejecución

En este apartado se va a realizar una descripción de las condiciones de la ejecución.

3.1. Descripción

Para el montaje o ejecución del convertidor se va a utilizar filamento de estaño para colocar los componentes y soldarlos.

Primeramente, se tendrán que soldar todos los materiales excepto el LAUNCHXL – F28027, la soldadura se realizará calentando la zona de cobre y el componente a la vez, y atravesando la placa, debido a la tecnología de agujeros pasantes. Una vez calentados con un soldador, se procederá a añadir estaño, una vez añadido se retirará el soldador para que se enfríe y el estaño pase a estado sólido.

Para el microcontrolador se realizará las conexiones de “VOLTAJE_LV” con el “ADCIN0” del LAUNCHXL, y la conexión de “CORR_LV” con el “ADCIN3”.

3.2. Control de calidad

El control de calidad a realizar es comprobar la continuidad entre componentes en la misma placa de circuito impreso una vez montada, para verificar que el montaje se ha realizado correctamente. Este control se realiza debido a que durante el montaje se ha podido romper alguna pista de cobre o que haya sido mal diseñada la tarjeta de circuito impreso.

4. Pruebas y ajustes finales o de servicio

En esta prueba se debe conectar una alimentación de tensión correspondiente. Y conectar un osciloscopio en la resistencia de salida del convertidor electrónico de potencia tipo “*Buck*” para poder medir la tensión de salida.

También se debe utilizar un generador de funciones, en modo modulación de ancho de pulso con una amplitud de 3,3 V, que es de la tensión de salida máxima del LAUNCHXL – F28027. Y añadirle una compensación de la mitad de la amplitud para que el mínimo de la tensión de la modulación sea una tensión nula.

A partir de aquí, se debe de variar el ciclo de trabajo del generador de funciones, para así comprobar que la tensión de salida del convertidor se corresponde con el valor del ciclo de trabajo utilizado en el generador de funciones.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS

DOCUMENTO IV: PRESUPUESTO

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

Cuevas Cuartero, Borja

TUTORIZADO POR

Orts Grau, Salvador

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Índice

1. Precios unitarios	108
1.1. Cuadro de materiales	108
1.2. Cuadro de mano de obra	112
2. Precios descompuestos	114
2.1. Anejo de justificación de precios	114
2.2. Cuadro de precios	118
3. Mediciones.....	120
4. Presupuesto de ejecución material	124
5. Resumen de presupuesto	129

1. Precios unitarios

1.1. Cuadro de materiales

Num. Código	Denominación del material	Precio	Cantidad	Total
1 MIC	LAUNCHXL-F28027F es una herramienta de evaluación y desarrollo de bajo coste para la serie F2802x habilitada para InstaSPIN-FOC en el ecosistema LaunchPad de TI MCU que es compatible con varios BoosterPacks enchufables. El LaunchPad proporciona una plataforma estandarizada y fácil de usar para desarrollar su próxima aplicación.	32,030	1,000 ud	32,03
2 PLAC	Tarjeta de Circuito Impreso 100 x 100 mm. Tarjeta de Circuito Impreso, donde se colocan todos los componentes para realizar un correcto funcionamiento del convertidor electrónico de potencia bidireccional.	5,600	1,000 ud	5,60
3 BOB	Bobina SFT1030 de características 40uH 3A 18mOhm THT D15,9x8,5mm. Componente de un circuito eléctrico formado por un hilo conductor aislado y arrollado repetidamente, en forma variable según su uso.	3,300	1,000 ud	3,30
4 MOS	Componente MOSFET, el cual actúa como interruptor del convertidor electrónico de potencia. Es un componente de alta velocidad de conmutación.	1,100	2,000 ud	2,20
5 CON	Estos conectores facilitan la conexión de los cables de la fuente de alimentación con la placa o tarjeta del convertidor electrónico de potencia bidireccional.	1,079	3,000 ud	3,24
6 LIB	Librerías de componentes electrónicos en Simulink	0,996	53,000 h	52,79
7 AO	Amplificador operacional TLV2454. El TLV245x es una familia de amplificadores operacionales de entrada/salida de carril a carril que establece un nuevo punto de rendimiento para corriente de alimentación y rendimiento de CA. Estos dispositivos consumen sólo 23 µA/canal y ofrecen 220 kHz de ancho de banda de ganancia, mucho más que los dispositivos de la competencia con niveles de corriente de alimentación similares. Además del rendimiento de corriente alterna, el amplificador ofrece una gran capacidad de accionamiento de salida, lo que resuelve una deficiencia importante de los de los antiguos amplificadores operacionales de entrada/salida de carril. El TLV245x puede oscilar hasta 250 mV de cada carril de alimentación mientras conduce una carga de 2,5 mA. Tanto las entradas como las salidas oscilan de carril a carril para aumentar el rango dinámico en aplicaciones de bajo voltaje.	0,920	1,000 ud	0,92

Num. Código	Denominación del material	Precio	Cantidad	Total
8 DR	Driver de MOSFET UCC27201. La familia UCC2720x de controladores de MOSFET de canal N de alta frecuencia incluye un diodo de arranque de 120 V y controladores de lado alto y bajo con entradas independientes para una máxima flexibilidad de control. Esto permite el control del MOSFET de canal N en convertidores de medio puente, de puente completo, de dos interruptores hacia adelante y de pinza activa hacia adelante. Los controladores de puerta del lado bajo y del lado alto se controlan de forma independiente y se ajustan a 1 ns entre el encendido y el apagado de cada uno.	0,907	1,000 ud	0,91
9 REGT	Regulador de tensión de la familia 78XX, en concreto 7803 que proporciona una tensión de salida de 3,3 V. Los reguladores lineales de tensión, también llamados reguladores de voltaje, son circuitos integrados diseñados para entregar una tensión constante y estable. Estos dispositivos están presentes en la gran mayoría de fuentes de alimentación, pues proporcionan una estabilidad y protección sin apenas necesidad de componentes externos haciendo que sean muy económicos.	0,880	1,000 ud	0,88
10 Simu	Programa complementario de MATLAB, Simulink para la simulación y obtención de resultados	0,597	53,000 h	31,64
11 CE	Un condensador electrolítico es un tipo de condensador que usa un líquido iónico conductor como una de sus placas. Típicamente con más capacidad por unidad de volumen que otros tipos de condensadores, son valiosos en circuitos eléctricos con relativa alta corriente y baja frecuencia.	0,409	7,000 ud	2,86
12 MAT21a	Licencia del programa MATLAB R2021a	0,398	53,000 h	21,09
13 L	LED utilizado para conocer el funcionamiento del regulador de tensión, en caso de correcto funcionamiento este tiene que encenderse. Esta familia de LED de Kingbright consta de encapsulados de 5 mm (T-1 3/4) de orificio pasante. Disponible en varias opciones de color, estos LED se suministran con tipos de lente difusa o transparente. Estos LED ofrecen un bajo consumo de potencia y una larga vida útil con una carcasa resistente y fiable.	0,390	1,000 ud	0,39
14 CC	El Condensador Cerámico es un componente electrónico pasivo que es capaz de almacenar una carga eléctrica, se comporta como un filtro que bloquea la corriente directa y permite que la corriente alterna fluya sin ningún problema.	0,260	5,000 ud	1,30
15 ORD	Procesador Intel® Core i5 4200M 2,5GHz, Memoria 4 GB, Disco Duro 128GB SSD, Tamaño De Pantalla 14", Resolución Pantalla 1600x900, Salida A Monitor Externo VGA Y Displayport, Conexiones 4x USB 3.0, Ethernet, Audio.	0,250	207,000 h	51,75

Num. Código	Denominación del material	Precio	Cantidad	Total
16 PIN	Pines utilizados para obtener salidas de la parte de potencia del convertidor y poder ser leídas por el microcontrolador. Conectores macho de montaje en PCB son conectores descubiertos con contactos cuadrados de 0,64 mm y altura de contacto 7mm. Disponen de un paso de 2,54 mm y están fabricados de PBT reforzado con fibra de vidrio negro UL94V-0. Los contactos están chapados con estaño puro y brillante. Conectores macho de montaje en PCB RS Pro son una terminación de soldadura de orificio pasante para un uso fácil y permanente. Estos conectores macho de montaje en PCB son excelentes para usar en aplicaciones de placa a placa, WIRE-Wrap o programación.	0,180	8,000 ud	1,44
17 D	Un diodo es un dispositivo semiconductor que actúa esencialmente como un interruptor unidireccional para la corriente. Permite que la corriente fluya en una dirección, pero no permite a la corriente fluir en la dirección opuesta.	0,169	2,000 ud	0,34
18 RES	Resistencias serie E24 con tolerancia del 5% de valores	0,128	21,000 ud	2,69
19 DZ	Diodo Zener de 3,3 V. El diodo Zener es un diodo de silicio fuertemente dopado que se ha construido para que funcione en las zonas de rupturas, recibe ese nombre por su inventor Clarence Melvin Zener. El diodo Zener es la parte esencial de los reguladores de tensión casi constantes con independencia de que se presenten grandes variaciones de la tensión de red, de la resistencia de carga y temperatura.	0,111	2,000 ud	0,22
20 LIC	Este licencia ha sido utilizada para la redacción del Trabajo Final de Grado. Acceder a funcionalidades de asistencia inteligente, además de centenares de plantillas, fotos, iconos y fuentes premium en Word, Excel y PowerPoint. Guardar y compartir archivos y fotos en todos los dispositivos con OneDrive. Disfrutar de protección de seguridad avanzada en OneDrive y Outlook.	0,024	80,000 h	1,92
			Total materiales:	217,51

1.2. Cuadro de mano de obra

Cuadro de mano de obra

Página 1

Num. Código	Denominación de la mano de obra	Precio	Horas	Total
1 MO1	Horas dedicadas a la programación del código o modificación de este.	20,000	35,000 h	700,00
2 MO2	Planteamiento de la metodología y estructura, sin tener en cuenta la programación.	20,000	6,000 h	120,00
3 MO3	Verificación del correcto funcionamiento de todas las partes. Simulación y experimentación y obtención de resultados.	20,000	62,000 h	1.240,00
4 MO4	Parte de entendimiento de conceptos de hojas de datos o características de componentes, toolbox utilizada para la simulación y búsqueda de información.	20,000	24,000 h	480,00
			Total mano de obra:	2.540,00

2. Precios descompuestos

2.1. Anejo de justificación de precios

Anejo de justificación de precios

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
1 Simulación del Emulador de Panel Solar				
1.1	SIM	1	Simulador en Simulink de un convertidor electrónico de potencia de tipo Buck, controlado mediante un parámetro de irradiancia	
	MAT21a	53,000 h	Licencia MATLAB	0,398 21,09
	Simu	53,000 h	Simulink	0,597 31,64
	LIB	53,000 h	Librerías	0,996 52,79
	MO1	10,000 h	Programación	20,000 200,00
	MO2	3,000 h	Diseño	20,000 60,00
	MO3	30,000 h	Pruebas	20,000 600,00
	MO4	10,000 h	Documentación	20,000 200,00
Precio total por 1				1.165,52

Anejo de justificación de precios

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
2 Emulador de panel solar				
1.1	POT	ud	Circuito de potencia del convertidor electrónico de potencia bidireccional	
	RES	21,000 ud	Resistencias	2,69
	MOS	2,000 ud	MOSFET	2,20
	AO	1,000 ud	TLV2454	0,92
	CC	5,000 ud	Condensador cerámico	1,30
	CE	7,000 ud	Condensadores Electrolíticos	2,86
	D	2,000 ud	Diodo	0,34
	DZ	2,000 ud	Diodo Zener	0,22
	BOB	1,000 ud	Bobina SFT1030	3,30
	REGT	1,000 ud	Regulador de Tensión	0,88
	L	1,000 ud	LED	0,39
	CON	3,000 ud	Conector de cable a placa	3,24
	MO2	3,000 h	Diseño	60,00
	MO3	12,000 h	Pruebas	240,00
	MO4	4,000 h	Documentación	80,00
	MAQ1	19,000 h	Generador de Funciones	0,29
	MAQ2	19,000 h	Fuente de alimentación	0,32
	MAQ3	19,000 h	Multímetro	0,02
Precio total por ud				398,97
1.2	DIG	ud	En el circuito digital se obtienen los valores analógicos para el control de la parte de potencia del convertidor electrónico de potencia bidireccional.	
	MIC	1,000 ud	LAUNCHXL - F28027	32,03
	PIN	8,000 ud	Cabezal de pines	1,44
	DR	1,000 ud	Driver de MOSFET	0,91
	MO1	25,000 h	Programación	500,00
	MO3	20,000 h	Pruebas	400,00
	MO4	10,000 h	Documentación	200,00
Precio total por ud				1.134,38
1.3	PCB	ud	Tarjeta de Circuito Impreso.	
	PLAC	1,000 ud	Comprar Tarjeta de Circuito Impreso	5,60
Precio total por ud				5,60

Anejo de justificación de precios

Nº	Código	Ud	Descripción		Total
3 Simulador e Implementación.					
1.4	SimExp	ud	En este apartado se incluye los gastos comunes de la Simulación y del Experimento.		
	ORD	207,000 h	Ordenador Portátil	0,250	51,75
	LIC	80,000 h	Microsoft 365 Personal	0,024	1,92
				Precio total por ud	53,67

2.2. Cuadro de precios nº 1

Cuadro de precios nº 1

Nº	Designación	Importe	
		En cifra (Euro)	En letra (Euro)
1.1	<p>1 Simulación del Emulador de PanelSolar</p> <p>1 Simulador en Simulink de un convertidor electrónico de potencia de tipo Buck, controlado mediante un parámetro de irradiancia</p>	1.165,52	MIL CIENTO SESENTA Y CINCO EUROS CON CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS
2.1	<p>2 Emulador de panel solar</p> <p>ud Circuito de potencia del convertidor electrónico de potencia bidireccional</p>	398,97	TRESCIENTOS NOVENTA Y OCHO EUROS CON NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS
2.2	<p>ud En el circuito digital se obtienen los valores analógicos para el control de la parte de potencia del convertidor electrónico de potencia bidireccional.</p>	1.134,38	MIL CIENTO TREINTA Y CUATRO EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS
2.3	<p>ud Tarjeta de Circuito Impreso.</p>	5,60	CINCO EUROS CON SESENTA CÉNTIMOS
3.1	<p>3 Simulador e Implementación.</p> <p>ud En este apartado se incluye los gastos comunes de la Simulación y del Experimento.</p>	53,67	CINCUENTA Y TRES EUROS CON SESENTA Y SIETE CÉNTIMOS
	<p>Valencia, Junio de 2021</p> <p>Borja Cuevas Cuartero</p>		

3. Mediciones

Presupuesto parcial nº 1 Simulación del Emulador de Panel Solar

Nº	Ud	Descripción	Medición
1.1	1	Simulador en Simulink de un convertidor electrónico de potencia de tipo Buck, controlado mediante un parámetro de irradiancia	
Total 1			1,000

Presupuesto parcial nº 2 Emulador de panel solar

Nº	Ud	Descripción	Medición
2.1	Ud	Circuito de potencia del convertidor electrónico de potencia bidireccional	
			Total ud: 1,000
2.2	Ud	En el circuito digital se obtienen los valores analógicos para el control de la parte de potencia del convertidor electrónico de potencia bidireccional.	
			Total ud: 1,000
2.3	Ud	Tarjeta de Circuito Impreso.	
			Total ud: 1,000

Presupuesto parcial nº 3 Simulador e Implementación.

Nº	Ud	Descripción	Medición
3.1	Ud	En este apartado se incluye los gastos comunes de la Simulación y del Experimento.	
			Total ud: 1,000

Valencia, Junio de 2021

Borja Cuevas Cuartero

4. Presupuesto de ejecución material

Presupuesto parcial nº 1 Simulación del Emulador de Panel Solar

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
1.1	1	Simulador en Simulink de un convertidor electrónico de potencia de tipo Buck, controlado mediante un parámetro de irradiancia			
			Total 1:	1,000	1.165,52
					1.165,52
		Total presupuesto parcial nº 1 Simulación del Emulador de Panel Solar :			1.165,52

Presupuesto parcial nº 2 Emulador de panel solar

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.1	Ud	Circuito de potencia del convertidor electrónico de potencia bidireccional			
		Total ud	1,000	398,97	398,97
2.2	Ud	En el circuito digital se obtienen los valores analógicos para el control de la parte de potencia del convertidor electrónico de potencia bidireccional.			
		Total ud	1,000	1.134,38	1.134,38
2.3	Ud	Tarjeta de Circuito Impreso.			
		Total ud	1,000	5,60	5,60
Total presupuesto parcial nº 2 Emulador de panel solar :					1.538,95

Presupuesto parcial nº 3 Simulador e Implementación.

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
3.1	Ud	En este apartado se incluye los gastos comunes de la Simulación y del Experimento.			
		Total ud	1,000	53,67	53,67
		Total presupuesto parcial nº 3 Simulador e Implementación. :			53,67

Presupuesto de ejecución material

1 Simulación del Emulador de Panel Solar	1.165,52
2 Emulador de panel solar	1.538,95
3 Simulador e Implementación.	53,67
Total	2.758,14

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de **DOS MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y OCHO EUROS CON CATORCE CÉNTIMOS.**

Valencia, Junio de 2021

Borja Cuevas Cuartero

5. Resumen de presupuesto

Resumen de presupuesto

Proyecto: Presupuesto Emulador de Panel Solar y Simulación

Capítulo	Importe	%
Capítulo 1 Simulación del Emulador de Panel Solar.....	1.165,52	42,26
Capítulo 2 Emulador de panel solar.....	1.538,95	55,80
Capítulo 3 Simulador e Implementación.....	53,67	1,95
Presupuesto de ejecución material	2.758,14	
13% de gastos generales.....	358,56	
6% de beneficio industrial.....	165,49	
Suma	3.282,19	
21% IVA.....	689,26	
Presupuesto de ejecución por contrata	3.971,45	
Honorarios de redacción de presupuesto		
Proyecto	4,13% sobre PEM	113,91
IVA	21% sobre honorarios de Proyecto	23,92
	Total honorarios de Proyecto	137,83
Dirección de obra	0,00% sobre PEM	0,00
IVA	21% sobre honorarios de Dirección de obra	0,00
	Total honorarios de Dirección de obra	0,00
	Total honorarios de redacción de presupuesto	137,83
	Total honorarios	137,83
	Total presupuesto general	4.109,28

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de CUATRO MIL CIENTO NUEVE EUROS CONVEINTIOCHO CÉNTIMOS.

Valencia, Junio de 2021

Borja Cuevas Cuartero



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS INSTRUMENTS

DOCUMENTO V: ANEXOS

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

Cuevas Cuartero, Borja

TUTORIZADO POR

Orts Grau, Salvador

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Índice

1. Lista de materiales (Proteus)	136
2. Código LAUNCHXL – F28027	137
3. Simulación del control del convertidor	148

1. Lista de materiales (Proteus)

0 Modules

<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
Sub-totals:				€0,00

11 Capacitors

<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
2	C1-C2	100uF		€0,41
1	C4	1uF		€0,41
5	C5-C8,C12	100nF		€0,26
1	C9	4700uF		€0,41
1	C10	2.2uF		€0,41
1	C11	220uF		€0,41
Sub-totals:				€3,75

21 Resistors

<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
2	R1-R2	0.2		€0,13
6	R3-R4,R6-R7,R10,R12	1k		€0,13
4	R5,R8,R15-R16	2.7k		€0,13
1	R9	22k		€0,13
3	R11,R19-R20	10k		€0,13
2	R13-R14	1.5k		€0,13
2	R17-R18	4.7k		€0,13
1	R21	270		€0,13
Sub-totals:				€2,69

3 Integrated Circuits

<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
1	U1	UCC27201AD		€0,91
1	U2	MCP6042		€0,92
1	U3	L7805CV		€0,88
Sub-totals:				€2,71

2 Transistors

<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
2	Q1-Q2	BUK455		€1,10
Sub-totals:				€2,20

5 Diodes

<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
2	D1-D2	1N5408		€0,17
2	D3-D4	1N4728A		€0,11
1	D5	QED123A4R0		€0,39
Sub-totals:				€0,95

6

Miscellaneous

<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
3	J1-J3	TBLOCK-I2		€1,08
2	J4-J5	25630501RP2	NorComp 25630501RP2	€0,18
1	L2	2300HT-220-H-RC		€3,30
Sub-totals:				€6,90

Totals:

€19,20

2. Código LAUNCHXL – F28027

```
/******  
 * TRABAJO FINAL DE GRADO  
 *  
 * DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DE  
 * PANEL SOLAR MEDIANTE UN CONVERTIDOR BUCK  
 * CONTROLADO MEDIANTE EL DSP F28027 DE TEXAS  
 * INSTRUMENTS  
 *  
 * Borja Cuevas Cuartero  
*****/  
  
//Cabeceras  
#include "DSP28x_Project.h"  
#include "math.h"  
  
// Funciones e interrupciones del programa  
interrupt void adc_isr(void);  
void Adc_Config(void);  
void Init_Gpio(void);  
void Setup_ePWM(void);  
interrupt void scia_rx_isr1(void);  
interrupt void cpu_timer0_isr2(void);  
void Init_Sci(void);  
void Buck(void);  
void Sci_Envia_Caracter(int a);  
void Sci_Envia_Cadena(char *msg);  
  
// Variables Globales  
Uint16 LoopCount = 0;  
Uint16 ConversionCount;  
Uint16 Voltaje_HV[20];  
Uint16 Corriente_LV[20];  
Uint16 Voltaje_LV[20];  
float Corriente_LVR = 0.0;  
float Voltaje_LVR = 0.0;  
float Corriente_1 = 0.0;  
float Voltaje_1 = 0.0;  
Uint16 SciRX_Count;  
char trama_RX[4];  
char *msg;  
int Irradiancia = 0;  
float U = 0.0, e = 0.0, Kp = 0.1, Ki = 1, eacc = 0.0, V_ref_emu = 0.0;  
float Corriente = 1.0;  
unsigned int ciclo_A = 70;  
  
void main(void)  
{  
  
    SciRX_Count = 0; //Se inicia en 0 la variable de interrupciones de comunicación  
  
    InitSysCtrl(); //Inicio básico del control del sistema  
  
    DINT; // Deshabilita interrupciones
```

```

// Inicializa E/S (solo pines SCI-A)
InitSciaGpio(); // DSP2802x_Sci.c

// Inicializa SCI
Init_Sci();

// Inicializa E/S
Init_Gpio();

// Inicializa unidad ePWM
Setup_ePWM();

// Inicializa interrupciones
InitPieCtrl(); // DSP2833x_PieCtrl.c

//Inicia la configuración delADC
Adc_Config();

// Desactiva las interrupciones de la CPU y borrar todos los flags de
interrupción de la CPU
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;

// Inicializar la tabla de vectores PIE con punteros al shell
Interrupción
InitPieVectTable();

EALLOW; // Esto es necesario para escribir en el registro protegido
EALLOW
PieVectTable.ADCINT1 = &adc_isr;
PieVectTable.SCIRXINTA = &scia_rx_isr1; // registra ISR de RX SCI
PieVectTable.TINT0 = &cpu_timer0_isr2; // registra ISR de Timer-0
EDIS; // Esto es necesario para desactivar la escritura en los
registros protegidos por EALLOW

// Inicializa timers
InitCpuTimers();
ConfigCpuTimer(&CpuTimer0,60,500000); // configura Timer-0 a 500 ms

InitAdc(); //Inicializa las variables del ADC para poder usarlos

// Habilitar ADCINT1 en PIE
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx1 = 1; // Habilitar INT 1.1 en la PIE
IER |= M_INT1; // Habilitar la
interrupción de la CPU 1

// Activa interrupcion de RX SCI
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;
PieCtrlRegs.PIEIER9.bit.INTx1 = 1;
IER |= 0x0101;

EINT; // Activar la interrupción global INTM
ERTM; // Activar la interrupción global en tiempo real DBGM

CpuTimer0Regs.TCR.bit.TSS = 0; //Inicia el timer de la interrupció a 0
// Envía mensaje de inicio

```

```

    msg = "\r\n\r\nIniciando programa Control de Buck...\r\n\r\nIntroduzca una
    Irradiancia, numeros del 0 al 1000 y multiples de 100, pero siempre deben
    ser 4 digitos\r\n\r\n0";
    Sci_Envia_Cadena(msg); // Envia la cadena por la comunicaci3n

    ConversionCount = 0; //Variable iniciada a 0

    // Bucle infinito
    for(;;)
    {
        Setup_ePWM(); //Actualizaci3n de la variable del PWM
    }
}

// Interrupci3n del adc
interrupt void adc_isr(void){
    int i;

    Corriente_LV[ConversionCount] = AdcResult.ADCRESULT2; // Lectura de
    corriente en ADCIN3
    Voltaje_LV[ConversionCount] = AdcResult.ADCRESULT3; // Lectura de
    tensi3n en ADCIN0

    //Reinicio de las variables para recalcularlas
    Corriente_LVR = 0;
    Voltaje_LVR = 0;
    Voltaje_1 = 0;
    Corriente_1 = 0;

    for(i = 0; i < 20; i++){ //Bucle para hacer un promediado del vector
    de datos obtenido
        Corriente_1 = Corriente_1 + Corriente_LV[i];
        Voltaje_1 = Voltaje_1 + Voltaje_LV[i];
    }

    Voltaje_LVR = ((Voltaje_1/20)/4095.0)*7.8*3.3*1.14; // Ajuste de
    la tensi3n promediada con los factores de relaci3n de resistencias

    Corriente_LVR = ((Corriente_1/20)/4095.0)*3.3*5; // Ajuste de la
    corriente promediada con los factores de relaci3n de resistencias

    // Bucle para aumentar la variable que recorre el vector de
    acumulaci3n de datos
    if(ConversionCount == 19){
        ConversionCount = 0;
    }
    else ConversionCount++;

    AdcRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1; // Borrar el flag ADCINT1
    reiniciar para el siguiente SOC
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; // Reconoce interrupci3n

    return;
}

```

```

//Configuración del ADC
void Adc_Config(void){

    EALLOW; // Esto es necesario para escribir en el registro protegido
EALLOW
    AdcRegs.ADCCTL1.bit.INTPULSEPOS = 1; //ADCINT1 se dispara después
del latch de AdcResults
    AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1E = 1; //Activado ADCINT1
    AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1CONT = 0; //Desactivar el modo
continuo de ADCINT1
    AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1SEL = 2; //configuración EOC2 para
que dispare ADCINT1

    AdcRegs.ADCSOC0CTL.bit.CHSEL = 1; //ajustar la selección del
canal SOC0 a ADCINA1
    AdcRegs.ADCSOC2CTL.bit.CHSEL = 3; //ajustar la selección del
canal SOC2 a ADCINA3
    AdcRegs.ADCSOC3CTL.bit.CHSEL = 0; //ajustar la selección del
canal SOC3 a ADCINA0

    AdcRegs.ADCSOC0CTL.bit.TRIGSEL = 7; //establece el disparo de
inicio del SOC0 en el EPWM2A, debido a que el SOC0 se convierte primero y
luego el SOC1
    AdcRegs.ADCSOC2CTL.bit.TRIGSEL = 7; //establece el disparo de
inicio del SOC2 en el EPWM2A, debido a que el SOC0 se convierte primero y
luego el SOC1
    AdcRegs.ADCSOC3CTL.bit.TRIGSEL = 7; //establece el disparo de
inicio del SOC3 en el EPWM2A, debido a que el SOC0 se convierte primero y
luego el SOC1

    AdcRegs.ADCSOC0CTL.bit.ACQPS = 6; //ajuste la ventana SOC1 S/H
a 7 ciclos de reloj ADC, (6 ACQPS más 1)
    AdcRegs.ADCSOC2CTL.bit.ACQPS = 6; //ajuste la ventana SOC1 S/H
a 7 ciclos de reloj ADC, (6 ACQPS más 1)
    AdcRegs.ADCSOC3CTL.bit.ACQPS = 6; //ajuste la ventana SOC1 S/H
a 7 ciclos de reloj ADC, (6 ACQPS más 1)
    EDIS; // Esto es necesario para desactivar la escritura en los
registros protegidos por EALLOW

    // Asume que el reloj ePWM2 ya está habilitado en InitSysCtrl();
    EPwm2Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 1; // Habilitar el SOC en el
grupo A
    EPwm2Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = 4; // Seleccione el SOC de la
CPMA en el recuento
    EPwm2Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = 1; // Genera el pulso en el
primer evento
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 0x0080; // Establecer el valor de
comparación A
    EPwm2Regs.TBPRD = 0xFFFF; // Fijar periodo para ePWM2
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 0; // cuenta atrás y comienza
}

// Inicializa E/S
void Init_Gpio(void){

    EALLOW;// Esto es necesario para escribir en el registro protegido
EALLOW

```



```

    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO0 = 1; // GPIO0 --> salida (LED 0 en
LaunchPad)
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO1 = 1; // GPIO1 --> salida (LED 1 en
LaunchPad)
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO2 = 1; // GPIO2 --> salida (LED 2 en
LaunchPad)
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO3 = 1; // GPIO3 --> salida (LED 3 en
LaunchPad)
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1; // ePWM1A --> salida (GPIO0)
EDIS; // Esto es necesario para desactivar la escritura en los
registros protegidos por EALLOW

    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO0 = 1; // Apaga LED 0
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO1 = 1; // Apaga LED 1
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO2 = 1; // Apaga LED 2
    GpioDataRegs.GPASET.bit.GPIO3 = 1; // Apaga LED 3
}

// Inicializa unidad ePWM
void Setup_ePWM(void){

    // Configura ePWM1
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0; // CLKDIV = 1
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 1; // HSPCLKDIV = 2
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2; // modo up-down
    EPwm1Regs.AQCTLA.all = 0x0060;
    EPwm1Regs.TBPRD = 75;
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPwm1Regs.TBPRD*((100.0-ciclo_A)/100.0);
// ciclo de trabajo controlado por variable de ciclo_A
}

// Inicializa el modulo SCI
void Init_Sci(void){

    // Configura el SCI
    SciaRegs.SCICCR.all = 0x0007; // 1 bit stop bit, loopback off
// sin paridad,
8 bits // modo async,
sin protocolo
    SciaRegs.SCICTL1.all = 0x0003; // activa TX, RX, SCICLK interno,
// desactiva
RXERR, SLEEP, TXWAKE
    SciaRegs.SCICTL2.all = 0x0003; // habilita ints RXRDY y TXRDY

    // LSPCLK
    // BRR = ----- - 1
    // 8 x BAUDRATE

    #if (CPU_FRQ_60MHZ)
    SciaRegs.SCIHBAUD = 0x0000; // 9600 baud @LSPCLK = 15MHz (60 MHz
SYSCLK)
    SciaRegs.SCILBAUD = 0x00C2;
    #elif (CPU_FRQ_50MHZ)
    SciaRegs.SCIHBAUD = 0x0000; // 9600 baud @LSPCLK = 12.5 MHz (50 MHz
SYSCLK)

```

```

SciaRegs.SCI_LBAUD = 0x00A1;
#elif (CPU_FRQ_40MHZ)
SciaRegs.SCI_HBAUD = 0x0000; // 9600 baud @LSPCLK = 10MHz (40 MHz
SYSCLK)
SciaRegs.SCI_LBAUD = 0x0081;
#endif

// Configura cola e interrupciones
SciaRegs.SCIFFTX.bit.SCIFFENA = 1; // habilita la cola
SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFIENA = 1; // habilita la interrupcion de
recepcion
SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFIL = 4; // interrumpe cuando haya 4
caracteres en cola

// Saca el SCI del reset
SciaRegs.SCICTL1.all = 0x0023;
}

// ISR de recepcion del SCI
interrupt void scia_rx_isr1(void){

// Incrementa contador de interrupciones
SciRX_Count++;

// Lee y almacena la trama recibida
trama_RX[0] = SciaRegs.SCIRXBUF.all;
trama_RX[1] = SciaRegs.SCIRXBUF.all;
trama_RX[2] = SciaRegs.SCIRXBUF.all;
trama_RX[3] = SciaRegs.SCIRXBUF.all;

// Interpreta contenido de la trama, los dos ultimos valores siempre
son 0
if(trama_RX[2]!='0' && trama_RX[3]!='0')
{
    switch (trama_RX[0]) { //Comprueba si es 1000 o no
        case '0': // ORDEN: 1
            switch (trama_RX[1]) { //Comprueba que número es el
correspondiente de la segunda cifra sabiendo que la primera es 0
                case '0':
                    msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia = 0\r\n0";
                    Sci_Envia_Cadena(msg);
                    Irradiancia = 0;
                    break;
                case '1':
                    msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
100\r\n0";
                    Sci_Envia_Cadena(msg);
                    Irradiancia = 100;
                    break;
                case '2':
                    msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
200\r\n0";
                    Sci_Envia_Cadena(msg);
                    Irradiancia = 200;
                    break;
                case '3':
                    msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
300\r\n0";

```

```

        Sci_Envia_Cadena(msg);
        Irradiancia = 300;
        break;
    case '4':
        msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
400\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
        Irradiancia = 400;
        break;
    case '5':
        msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
500\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
        Irradiancia = 500;
        break;
    case '6':
        msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
600\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
        Irradiancia = 600;
        break;
    case '7':
        msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
700\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
        Irradiancia = 700;
        break;
    case '8':
        msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
800\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
        Irradiancia = 800;
        break;
    case '9':
        msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia =
900\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
        Irradiancia = 900;
        break;
    default: // ORDEN: no reconocida
        msg = "\r\nIrradiancia no valida\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
        break;
    }
    break;

case '1': // ORDEN: 2
    if(trama_RX[1]=='0')
    {
        msg = "\r\nOrden Recibida: Irradiancia = 1000\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
        Irradiancia = 1000;
    }
    else
    {
        msg = "\r\nIrradiancia no valida, es superior a lo
permitido\r\n\r\n";
        Sci_Envia_Cadena(msg);
    }
}

```

```

        break;

        default: // ORDEN: no reconocida
            msg = "\r\nIrradiancia no valida\r\n\0";
            Sci_Envia_Cadena(msg);
            break;
    }
}
else
{
    msg = "\r\nIrradiancia no valida\r\n\0"; // ORDEN: no reconocida
    Sci_Envia_Cadena(msg);
}

// Borra flags y reconoce interrupcion
SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFOVRCLR = 1; // borra flag de overflow
SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFINTCLR = 1; // borra flag de interrupcion
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP9; // ack PIE
}

//Control de la tensión de referencia en función del parametro de corriente
leido
void Buck(void){

    switch (Irradiancia) {
        case 0:
            V_ref_emu = 0;
            break;
        case 100:
            V_ref_emu = 2.006666182921877e+08* powf(Corriente_LVR, 7) -
1.250691907399599e+08* powf(Corriente_LVR, 6) + 2.959234547975924e+07*
powf(Corriente_LVR, 5) -3.361734736818277e+06* powf(Corriente_LVR, 4) +
1.889771342640495e+05* powf(Corriente_LVR, 3) -4.870051253380151e+03*
powf(Corriente_LVR, 2) +\
                37.227618862072010*Corriente_LVR +
21.641336468052380;
            break;
        case 200:
            V_ref_emu = -8.900188510975896e+08* powf(Corriente_LVR, 10) +
1.724927956311757e+09* powf(Corriente_LVR, 9) -1.412389260848357e+09*
powf(Corriente_LVR, 8) + 6.369369238085208e+08* powf(Corriente_LVR, 7) -
1.729445354591724e+08* powf(Corriente_LVR, 6) +\
                2.902931198407684e+07* powf(Corriente_LVR, 5) -
2.974913163360118e+06* powf(Corriente_LVR, 4) + 1.768579146175621e+05*
powf(Corriente_LVR, 3) -5.480098496657130e+03* powf(Corriente_LVR, 2) +
66.410768912973500*Corriente_LVR + 22.203333785658560;
            break;
        case 300:
            V_ref_emu = -1.400671673368634e+07* powf(Corriente_LVR, 10) +
4.013961609621852e+07* powf(Corriente_LVR, 9) -4.846841551372761e+07*
powf(Corriente_LVR, 8) + 3.212354296758564e+07* powf(Corriente_LVR, 7) -
1.276268430071060e+07* powf(Corriente_LVR, 6) +\
                3.116002432184494e+06* powf(Corriente_LVR, 5) -
4.605359423570617e+05* powf(Corriente_LVR, 4) + 3.896038057681324e+04*
powf(Corriente_LVR, 3) -1.677381006355226e+03* powf(Corriente_LVR, 2) +
25.432664992986524*Corriente_LVR + 22.727911135400330;

```

```

        break;
    case 400:
        V_ref_emu = -8.130526625769403e+05* powf(Corriente_LVR, 10) +
        3.108558606806941e+06* powf(Corriente_LVR, 9) -5.014452106946026e+06*
        powf(Corriente_LVR, 8) + 4.449251002271941e+06* powf(Corriente_LVR, 7) -
        2.374798847618146e+06* powf(Corriente_LVR, 6) +\
        7.837013703526915e+05* powf(Corriente_LVR, 5) -
        1.583428406436682e+05* powf(Corriente_LVR, 4) + 1.873712046223441e+04*
        powf(Corriente_LVR, 3) -1.188957095738352e+03* powf(Corriente_LVR, 2) +
        31.933012051239757*Corriente_LVR + 22.781695892941006;
        break;
    case 500:
        V_ref_emu = -8.470807346819490e+04* powf(Corriente_LVR, 10) +
        4.016180564589928e+05* powf(Corriente_LVR, 9) -8.017276257006022e+05*
        powf(Corriente_LVR, 8) + 8.776651802670723e+05* powf(Corriente_LVR, 7) -
        5.753383322367644e+05* powf(Corriente_LVR, 6) +\
        2.314924922963719e+05* powf(Corriente_LVR, 5) -
        5.632366387588046e+04* powf(Corriente_LVR, 4) + 7.843475898361738e+03*
        powf(Corriente_LVR, 3) -5.584616990571366e+02*powf(Corriente_LVR, 2) +
        14.091113494065032*Corriente_LVR + 23.218941072587203;
        break;
    case 600:
        V_ref_emu = -1.386159462711585e+04* powf(Corriente_LVR, 10) +
        7.886973092525502e+04* powf(Corriente_LVR, 9) -1.890906945776171e+05*
        powf(Corriente_LVR, 8) + 2.489196804432670e+05* powf(Corriente_LVR, 7) -
        1.966228237156837e+05* powf(Corriente_LVR, 6) +\
        9.566914279528504e+04* powf(Corriente_LVR, 5) -
        2.833377816317041e+04* powf(Corriente_LVR, 4) + 4.867381997557746e+03*
        powf(Corriente_LVR, 3) -4.408439863922953e+02* powf(Corriente_LVR, 2) +
        15.846570520280455*Corriente_LVR + 23.289677035218560;
        break;
    case 700:
        V_ref_emu = -2.887485805383917e+03* powf(Corriente_LVR, 10) +
        1.904694232864399e+04* powf(Corriente_LVR, 9) -5.285664846157705e+04*
        powf(Corriente_LVR, 8) + 8.035162477786579e+04* powf(Corriente_LVR, 7) -
        7.303771109943741e+04* powf(Corriente_LVR, 6) +\
        4.066366197629285e+04* powf(Corriente_LVR, 5) -
        1.364616545723193e+04* powf(Corriente_LVR, 4) + 2.607080418937165e+03*
        powf(Corriente_LVR, 3) -2.521845169049246e+02* powf(Corriente_LVR, 2) +
        8.096221645115335*Corriente_LVR + 23.579725745227690;
        break;
    case 800:
        V_ref_emu = -765.9423530765459* powf(Corriente_LVR, 10) +
        5772.546591950217* powf(Corriente_LVR, 9) -18313.26505225137*
        powf(Corriente_LVR, 8) + 31857.66815318495* powf(Corriente_LVR, 7) -
        33193.56765514308* powf(Corriente_LVR, 6) +\
        21247.74991529476* powf(Corriente_LVR, 5) -
        8245.589215450853* powf(Corriente_LVR, 4) + 1843.888158149701*
        powf(Corriente_LVR, 3) -214.9412438289620* powf(Corriente_LVR, 2) +
        9.386341582056026*Corriente_LVR + 23.628672521596100;
        break;
    case 900:
        V_ref_emu = -233.8644697259632* powf(Corriente_LVR,10) +
        1976.339576598445* powf(Corriente_LVR,9) -7026.476566461904*
        powf(Corriente_LVR,8) + 13687.41880649539* powf(Corriente_LVR,7) -
        15951.79177495039* powf(Corriente_LVR,6) +\
        11401.97574425555* powf(Corriente_LVR,5) -
        4927.303883015501* powf(Corriente_LVR,4) + 1221.044409415450*

```

```

powf(Corriente_LVR,3) -156.2419540250842* powf(Corriente_LVR,2) +
7.125812482810883*Corriente_LVR + 23.778040423393364;
    break;
    case 1000:
        V_ref_emu = -81.683178783777730* powf(Corriente_LVR, 10) +
765.7054694437912* powf(Corriente_LVR, 9) -3019.725406292003*
powf(Corriente_LVR, 8) +6525.452032256178* powf(Corriente_LVR, 7) +\
-8438.321701337256* powf(Corriente_LVR, 6) +
6696.247312575527*powf(Corriente_LVR, 5) -
3217.044829229756*powf(Corriente_LVR, 4) +
889.2908797847714*powf(Corriente_LVR, 3) -
128.1134504466428*powf(Corriente_LVR, 2) +\
        6.793363969093774*Corriente_LVR + 23.854365909851320;

        break;
    }
    // Cálculo del error, error acumulado y la acción de control
    e = V_ref_emu - Voltaje_LVR;
    eacc = eacc + e;
    U = Kp*e + Ki*eacc;

    if(U>98) //Limitación de la PWM a 99 sin que pueda subir más
    {
        U=99;
        eacc = eacc + e;
    }
    else if(U<1)
    {
        U = 0; //Limitación de la PWM a 0 sin que pueda bajar más
        eacc = eacc - e;
    }
    ciclo_A = U; //Acción de control es la PWM
}

interrupt void cpu_timer0_isr2(void)
{
    CpuTimer0.InterruptCount++; //Aumenta la variable del timer de la
interrupcion
    LoopCount++; //Aumenta la variable loop cada 500ms
    Buck(); //Se ejecuta el bucle de control cada 500ms
    if(LoopCount==10) //Reinicia las variables para no llegar a un límite
    {
        CpuTimer0.InterruptCount = 0; // Reiniciamos el contador de la
interrupción para volver a contar las interrupciones desde 0
        LoopCount = 0; // Reiniciamos el contador de loop para saber si el
sistema sigue funcionando
    }

    // Reconoce interrupcion
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}

void Sci_Envia_Caracter(int a){
    while (SciaRegs.SCIFFTX.bit.TXFFST != 0) {}
    SciaRegs.SCITXBUF = a;
}

// Envia una cadena de caracteres por el SCI
void Sci_Envia_Cadena(char * msg){

```

```
int i;  
i = 0;  
while (msg[i] != '\0')  
{  
    Sci_Envia_Character(msg[i]);  
    i++;  
}  
}
```

3. Simulación del control del convertidor

```
function V_ref_emu = CTRLBUCK(W,Corriente)
    if W == 1000
        V_ref_emu = -81.683178783777730*Corriente^10
+ 7.657054694437912e+02*Corriente^9 -
3.019725406292003e+03*Corriente^8 +
6.525452032256178e+03*Corriente^7 -
8.438321701337256e+03*Corriente^6 +
6.696247312575527e+03*Corriente^5 -
3.217044829229756e+03*Corriente^4 +
8.892908797847714e+02*Corriente^3 -
1.281134504466428e+02*Corriente^2 +
6.793363969093774*Corriente + 23.854365909851320;
    elseif W == 900
        V_ref_emu = -
2.338644697259632e+02*Corriente^10 +
1.976339576598445e+03*Corriente^9 -
7.026476566461904e+03*Corriente^8 +
1.368741880649539e+04*Corriente^7 -
1.595179177495039e+04*Corriente^6 +
1.140197574425555e+04*Corriente^5 -
4.927303883015501e+03*Corriente^4 +
1.221044409415450e+03*Corriente^3 -
1.562419540250842e+02*Corriente^2 +
7.125812482810883*Corriente + 23.778040423393364;
    elseif W == 800
        V_ref_emu = -
7.659423530765459e+02*Corriente^10 +
5.772546591950217e+03*Corriente^9 -
1.831326505225137e+04*Corriente^8 +
3.185766815318495e+04*Corriente^7 -
3.319356765514308e+04*Corriente^6 +
2.124774991529476e+04*Corriente^5 -
8.245589215450853e+03*Corriente^4 +
1.843888158149701e+03*Corriente^3 -
2.149412438289620e+02*Corriente^2 +
9.386341582056026*Corriente + 23.628672521596100;
    elseif W == 750
        V_ref_emu = 114.8815919096*Corriente^6 -
497.4055065728*Corriente^5 +
781.3454864781*Corriente^4 -
554.9352424022*Corriente^3 +
175.3204359967*Corriente^2 - 21.5233531759*Corriente
+ 24.0462700848;
    elseif W == 700
```



```

    V_ref_emu = -
2.887485805383917e+03*Corriente^10 +
1.904694232864399e+04*Corriente^9 -
5.285664846157705e+04*Corriente^8 +
8.035162477786579e+04*Corriente^7 -
7.303771109943741e+04*Corriente^6 +
4.066366197629285e+04*Corriente^5 -
1.364616545723193e+04*Corriente^4 +
2.607080418937165e+03*Corriente^3 -
2.521845169049246e+02*Corriente^2 +
8.096221645115335*Corriente + 23.579725745227690;
    elseif W == 600
        V_ref_emu = -
1.386159462711585e+04*Corriente^10 +
7.886973092525502e+04*Corriente^9 -
1.890906945776171e+05*Corriente^8 +
2.489196804432670e+05*Corriente^7 -
1.966228237156837e+05*Corriente^6 +
9.566914279528504e+04*Corriente^5 -
2.833377816317041e+04*Corriente^4 +
4.867381997557746e+03*Corriente^3 -
4.408439863922953e+02*Corriente^2 +
15.846570520280455*Corriente + 23.289677035218560;
    elseif W == 500
        V_ref_emu = -
8.470807346819490e+04*Corriente^10 +
4.016180564589928e+05*Corriente^9 -
8.017276257006022e+05*Corriente^8 +
8.776651802670723e+05*Corriente^7 -
5.753383322367644e+05*Corriente^6 +
2.314924922963719e+05*Corriente^5 -
5.632366387588046e+04*Corriente^4 +
7.843475898361738e+03*Corriente^3 -
5.584616990571366e+02*Corriente^2 +
14.091113494065032*Corriente + 23.218941072587203;
    elseif W == 400
        V_ref_emu = -
8.130526625769403e+05*Corriente^10 +
3.108558606806941e+06*Corriente^9 -
5.014452106946026e+06*Corriente^8 +
4.449251002271941e+06*Corriente^7 -
2.374798847618146e+06*Corriente^6 +
7.837013703526915e+05*Corriente^5 -
1.583428406436682e+05*Corriente^4 +
1.873712046223441e+04*Corriente^3 -
1.188957095738352e+03*Corriente^2 +
31.933012051239757*Corriente + 22.781695892941006;

```

```

elseif W ==300
    V_ref_emu = -
1.400671673368634e+07*Corriente^10 +
4.013961609621852e+07*Corriente^9 -
4.846841551372761e+07*Corriente^8 +
3.212354296758564e+07*Corriente^7 -
1.276268430071060e+07*Corriente^6 +
3.116002432184494e+06*Corriente^5 -
4.605359423570617e+05*Corriente^4 +
3.896038057681324e+04*Corriente^3 -
1.677381006355226e+03*Corriente^2 +
25.432664992986524*Corriente + 22.727911135400330;
elseif W == 250
    V_ref_emu = 89663.0361778736*Corriente^6 -
131731.1413967920*Corriente^5 +
70494.9045677912*Corriente^4 -
17083.3886341796*Corriente^3 +
1840.5843001404*Corriente^2 - 74.7785138408*Corriente
+ 23.0386119463;
elseif W == 200
    V_ref_emu = -
8.900188510975896e+08*Corriente^10 +
1.724927956311757e+09*Corriente^9 -
1.412389260848357e+09*Corriente^8 +
6.369369238085208e+08*Corriente^7 -
1.729445354591724e+08*Corriente^6 +
2.902931198407684e+07*Corriente^5 -
2.974913163360118e+06*Corriente^4 +
1.768579146175621e+05*Corriente^3 -
5.480098496657130e+03*Corriente^2 +
66.410768912973500*Corriente + 22.203333785658560;
elseif W == 100
    V_ref_emu = 2.006666182921877e+08*Corriente^7
-1.250691907399599e+08*Corriente^6 +
2.959234547975924e+07*Corriente^5 -
3.361734736818277e+06*Corriente^4 +
1.889771342640495e+05*Corriente^3 -
4.870051253380151e+03*Corriente^2 +
37.227618862072010*Corriente + 21.641336468052380;
else
    V_ref_emu = 0;
end
end
end

```