

Proyecto Fin de Máster
Máster en microelectrónica, automática y robótica

Técnica de control Rapid Control Prototyping
aplicada a un convertidor DC-DC topología BOOST
para aplicaciones HIL

Autor: Alvaro Padiál Moreno

Tutor: Eduardo Galván Díez

Dpto. Tecnología Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería de Telecomunicación

**Técnica de control Rapid Control Prototyping
aplicada a un convertidor DC-DC topología
BOOST para aplicaciones HIL**

Autor:

Alvaro Padial Moreno

Tutor:

Eduardo Galván Díez

Profesor titular

Dpto. de Tecnología Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Técnica de control Rapid Control Prototyping aplicada a un convertidor DC-DC
topología BOOST para aplicaciones HIL

Autor: Alvaro Padial Moreno

Tutor: Eduardo Galván Díez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Gracias a mi familia por su paciencia y su comprensión, siempre a mi lado en un proceso duro. Ellos me vieron meses y meses sentado frente a un ordenador aprendiendo mil maneras de como no hacer las cosas. Por comprender esto y mucho más, gracias. Gracias a mis jefes y compañeros de equipo de trabajo. Ahora que lo terminé se lo dedico porque es suyo.

Alvaro Padial Moreno

Sevilla, 2019

Resumen

El presente proyecto versa sobre el estudio y aplicación de técnicas de Rapid Control Prototype para un convertidor de potencia DC-DC, con topología de elevador (BOOST), para aplicaciones de “Hardware In the Loop”. Se tratan disciplinas como control automático, comunicaciones industriales, programación de microcontroladores, electrónica analógica e instrumentación, y puesta en marcha de sistemas. Todo el conocimiento está relacionado para la obtención final de una aplicación que permite validar diferentes técnicas de control, de manera rápida y fiable, dependiendo de la aplicación sobre un convertidor de potencia. Los valores añadidos que aporta el proyecto son la reducción en tiempo y coste que implica la implementación de este tipo de validación de algoritmos de control en sistemas reales.

El documento se divide en dos partes. En la primera parte se estudia las ventajas y desventajas de la aplicación del Rapid Control Prototype, y el modelado de la aplicación sobre la que se va a realizar el ejemplo de aplicación. Herramientas como Simulink-MATLAB son empleadas para el estudio de simulación de la aplicación. En la segunda parte, relacionada con una parte más práctica del estudio, se analiza la bancada física sobre la que se va a implementar el proyecto y posterior ejecución de las diferentes pruebas realizadas. Finalmente se realizará un breve resumen con las conclusiones obtenidas tras la realización del estudio.

Abstract

This project deals with the study and application of Rapid Control Prototype techniques for a DC-DC power converter, with elevator topology (BOOST), for “Hardware In the Loop” applications. Disciplines such as automatic control, industrial communications, microcontroller programming, analog electronics and instrumentation, and system commissioning are dealt with. All knowledge is related to the final obtaining of an application that allows to validate different control techniques, in a fast and reliable way, depending on the application on a power converter. The added values provided by the project are the reduction in time and cost involved in the implementation of this type of validation of something of control in real systems.

The document can be divided into two parts. The first part studies the advantages and disadvantages of the Rapid Control Prototype application, and the study and modeling of the application on which the application example is to be made. Tools such as Simulink-MATLAB are used for this simulation study of the application. In the second part, related to a more practical part of the study, the physical bench on which the project is going to be implemented and subsequence execution of the different tests carried out is analysed. Finally, a brief summary will be made with the conclusions obtained after carrying out the study.

Agradecimientos	vi
Resumen	viii
Abstract	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
Notación	xviii
1 Introducción	1
1.1. <i>Objetivo</i>	1
1.2. <i>Estudio del estado del arte</i>	1
2 Rapid Control Prototyping	3
3 Análisis de la aplicación	5
3.1. <i>Topología</i>	5
3.2. <i>Estudio del circuito</i>	5
3.2.1. <i>Modo continuo</i>	6
3.2.2. <i>Límite entre la conducción continua y discontinua</i>	8
3.2.3. <i>Modo discontinuo</i>	8
3.3. <i>Análisis de la aplicación</i>	10
3.3.1. <i>Algoritmo perturbar y observar</i>	12
3.3.2. <i>Algoritmo conductancia incremental</i>	13
3.4. <i>Especificaciones técnicas de la aplicación</i>	15
4 Modelado de la aplicación	11
4.1 <i>Topología</i>	11
4.2 <i>Control</i>	12
4.3 <i>Monitorización</i>	12
4.4 <i>Resultados</i>	13
5 Bancada de pruebas de la aplicación	16
5.1 <i>Presentación de la bancada</i>	16
5.2 <i>Placa de evaluación LAUNCHXL-F28377S</i>	19
5.2.1 <i>Recursos del sistema</i>	20
5.2.2 <i>Pineado</i>	22
5.3 <i>MATLAB Coder, Simulink Coder y Embedded Coder</i>	24
5.4 <i>Fuente de tensión AMREL SPS800-18</i>	24
5.5 <i>Fuente de tensión AEMETEC MX45</i>	25
5.6 <i>Emulador de paneles Keysight Technologies E4360A</i>	25
6 Implementación de la aplicación	27
6.1 <i>Modelado del sistema</i>	27
6.1.1 <i>Bloque de adaptación y filtrado de señales analógicas</i>	28
6.1.2 <i>Bloque de señales de comunicación</i>	29

6.1.3	Bloque de control	31
6.2	<i>Técnicas de control</i>	31
6.2.1	PI gestión de Corriente	32
6.2.2	MPPT P&O	33
6.2.3	MPPT CI	36
6.3	<i>HMI</i>	37
7	Resultados	42
7.1	<i>PI gestión de Corriente</i>	42
7.2	<i>MPPT P&O</i>	45
7.3	<i>MPPT CI</i>	47
8	Análisis del proyecto	51
8.1	<i>Factores clave a tener en cuenta</i>	51
8.1.1	Estudio de Rapid Control Prototyping	51
8.1.2	Aplicación en bancada	51
8.2	<i>Problemas encontrados</i>	51
8.3	<i>Conclusiones y futuras mejoras</i>	51
8.4	<i>Enriquecimiento personal</i>	52
8.5	<i>Próximos pasos</i>	52
	Referencias	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Especificaciones técnicas del convertidor DC-DC para la aplicación.	16
Tabla 2.- Características principales de la placa de evaluación LAUNCHXL-F28377S.	20
Tabla 4.- Relación de entradas analógicas para la aplicación final.	23
Tabla 5.- Relación de entradas digitales para la aplicación final.	23
Tabla 6.- Relación de salidas digitales para la aplicación final.	23
Tabla 7.- Relación de salidas digitales ePWM para la aplicación final.	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1.- Esquema básico de convertidor DCDC topología Boost.	5
Ilustración 2.- Estado ON del convertidor.	6
Ilustración 3.- Estado OFF del convertidor.	6
Ilustración 4.- Modo de conducción contínuo: (a) interruptor on; (b) interruptor (off).	7
Ilustración 5.- Representación de tensión y corriente en el borde de conducción continua.	8
Ilustración 6.- Relación, a V_o constante, de la corriente del inductor en función del duty D.	8
Ilustración 7.- Modo de conducción de corriente discontinuo para un período de conducción T_s .	9
Ilustración 8.- Característica del convertidor elevador manteniendo constante V_o .	10
Ilustración 9.- Detalle del convertidor DCDC conectado en paralelo a panel fotovoltaico y bus DC.	11
Ilustración 10.- Curvas de máxima extracción de potencia para un panel fotovoltaico.	11
Ilustración 11.- Diagrama de flujo del método P&O.	13
Ilustración 12.- Consecuencia en la evolución de la potencia del convertidor por la aplicación del algoritmo P&O.	13
Ilustración 13.- Consecuencia de la evolución de la potencia del convertidor por la aplicación del algoritmo Conductancia Incremental.	14
Ilustración 14.- Diagrama de flujo del método denominado Conductancia Incremental.	14
Ilustración 15.- Esquema del convertidor con los valores definidos para cada componente.	11
Ilustración 16.- Modelado del convertidor DCDC en Simulink.	11
Ilustración 17.- Diagrama de bloques de control empleado en el modelo de Simulink.	12
Ilustración 18.- Diagrama de bloques de monitorización empleado en el modelo de Simulink.	12
Ilustración 19.- Detalle de los principales parámetros del sistema predefinidos en el fichero script.	13
Ilustración 20.- Valores RMS de tensión e intensidad del semiconductor durante el tiempo de simulación.	14
Ilustración 21.- Representación de la tensión, corriente, potencia y radiancia características del panel durante la simulación realizada.	14
Ilustración 22.- Formas de onda de tensión de paneles y de la tensión obtenida como referencia del MPPT.	15
Ilustración 23.- Esquema de conexionado de los diferentes elementos que conforman la bancada.	16
Ilustración 24.- Detalle del conexionado de potencia de la bancada.	17
Ilustración 25.- Detalle del conexionado de control y comunicación de la bancada.	18
Ilustración 26.- Detalle de la bancada del convertidor DCDC con topología BOOST.	19
Ilustración 27.- Detalle del aspecto físico que presenta la placa LAUNCHXL-F28377S de Texas Instruments.	20

Ilustración 28.- Representación de la fuente de alimentación SPS800-18, fabricante AMREL.	25
Ilustración 29.- Representación de la fuente de alimentación MX45, fabricante California Instruments.	25
Ilustración 30.- Representación del emulador de paneles E4360A, fabricante Keysight Technologies.	26
Ilustración 31.- Diagrama de bloques general del sistema de gestión de control.	27
Ilustración 32.- Bloque de gestión de la subrutina de interrupción.	28
Ilustración 33.- Bloque de gestión de entradas analógicas, y entradas y salidas digitales.	29
Ilustración 34.- Bloque de gestión de entradas y salidas de señales de comunicación.	30
Ilustración 35.- Bloques de gestión de control de la aplicación.	31
Ilustración 36.- Declaración de la función “PI_Corriente”.	32
Ilustración 37.- Declaración e inicialización de variables de la función “PI_Corriente”.	32
Ilustración 38.- Algoritmo de control de la función “PI_Corriente”.	33
Ilustración 39.- Declaración de la función “MPPT”.	33
Ilustración 40.- Declaración e inicialización de variables de la función “MPPT”.	34
Ilustración 41.- Algoritmo de control de la función “MPPT P&O”.	35
Ilustración 42.- Algoritmo de control de la función “PI_Tension”.	36
Ilustración 43.- Algoritmo de control de la función “MPPT CI”.	37
Ilustración 44.- Representación del interfaz de usuario para la aplicación.	38
Ilustración 45.- Detalle del HMI para gestión del control de la aplicación.	39
Ilustración 46.- Detalle del HMI para gestión de las salidas digitales de la aplicación.	39
Ilustración 47.- Detalle del HMI para gestión de las principales magnitudes de la aplicación.	40
Ilustración 48.- Detalle del HMI para gestión de las comunicaciones Serie de la aplicación.	40
Ilustración 49.- Configuración de los parámetros de comunicación del protocolo Serie.	41
Ilustración 50.- Detalle de la bancada instalada en el interior de la caja junto con la fuente DC y el PC de usuario con el HMI en ejecución.	43
Ilustración 51.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación donde se muestran los resultados tras realizar la maniobra de pre-carga.	43
Ilustración 52.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación tras la realización de la prueba.	44
Ilustración 53.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle de los puntos de referencia 1.8A y 0.2A.	44
Ilustración 54.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle como se ha alcanzado el punto de referencia de máxima transferencia de potencia.	46
Ilustración 55.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle como se ha alcanzado el tren de puntos de referencia de máxima transferencia de potencia.	47
Ilustración 56.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle como se ha alcanzado el punto de referencia de máxima transferencia de potencia.	48
Ilustración 57.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle como se ha alcanzado el tren de puntos de referencia de máxima transferencia de potencia.	49

Notación

A^*	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de x elevado a y
$\cos^x y$	Función coseno de x elevado a y
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto
x°	Notación de grado, x grados.
$\Pr(A)$	Probabilidad del suceso A
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
\leq	Menor o igual
\geq	Mayor o igual
\	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo

El presente documento tiene por objetivo el estudio e implementación del sistema de control de un convertidor de potencia DC-DC mediante el uso de un procesador digital de señales (DSP). El desarrollo del sistema de control se realizará a través de la herramienta software conocida como MATLAB, empleando una toolbox asociada de Simulink.

Se pretende realizar un acercamiento a la técnica conocida como “hardware in the loop”. Mediante el uso de esta nueva técnica se pretende aportar una serie de beneficios tales como la versatilidad en la programación y ahorro en coste del uso de estas técnicas.

Para ello se realizará un estudio previo del entorno de la aplicación en la que se quiere realizar el trabajo. Con posterioridad se realizará una aplicación para validar esta técnica de control sobre una solución en particular, realizando ejercicios de simulación y aproximaciones para obtener una solución. En adelante se presentarán los resultados obtenidos, y, por último, se realizará un apartado de comentarios, conclusiones, y mejoras obtenidos durante el desarrollo de este proyecto.

1.2. Estudio del estado del arte

Con el objetivo de realizar un acercamiento a la aplicación que pretende estudiarse en este proyecto se va a realizar un estudio del arte para localizar un punto de partida.

La técnica conocida como “hardware in the loop” (HIL) es una técnica usada para el desarrollo y comprobación de sistemas embebidos en tiempo real complejos. La simulación HIL constituye una plataforma efectiva porque incluye toda la complejidad de la planta que controla el sistema embebido. Esto lo lleva a cabo mediante modelos matemáticos de todos los sistemas dinámicos relacionados con la planta bajo control, formando lo que se denomina como “simulación de la planta”. El sistema embebido que se está comprobando interactúa con esta simulación de la planta.

La simulación HIL incluye la simulación eléctrica de sensores y actuadores. Estas sirven de interfaz entre el modelo de la planta y el leído por el sistema embebido. Además, debe proveer de una interfaz de comunicación con los sistemas de bus de datos.

Se podría aplicar el control del sistema embebido directamente sobre la planta, pero dependerá del coste, la duración y de la seguridad. El uso de la simulación HIL aporta eficiencia. Para el desarrollo de determinados proyectos no permiten esperar a la disponibilidad del primer prototipo para testeo del sistema embebido. Por supuesto, otro de los factores determinantes es el coste. La planta donde se pretende usar el control embebido resulta muy costosa como para evaluar el control sobre ella directamente. Por último, mencionar que aporta una consistencia del sistema optimizando la ergonomía del software, ya que permite un proceso de análisis de interacción del entorno HIL con el usuario.

La simulación HIL ha sido históricamente empleada para evaluar controladoras, en la industria aeroespacial y desde los 90 en la industria automovilística. La simulación HIL se divide a nivel de señal, a nivel de potencia y a nivel mecánico. A nivel de señal el único elemento empleado en la simulación es un a tarjeta de control. A nivel de potencia, ciertos elementos son hardware e intercambian señales de potencia en el sistema además de las señales de control. A nivel mecánico, se ensaya un acondicionamiento eléctrico y se simula la parte mecánica.

Según las consideraciones anteriores, para el presente estudio la simulación HIL empleada es a nivel de potencia ya que se intercambian señales de potencia y de control entre los sistemas.

Uno de los principales entornos de simulación empleado en la actualidad es OPAL-RT. Las plataformas OPLA-RT para pruebas y validación de controles electrónicos dan cobertura a un abanico amplio de aplicaciones.

Presentan una experiencia considerable en el desarrollo e investigación en el campo de la electrónica de potencia, con el fin de ofrecer la simulación en tiempo real más rápida y precisa.

El empleo de esta tecnología aporta al desarrollo de proyectos un ahorro en tiempo de desarrollo, y una reducción de los costes y de los riesgos cometidos durante toda la fase de implementación y desarrollo. Por contra, estos entornos de simulación emplean tecnologías muy precisas y de alto rendimiento como FPGA's, cuyo empleo suponen un coste y complejidad de manejo muy elevado. Resulta necesario tener un conocimiento elevado de la aplicación para realizar la integración de los sistemas y obtener los resultados válidos. Todo ello se suma al coste que supone el empleo de herramientas delicadas y precisas que ofrecen un rendimiento bastante alto.

Se ha pretendido resaltar los recursos, ventajas e inconvenientes que ofrece este entorno de simulación en particular, pero de forma genérica, existen muchos otros entornos de simulación que presentan casi los mismos problemas e inconvenientes. Es por ello, por lo que resulta interesante realizar un estudio sobre el empleo de una herramienta de reducido coste, que ofrezca unos resultados aceptables considerando una disminución de la precisión, pero que aporte un valor a la aplicación final.

2 RAPID CONTROL PROTOTYPING

La simulación es la representación de la operación de un proceso o sistema del mundo real a través del tiempo mediante el uso de otros. Se clasifican en simuladores fuera de línea o simuladores software y simuladores en tiempo real. La principal diferencia entre ambos es que la simulación en tiempo real debe producir los resultados requeridos y el momento en que los resultados están disponibles y debe ser la misma que la de su contraparte física.

La simulación en tiempo real se clasifica en prototipos de control rápido (RCP), hardware en bucle (HIL), software en bucle (SIL). En la técnica RCP, el controlador se implementa utilizando RTS y luego se conecta a la planta física. En el caso de HIL, la planta se implementa en RTS y luego se conecta al controlador físico. En el caso SIL, tanto la planta como el controlador se implementan utilizando RTS. La idea principal de este enfoque es diseñar y verificar un algoritmo de control para un sistema en simulación offline y luego implementarlo utilizando RTS para verificar su rendimiento en condiciones reales de trabajo.

La técnica de Rapid Control Prototyping (RCP) es una herramienta creada para el desarrollo, la optimización, y testeado de nuevas estrategias de control en sistema en tiempo real de manera rápida sin una programación manual. De esta forma, permiten que el diseño del control se ejecute lo más rápido posible, se monitoree y se pruebe rápidamente con su hardware. Permite a los ingenieros de control probar e iterar rápidamente sus estrategias de control.

El proceso de RCP consiste en las siguientes fases:

1. Modelado del entorno del sistema bajo simulación.
2. Validación del modelo.
3. Diseñar una versión prototipo del sistema de control.
4. Prueba de la versión prototipo del sistema de control contra el modelo de simulación.
5. Prueba de la versión prototipo del sistema de control en la planta real.

Dos enfoques básicos se pueden distinguir de RCP: fullpass y bypass. Con fullpass, el sistema de control original se sustituye completamente por el nuevo. Todos los sensores y actuadores están conectados a este hardware electrónico, y tiene toda la autoridad para controlar la planta. Con el método de bypass, el prototipo de controlador de la nueva función se implementa mediante la revisión parcial de las unidades de control existentes. La unidad de control original ejecutará todas las funciones que permanecerán inalteradas, mientras que la nueva se calcula en una unidad específica con entradas y salidas adicionales.

El uso de esta herramienta ayuda al ingeniero de control a profundizar en la comprensión de la planta. Mediante los experimentos de simulación es posible monitorear variables de estado que son muy difíciles o imposibles de medir desde el proceso real. También permite evaluar la adición de características nuevas al hardware ya instalado en la planta. De esta manera es posible validar si estas modificaciones permiten una mejora.

La generación automática de código permite acelerar las iteraciones en el diseño del control porque se omite la fase de codificación manual de los algoritmos. Esta tarea suele implicar mucho tiempo, además de favorecer la aparición de errores en la programación. De esta manera se puede crear varias soluciones y probarlas.

Las dinámicas y no linealidades no modeladas de la planta, así como el ruido y las perturbaciones de las mediciones durante las pruebas con la planta real, pueden provocar fallos en un algoritmo de control que ha funcionado bien en simulaciones. Se debe diseñar un buen modelo de la planta, donde los datos obtenidos de la planta permitan refinar el modelo antes de resintonizar o rediseñar el algoritmo de control.

Resumiendo, los principales beneficios que aporta son:

- Ahorra costes y reduce riesgos: Los sistemas en tiempo real empleados están configurados para cumplir con los requisitos de entradas y salidas, frecuencia de muestreo, y requerimientos de entorno específicos para la aplicación que han sido diseñados. En cuanto a las pruebas que se realizan, se pueden automatizar

y de esta manera se reduce la probabilidad de fallos en el diseño.

- Acorta el tiempo de comercialización: Esta técnica permite la verificación y validación continua en las etapas de diseño. Al emplearse en etapas tempranas del ciclo de desarrollo de la aplicación en cuestión, permite adquirir margen de maniobra y poder realizar modificaciones a tiempo.

Aunque el modelado exhaustivo del proceso puede requerir mucho esfuerzo, las ventajas obtenidas después son numerosas. El estudio de simulación combinado con la generación automática de código del controlador del prototipo facilita el proceso de diseño y reduce el trabajo de ingeniería total en el pase de prueba del prototipo.

La información relacionada con la introducción al RCP y las ventajas e inconvenientes que aporta, ha sido extraída de los artículos [1], [2] y [3] mencionados en las referencias.

En la actualidad las soluciones RCP se pueden emplear con varias soluciones en tiempo real en hardware y software como Speedgoat GmbH, dSpace, National Instruments, OPAL-RT y otros. Los modelos matemáticos desarrollados se importan automáticamente con la herramienta MATLAB/Simulink hacia la máquina en tiempo real con interfaces de entradas y salidas reales para conectarse a sistemas en tiempo real.

El objeto de estudio del presente proyecto versa sobre la posibilidad de emplear un sistema desarrollado por el fabricante Texas Instruments para este cometido. El fabricante Texas Instruments ha desarrollado un paquete de código denominado Embedded Coder Support Package el cual permite configurar el código generado a partir de los algoritmos de MATLAB y Simulink. Aporta interfaces de software, optimizar el rendimiento de ejecución y minimizar el consumo de memoria.

3 ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN

Este apartado tiene como objetivo presentar la aplicación en tiempo real sobre la que se va a trabajar para poner en práctica las técnicas de RCP. Como primer planteamiento, se va a exponer la topología del convertidor de potencia con el que se va a trabajar y se definirá la aplicación para la que se va a emplear. Se detallará el funcionamiento de éste, así como las especificaciones eléctricas del mismo. Por último, se hará un breve resumen de los resultados obtenidos de la simulación de la aplicación.

3.1. Topología

La aplicación sobre la que se ha decidido emplear las técnicas de RCP es un convertidor de potencia DCDC elevador unidireccional. Como su propio nombre indica, la tensión de salida es siempre mayor que la tensión de entrada. Se trata de una fuente de alimentación conmutada que contiene al menos dos interruptores semiconductores, y un elemento como mínimo para almacenar la energía. Cuando el interruptor está activado, el diodo tiene polarización inversa, aislando así la etapa de salida. La entrada aporta energía al inductor. Cuando el interruptor está desactivado, la etapa de salida recibe la energía desde el inductor, así como de la entrada. La definición obtenida de este tipo de convertidor ha sido obtenida de la referencia [4]. Conocida la funcionalidad, este tipo de convertidor se puede emplear para un control MPPT sobre un grupo de paneles fotovoltaicos con la finalidad de extraer la máxima potencia de estos e inyectarla en un bus DC. Este convertidor busca el balance entre voltaje y corriente en el que los paneles solares operan a máxima potencia. Otra de las aplicaciones puede ser la del establecer un control sobre el flujo de corriente que se tiene a la salida para inyectar potencia a un bus DC de una micro-red.

Se trata de un dispositivo que transforma corriente continua de una tensión a otra. Son reguladores de conmutación, dando a su salida una tensión regulada.

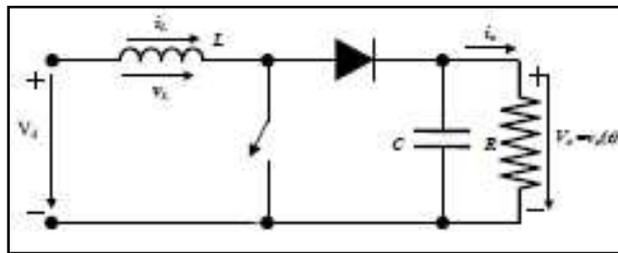


Ilustración 1.- Esquema básico de convertidor DCDC topología Boost.

Las ilustraciones mostradas sobre la topología del convertidor de potencia han sido extraídas de los apuntes de la asignatura “Sistemas Electrónicos para Smart Grids” del presente estudio de Máster [5].

3.2. Estudio del circuito

El funcionamiento de este dispositivo electrónico resulta básico. Dependiendo del estado en que se encuentre el interruptor o semiconductor, se tendrán dos estados distintos:

- Cuando el interruptor está cerrado (Estado ON) la bobina L almacena energía de la fuente, al mismo tiempo que la carga es alimentada por el condensador C.

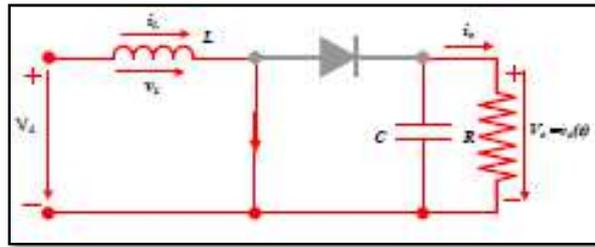


Ilustración 2.- Estado ON del convertidor.

- Cuando el interruptor está abierto (Estado OFF) el único camino para la corriente se produce a través del diodo D y circula por el condensador (hasta que se carga completamente) y lo carga.

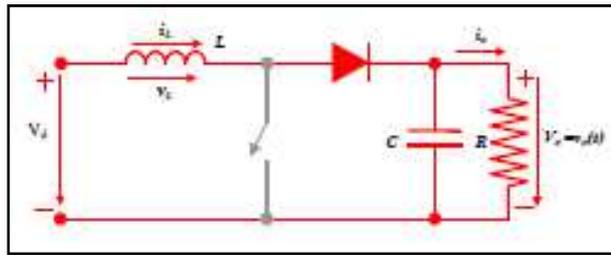


Ilustración 3.- Estado OFF del convertidor.

Dentro de estos dos estados del convertidor, se puede establecer dos situaciones de funcionamiento: Modo continuo, y Modo discontinuo.

3.2.1. Modo continuo

Para este modo de funcionamiento, la corriente a través de la bobina (I_L) nunca llega a ser cero.

La Ilustración 4 muestra las formas de onda de estado estacionario para estas condiciones de desconexión en las que la corriente del inductor fluye continuamente [$i_L(t) > 0$]. Ya que en estado estacionario la integral de tiempo de la tensión del inductor durante un período de tiempo debe ser cero.

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (1)$$

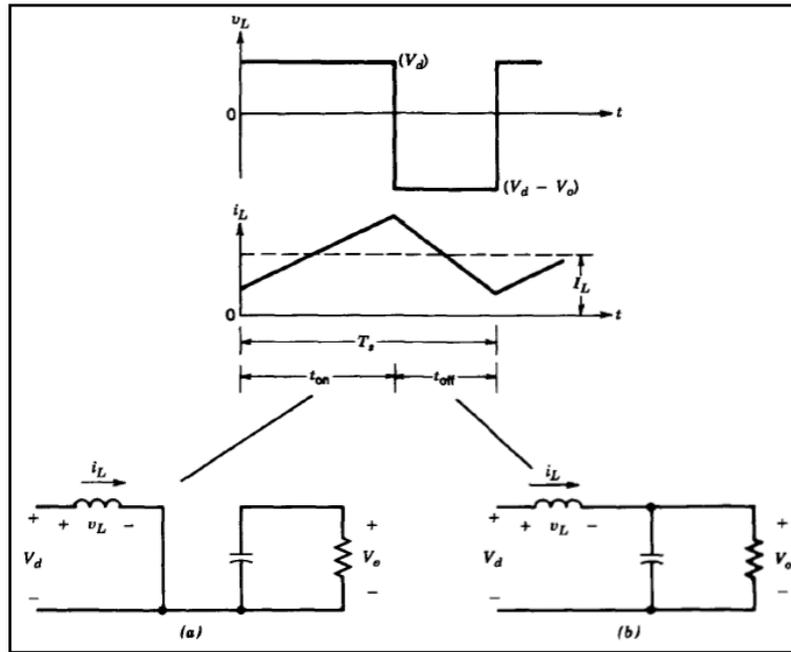


Ilustración 4.- Modo de conducción contínuo: (a) interruptor on; (b) interruptor (off).

La ilustración mostrada sobre la topología del convertidor de potencia ha sido extraída del libro de la referencia [4].

Dividiendo ambos lados por T_s , y reordenando términos:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2)$$

Asumiendo las pérdidas del circuito, $P_d = P_o$,

$$V_d * I_d = V_o * I_o \quad (3)$$

$$\frac{I_o}{I_d} = (1 - D) \quad (4)$$

En la ecuación (5) puede extraerse que la tensión de salida siempre es mayor que la de entrada (ya que el factor de “duty cycle” va entre 0 y 1), y que se incrementa con D.

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (5)$$

D es el ciclo de trabajo, que representa la fracción de período T durante el cual el conmutador S está ON. Por tanto, D varía entre 0 (S siempre OFF), y 1 (S siempre ON).

Operando en condiciones estacionarias, la cantidad de energía almacenada en cada uno de sus componentes, debe ser la misma al principio al final de cada ciclo completo de conmutación. Por tanto, la energía almacenada en el inductor será:

$$E = \frac{1}{2} * L * I_L^2 \quad (6)$$

Todas las ecuaciones y relación entre parámetros eléctricos han sido extraídos del libro Power Electronics, referencia número [4]. A continuación, en el siguiente apartado se muestra el siguiente límite de funcionamiento del sistema.

3.2.2. Límite entre la conducción continua y discontinua

Por definición, en este modo se pone a cero al final del intervalo de apagado. El valor medio de la corriente inductora en este límite es:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} * i_{L,peak} = \frac{1}{2} * \frac{V_d}{L} * t_{on} = \frac{T_s * V_o}{2 * L} * D * (1 - D) \quad (7)$$

En la siguiente ilustración se muestra las formas de ondas en el límite de la conducción continua.

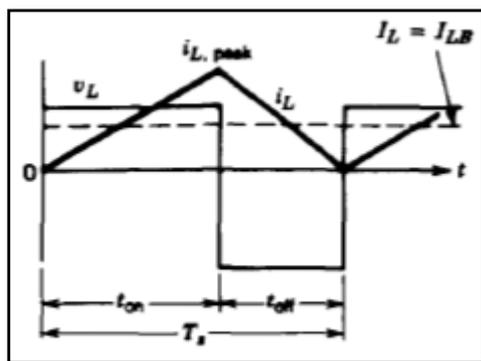


Ilustración 5.- Representación de tensión y corriente en el borde de conducción continua.

Reconociendo que en un convertidor step-up la corriente del inductor y la corriente de entrada son las mismas y usando las anteriores ecuaciones, encontramos que la corriente de salida promedio en el borde de la conducción continua es:

$$I_{oB} = \frac{T_s * V_o}{2 * L} * D * (1 - D)^2 \quad (8)$$

La mayoría de las aplicaciones en las que se utiliza un convertidor elevador requieren que V_o se mantenga constante. Por lo tanto, con la constante V_o , las I_{oB} se representan en la figura en función de la relación de trabajo D . Mantener V_o constante y variar la relación de duty implica que la tensión de entrada está variando.

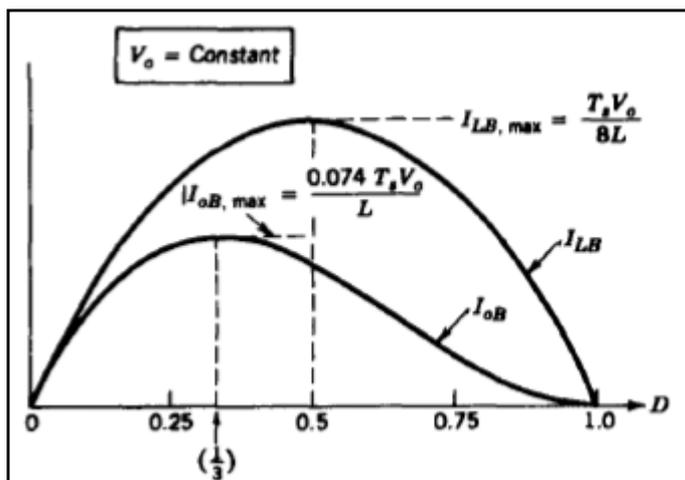


Ilustración 6.- Relación, a V_o constante, de la corriente del inductor en función del duty D .

3.2.3. Modo discontinuo

Esta situación se produce cuando la energía requerida por la carga es suficientemente pequeña como para ser transferida en un tiempo menor que el tiempo de ciclo de conmutación. Para este caso la corriente que circula

por el inductor se hace cero durante el período de conmutación. Las ecuaciones que modelan este funcionamiento del circuito son las siguientes.

Para entender el modo de conducción de corriente discontinua, se supondría que a medida que la potencia de carga de salida disminuye, la V_d y la D son constantes. En la ilustración 7 se aprecian las formas de onda en este modo de conducción discontinuo.

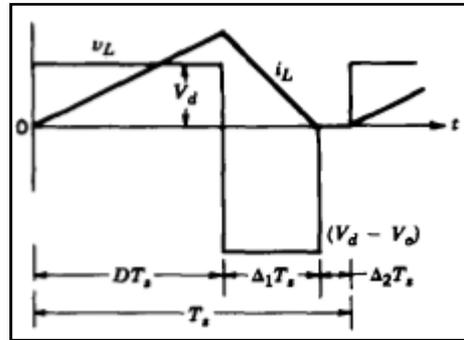


Ilustración 7.- Modo de conducción de corriente discontinuo para un período de conmutación T_s .

Si equiparamos la integral de la tensión del inductor sobre un período de tiempo a cero:

$$V_d * D * T + (V_d - V_o) * \Delta_1 * T_s = 0 \quad (9)$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \quad (10)$$

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \text{ ya que } P_d = P_o \quad (11)$$

La corriente media de entrada, que también es igual a la corriente del inductor, es:

$$I_d = \frac{V_d}{2 * L} * D * T_s * (D + \Delta_1) \quad (12)$$

Se deduce de las ecuaciones anteriores la ecuación (13):

$$I_o = \left(\frac{T_s * V_d}{2 * L} \right) * D * \Delta_1 \quad (13)$$

En la práctica, dado que V_o se mantiene constante y D varía en respuesta a la variación en V_d , es más útil obtener la relación de trabajo requerida D en función de la corriente de carga para varios valores de V_o/V_d . Se puede determina la ecuación (14):

$$D = \left[\frac{4 V_o}{27 V_d} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB,max}} \right]^{1/2} \quad (14)$$

En la Ilustración 8 se representala transición entre el modo de funcionamiento continuo a discontinuo manteniendo constante la tensión de salida V_o . D se traza en función de $\frac{I_o}{I_{oB,max}}$ para varios valores de $\frac{V_o}{V_d}$. El límite entre la condcción continua y la discontinua se traza mediante la curva discontinua.

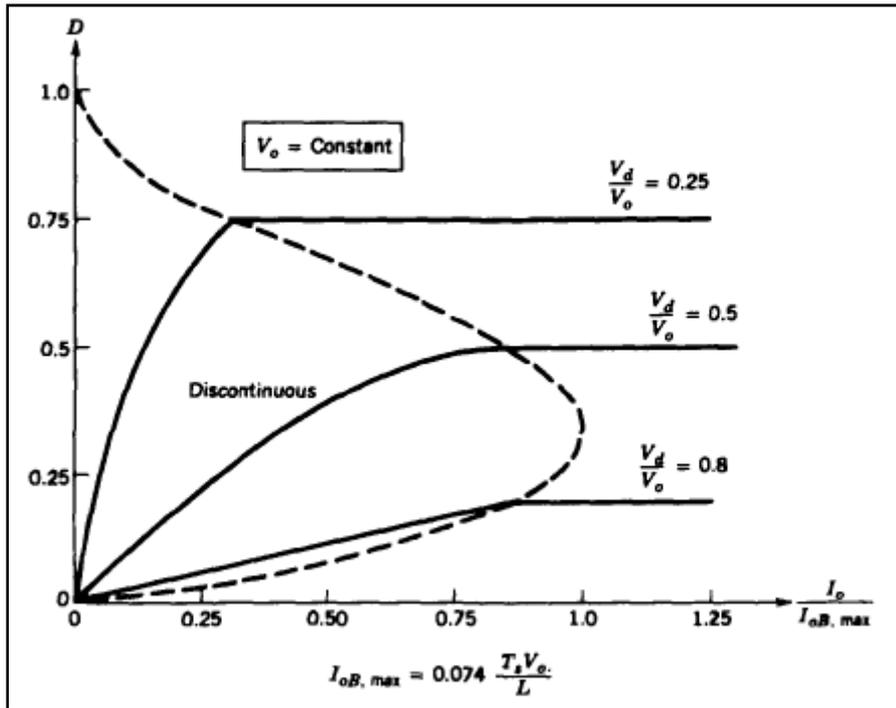


Ilustración 8.- Característica del convertidor elevador manteniendo constante V_o .

Todas las ecuaciones y relación entre parámetros eléctricos han sido extraídos del libro Power Electronics, referencia número [4].

3.3. Análisis de la aplicación

Dos han sido las aplicaciones finales seleccionadas para la evaluación del comportamiento del sistema. La primera aplicación se ha seleccionado un algoritmo de control de corriente simple y sencillo, el cual establece una relación de las tensiones de entrada y salida, y en función de una consigna establecida por el usuario, se obtiene una cierta transferencia de potencia hacia la salida. Se establece un control con un lazo de corriente que se encargará de realizar el control de dicha corriente que circula por la inductancia de convertidor. Este lazo debe ser lo suficientemente rápido como para alcanzar la referencia en un tiempo reducido, pero sin que resulta demasiado brusco y deteriore el sistema o provoque inestabilidades en el control. Para ello, se ha implementado una función de rampa que adapte gradualmente el valor transferido al control de corriente.

Se ha establecido el control mediante un control PI. Existen dos formas de controlar la corriente de un sistema mediante un control PI. La forma directa, se realiza mediante la generación de la señal de disparo que ataca al interruptor semiconductor a la salida del PI de potencia. Por el contrario, la segunda forma que hay de implementar este control PI es la forma indirecta. El control indirecto controla la potencia. La salida, es una salida de referencia de corriente. Esta salida se envía a un controlador PI de corriente. La señal de salida de este controlador es el que genera la señal de disparo del semiconductor.

El controlador en modo directo resulta más rápido e intuitivo. Para un valor de tensión constante a la entrada, la consigna de un valor de corriente determina una potencia. Es la referencia de corriente la que se controla. El método de Tustin es el método de integración discreto empleado. Este control implementa un término feedforward que aporta una estabilidad en régimen permanente.

El empleo del control en modo indirecto aporta al sistema un concepto de estabilidad mucho mayor. Se denomina indirecto ya que, para controlar la corriente, que es la finalidad, se realiza un control previo de la potencia del sistema a la entrada. Este control contempla posibles variaciones de tensión a la entrada. El lazo de control de la potencia debe ejecutarse más rápido que el lazo de control de la corriente. Resulta un control más robusto y completo comparado con el modo de control directo.

La otra aplicación para la que se ha seleccionado es un convertidor DCDC con topología Boost para la

implementación en un campo de paneles fotovoltaicos con implementación de algoritmo MPPT, y este a su vez conectado a un bus DC de una micro-red. Esta aplicación implementará dos técnicas de control propias de este tipo de aplicación.

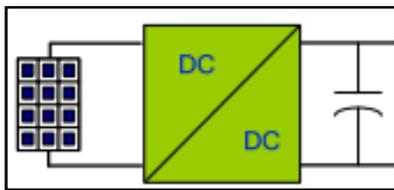


Ilustración 9.- Detalle del convertidor DCDC conectado en paralelo a panel fotovoltaico y bus DC.

Se dispone de un campo de paneles solares dispuestos en conexión serie y paralelo según especificaciones eléctricas de los propios paneles. Estos dispositivos captan la energía proveniente de la radiación solar mediante efecto fotoeléctrico para su aprovechamiento. El rendimiento de ese dispositivo va en función del tamaño de los cristales con los que esté fabricado, de la orientación en que esté dispuesto frente al sol, de la radiancia y de otra serie de factores.

Los algoritmos MPPT o Seguidor de Punto de Máxima Potencia, por sus siglas en inglés Maximum Power Point Tracker, son controladores de carga que siempre buscan el balance entre el voltaje y corriente en el que los paneles solares operan a su máxima potencia. La potencia adicional extraída se convierte en un incremento de la intensidad de carga del bus DC o de la batería a la que se encuentre conectado. Para la aplicación que concierne este estudio, el convertidor DCDC con la implementación de algoritmos MPPT calcula en todo momento la tensión a la cual el módulo es posible que produzca la máxima potencia para las condiciones lumínicas y ambientales actuales.

En la Ilustración 10 se puede apreciar las curvas características de corriente y potencia proporcionadas por un panel fotovoltaico en función de la radiación, para una tensión dada, y para diferentes temperaturas de operación. Para estas curvas, se pueden extraer los diferentes puntos de extracción de máxima potencia.

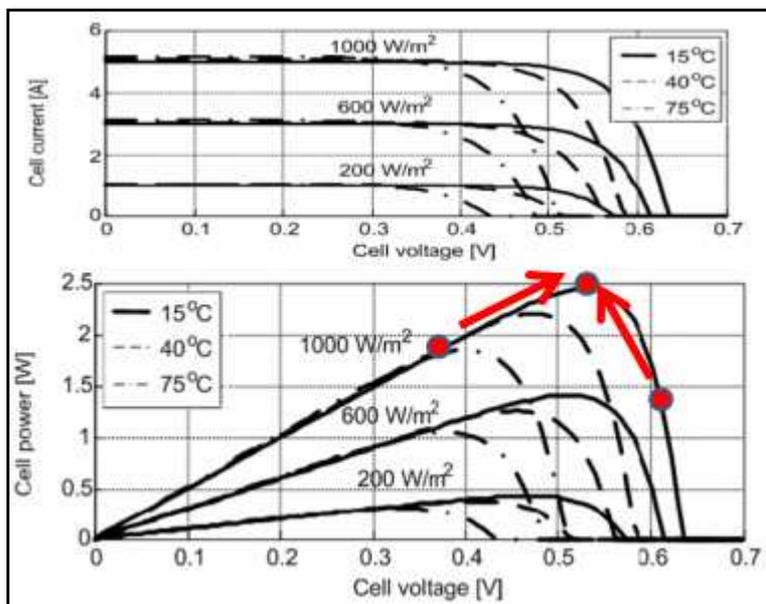


Ilustración 10.- Curvas de máxima extracción de potencia para un panel fotovoltaico.

El punto determinado con las flechas y color rojo es precisamente el punto de máxima extracción de potencia que optimiza el funcionamiento del panel y hace que se extraiga un balance equilibrado de tensión e intensidad. Existen numerosos algoritmos que buscan obtener dicho punto de trabajo. Todos tienen sus ventajas e inconvenientes. A continuación, se listan los principales algoritmos de MPPT existentes.

- Hill_climbing/P&O
- IncCond

- Fractional V_{oc} .
- Fractional I_{sc} .
- Fuzzy Logic Control
- Neural Network
- RCC
- Current Sweep
- DC Link Capacitor Droop Control
- Load I or V Maximization
- dP/dV or dP/dI Feedback Control
- Array Reconfiguration
- Linear Current Control

De entre estos algoritmos de MPPT, la aplicación que concierne el estudio se va a focalizar en dos de estos algoritmos en cuestión. Estos son los siguientes.

- Perturb and Observe Method
- Incremental Conductance Method

En adelante se va a realizar una breve introducción al funcionamiento de ambos algoritmos de control. La información relacionada con el estudio de las estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia para inversores fototérmicos ha sido extraída de la referencia número [6].

3.3.1. Algoritmo perturbar y observar

Esta técnica de control MPPT es la más sencilla de realizar, entre las listadas con anterioridad. Esta basado en la comparación de las magnitudes de potencia y tensión, y en función de un criterio u otro se determina una consigna final. La variable que controla este proceso es la tensión de referencia. Este algoritmo incrementa o decrementa la tensión de referencia, esperando una variación de potencia. En función del estado de funcionamiento del panel, se obtendrá una variación u otra.

En la Ilustración 11, se muestra el esquema de funcionamiento del mismo.

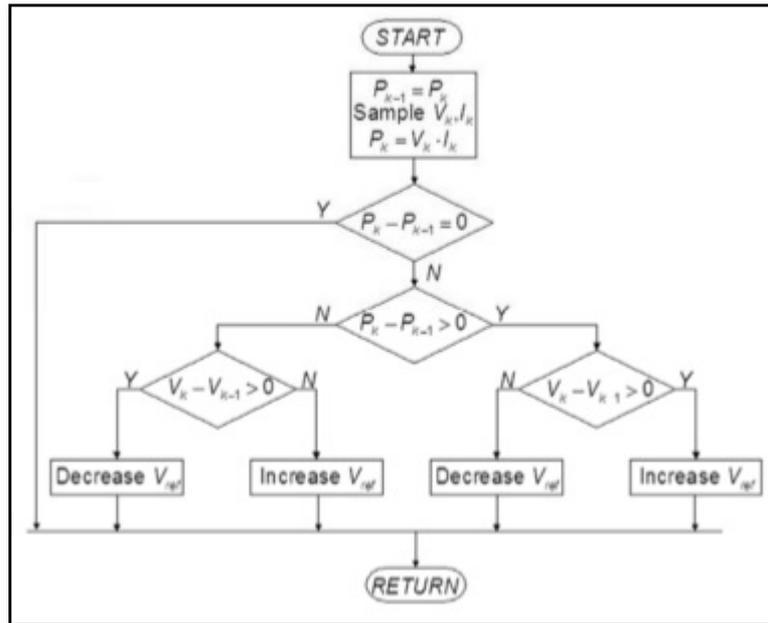


Ilustración 11.- Diagrama de flujo del método P&O.

Resulta un algoritmo sencillo de comprender y de implementar. Esto aporta una serie de ventajas e inconvenientes. Implica un bajo coste computacional para el dispositivo electrónico o soporte que tenga que implementar y ejecutarlo.

Como desventaja se puede destacar que por su propia naturaleza oscila alrededor del MPP. Se queda permanente oscilando y no se centra o permanece estable. Pero el principal inconveniente es que no tiene buena respuesta ante la situación de que la irradiancia del panel cambia bruscamente. No soporta variaciones bruscas y consecutivas, o tardaría un tiempo considerable en alcanzar dicho punto de MPP. Lo que ocurriría en ese caso sería que la corriente que se le demanda al panel no es acorde a la que es capaz de proporcionar el mismo, por tanto, la tensión cae bruscamente. Como consecuencia se pueden producir situaciones de funcionamiento indeseado del convertidor o un mal funcionamiento de los controles empleados en el mismo.

Una opción de mejora de este algoritmo es considerar que la magnitud sea variable. De esta forma este valor se reduciría cuando se acercase el algoritmo al punto MPP.

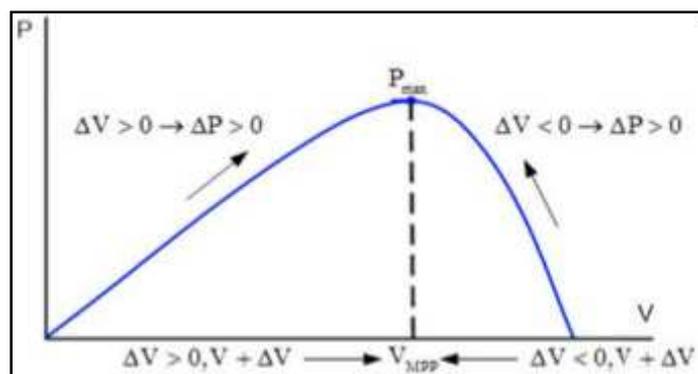


Ilustración 12.- Consecuencia en la evolución de la potencia del convertidor por la aplicación del algoritmo P&O.

3.3.2. Algoritmo conductancia incremental

Este algoritmo de control resulta algo más complejo que el estudiado en el apartado anterior. Requiere más capacidad de procesamiento y cómputo por parte del sistema electrónico de control. Se basa en el análisis de los diferenciales de intensidad respecto de tensión. Sin embargo, el diagrama de funcionamiento resulta similar al

3.4. Especificaciones técnicas de la aplicación

En este apartado se van a detallar los principales valores de especificaciones técnicas de la aplicación que se va a estudiar. De esta forma se tiene unos márgenes o limitaciones de funcionamiento para, con posterioridad, implementar las simulaciones y conocer a priori los resultados que se esperan.

Los principales parámetros que participan en la configuración del sistema son:

- V_{PIN} : Tensión de paneles en continua a la entrada.
- V_{IN} : Tensión en continua del bus DC de entrada del convertidor DCDC.
- V_{OUT} : Tensión en continua del bus DC de salida del convertidor DCDC.
- I_{IN} : Corriente de entrada del convertidor DCDC. Corriente que circula por el inductor.
- I_{OUT} : Corriente de salida del convertidor DCDC.
- F_{ePWM} : Frecuencia de conmutación.
- F_C : Frecuencia de control.
- T_{IGBT} : Temperatura del semiconductor o interruptor.
- T_{COIL} : Temperatura de la bobina o inductor.

A continuación, se listan las consideraciones de diseño que se han tenido en cuenta para la configuración del sistema de la aplicación:

- La tensión umbral establecida para que empiece a funcionar el convertidor es de $270V_{DC}$.
- El valor de la tensión umbral debe mantenerse durante un minuto para que se considere una tensión estable de arranque.
- Los valores máximos y mínimos de la tensión de paneles son: $50V_{DC}$ y $350V_{DC}$.
- El valor máximo de la tensión de entrada ha sido determinado por la aplicación. Se ha fijado al valor de la tensión máxima posible al conectar al campo de paneles fotovoltaicos. En este caso, se ha considerado la tensión de circuito abierto (V_{OC}) que es $350V_{DC}$.
- La corriente máxima admisible por el convertidor DCDC vendrá determinada por la configuración del campo de paneles fotovoltaicos que tenga conectado. Para la aplicación, se ha considerado como la máxima corriente admisible, la corriente de cortocircuito (I_{CC}) de los paneles cuyo valor de 9A.
- La frecuencia de conmutación del semiconductor será de 10kHz.
- La frecuencia de control, se fija al doble de la frecuencia de conmutación, como es habitual en los sistemas de electrónica de potencia. Por tanto, la frecuencia de control será de 20kHz.

A nivel eléctrico, la tabla 1 muestra las especificaciones del convertidor DCDC con topología MPPT.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CONVERTIDOR

RANGO DE TENSIÓN DE ENTRADA	$150 \sim 300V_{DC}$
TENSIÓN DE SALIDA	$\sim 400V_{DC}$
CORRIENTE MÁXIMA DE ENTRADA	9A
CORRIENTE MÁXIMA DE SALIDA	10A
POTENCIA NOMINAL	3kW
RENDIMIENTO	>90%

Tabla 1.- Especificaciones técnicas del convertidor DC-DC para la aplicación.

4 MODELADO DE LA APLICACIÓN

Otro de los puntos de estudio de este proyecto versa sobre la simulación del convertidor mediante la herramienta software MATLAB/Simulink. Esta resulta ser una herramienta fundamental en el desarrollo del proyecto ya que tiene gran participación en el estudio realizado.

Aplicando las restricciones o especificaciones definidas en anteriores apartados, y dado que la tensión de entrada es siempre inferior a la tensión de salida, se ha optado por una topología DC-DC tipo elevadora. El convertidor DCDC presenta la configuración mostrada en la Ilustración 15.

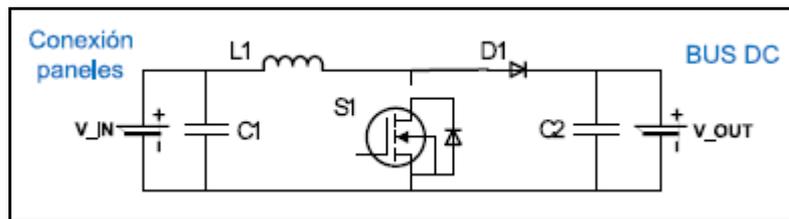


Ilustración 15.- Esquema del convertidor con los valores definidos para cada componente.

4.1 Topología

El modelo desarrollado para la herramienta Simulink presenta el siguiente aspecto. Este bloque presenta las conexiones eléctricas entre los elementos que se pretenden modelar. Es el resultado de la implementación de la topología representada en la Ilustración 16.

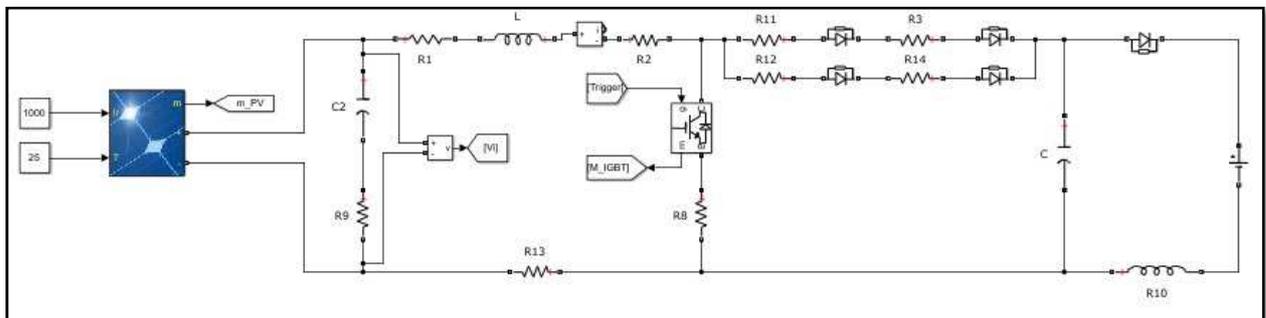


Ilustración 16.- Modelado del convertidor DCDC en Simulink.

El circuito incluye un bus DC de entrada, al cual se le han conectado paneles solares configurados con los parámetros de la aplicación real, para que la simulación sea lo más fidedigna posible y los resultados sean veraces. A continuación, se observa el elemento inductivo de la bobina. Está caracterizada mediante bobinas y resistencia para modelar lo más real el comportamiento de la aplicación. Seguidamente, se encuentra conectado en paralelo el semiconductor. Este será el encargado de ejercer de interruptor y realizar las conmutaciones del circuito para que entre en los dos estados de funcionamiento. Por último, se encuentran una serie de diodos que implementan la funcionalidad de un solo diodo. En conexión paralela se encuentra, como elemento final, el Bus DC de salida.

Cabe mencionar que las simulaciones que se han realizado para validar el funcionamiento de los algoritmos de control MPPT. Además de realizar el control MPPT, ha sido necesario la adición de un controlador PI para estabilizar la variable de referencia, es decir, la tensión de paneles, y que se alcance la consigna establecida.

4.2 Control

El sistema de control incluye, por tanto, un algoritmo de control MPPT, que puede ser seleccionado de entre los dos algoritmos mencionados anteriormente, y un control PI, conectado a la salida de dicho control MPPT. Este diagrama de control se muestra en la Ilustración 17.

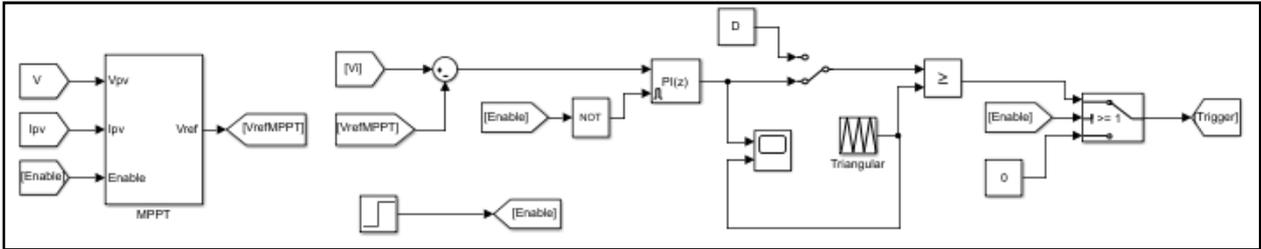


Ilustración 17.- Diagrama de bloques de control empleado en el modelo de Simulink.

El bloque de control incluye las siguientes variables y parámetros:

- Entradas:
 - Tensión de entrada de bus DC.
 - Corriente de entrada de paneles.
 - Señal de habilitación para el control MPPT.
 - Parámetros de control PI: K_P y K_I .
- Salidas:
 - Disparo del semiconductor.
 - Magnitudes de comprobación.

4.3 Monitorización

En la Ilustración 18 se muestran los bloques empleados para depurar y validar el funcionamiento del sistema.

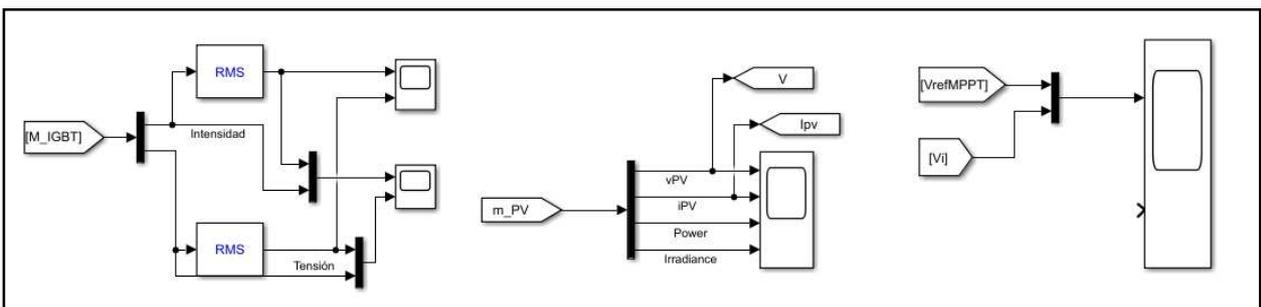


Ilustración 18.- Diagrama de bloques de monitorización empleado en el modelo de Simulink.

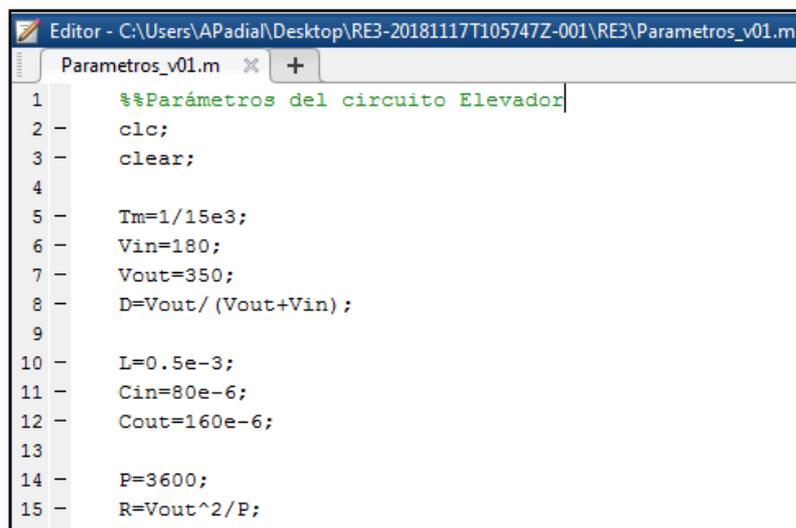
Las principales variables medidas durante las simulaciones son:

- Medidas en el semiconductor:
 - Intensidad: RMS y valor instantáneo.
 - Tensión: RMS y valor instantáneo.
- Medidas en el panel fotovoltaico:
 - Tensión.

- Intensidad.
- Potencia.
- Radiancia.
- Medidas del sistema:
 - Tensión de bus DC entrada.
 - Tensión obtenida del control.

4.4 Resultados

Con el fin de obtener unos resultados lo más parecidos posible a la aplicación real, se ha configurado un fichero script con los principales parámetros del sistema. De esta forma, se puede modificar cualquier parámetro de manera muy cómoda a la hora de realizar una batería de simulaciones. En la Ilustración 19 se muestra una captura de imagen del fichero script.



```

Editor - C:\Users\APadial\Desktop\RE3-20181117T105747Z-001\RE3\Parametros_v01.m
Parametros_v01.m x +
1 %%Parámetros del circuito Elevador
2 -   clc;
3 -   clear;
4
5 -   Tm=1/15e3;
6 -   Vin=180;
7 -   Vout=350;
8 -   D=Vout/(Vout+Vin);
9
10 -  L=0.5e-3;
11 -  Cin=80e-6;
12 -  Cout=160e-6;
13
14 -  P=3600;
15 -  R=Vout^2/P;
    
```

Ilustración 19.- Detalle de los principales parámetros del sistema predefinidos en el fichero script.

Tan solo ejecutando el fichero antes de ejecutar la simulación, los principales parámetros se configuran en el sistema. Los parámetros que se pueden modificar en la simulación son los siguientes:

- Tm: Tiempo de muestreo.
- Vin: Tensión de precarga a la entrada.
- Vout: Tensión de precarga a la salida.
- D: Duty Cycle. Ciclo de trabajo del semiconductor.
- L: Inductancia de la bobina.
- Cin: Valor del condensador de entrada.
- Cout: Valor del condensador de salida.
- P: Potencia activa.
- R: Valor de resistencia.

El tiempo de muestreo establecido para la simulación configurado es de $T_s = 100e-6$ segundos. Se ha configurado un tiempo de simulación de 0.5 segundos.

Los principales resultados obtenidos de la simulación se muestran en las Ilustraciones de la 20 a la 22. Los

valores de la tensión y de la intensidad obtenidos de la medida en valor RMS y en valor instantáneo en el semiconductor son:

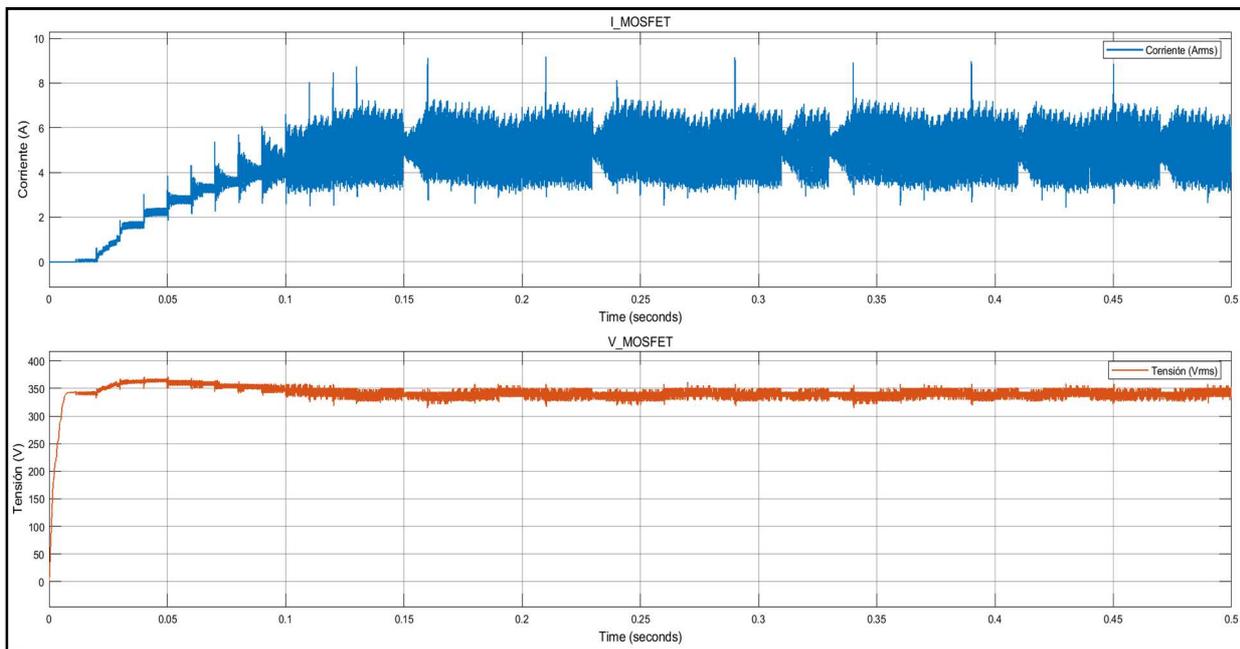


Ilustración 20.- Valores RMS de tensión e intensidad del semiconductor durante el tiempo de simulación.

Los parámetros de tensión, intensidad, potencia y radiancia en el panel fotovoltaico se representan en la Ilustración 21.

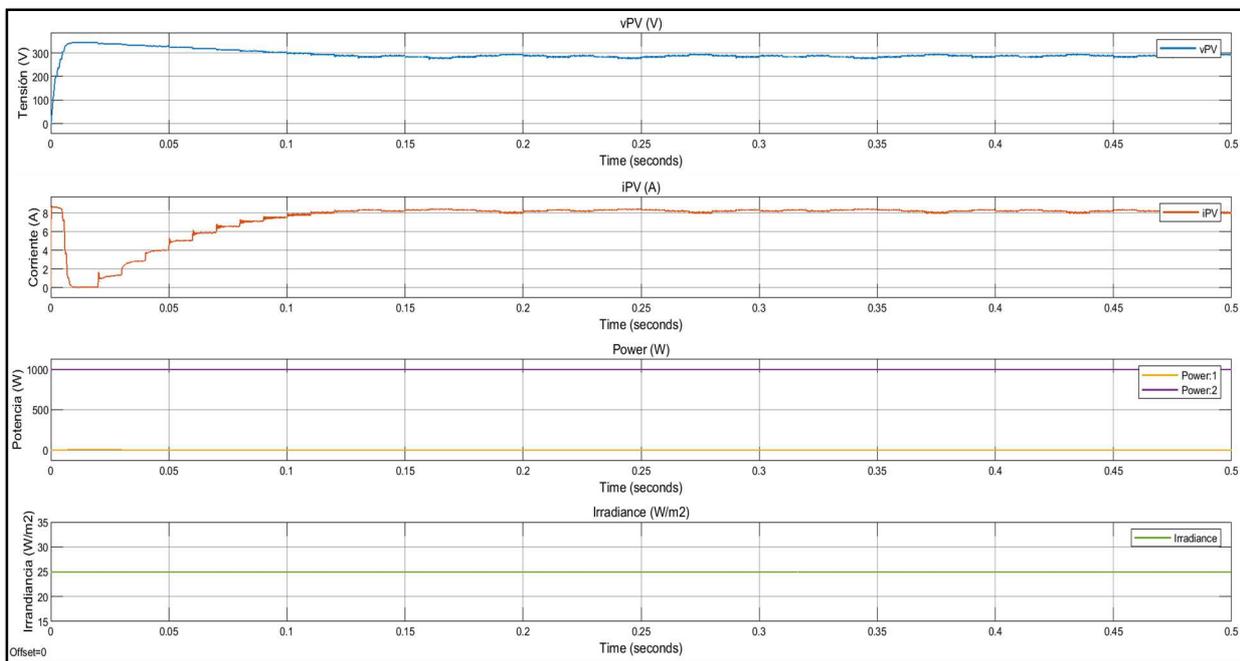


Ilustración 21.- Representación de la tensión, corriente, potencia y radiancia características del panel durante la simulación realizada.

En la Ilustración 22 se muestra la comparación entre los valores de tensión obtenidos en el Bus DC de entrada y la tensión de referencia del control MPPT durante la simulación.

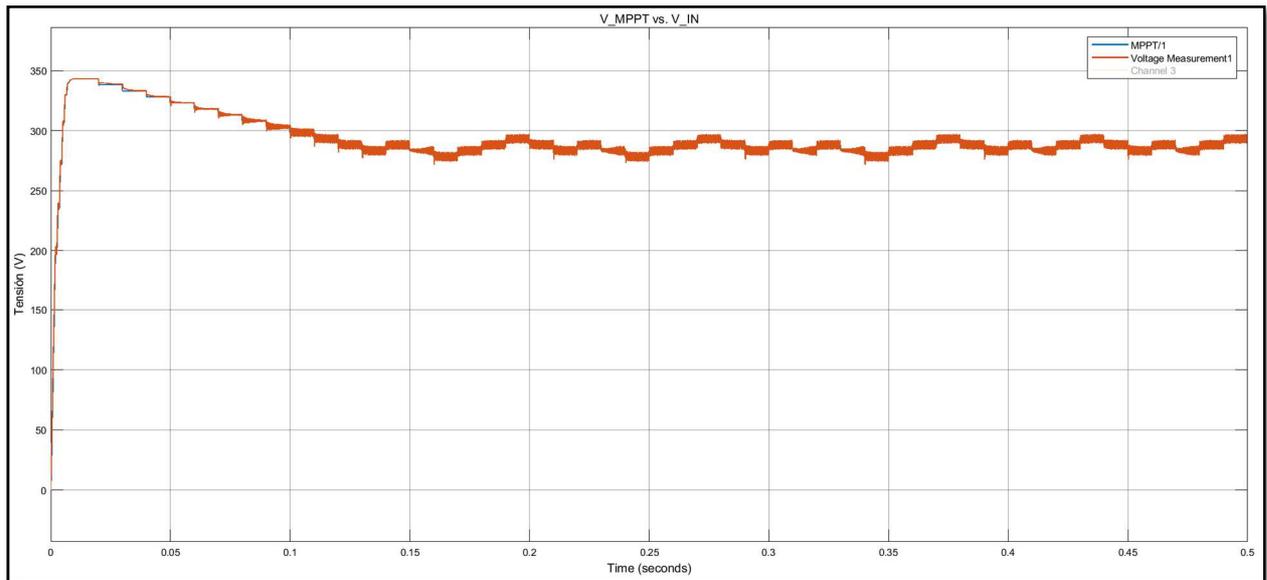


Ilustración 22.- Formas de onda de tensión de paneles y de la tensión obtenida como referencia del MPPT.

Como conclusiones de la realización de la simulación, se puede extraer lo siguiente.

- El rizado obtenido en la tensión de salida como resultado de la ejecución del algoritmo MPPT es bastante aceptable. La oscilación resulta propia del término integral.
- El funcionamiento de los algoritmos de control es como se espera. Por lo general el control PI aplicado tiene un buen comportamiento.
- Se hace necesario precargar el condensador de salida para evitar picos de corriente al inicio.
- Se cumple con los requisitos exigidos para la aplicación.

5 BANCADA DE PRUEBAS DE LA APLICACIÓN

Rapid Control Prototyping es un proceso que permite probar e iterar rápidamente diversas estrategias de control. Para este cometido se requiere un proceso de importación de los modelos previamente desarrollados con MATLAB/Simulink a una máquina en tiempo real con interfaces E/S reales que habilitan la conexión con el mundo real.

Para la aplicación objeto de estudio de este proyecto, se ha empleado un dispositivo DSP (Procesador Digital de Señales) modelo C2000™ Delfino™ LaunchPad™, embebido en una placa de evaluación denominada LAUNCHXL-F28377S.

5.1 Presentación de la bancada

La bancada de pruebas empleada para el desarrollo del estudio ha sido cedida por el Departamento de Electrónica de Potencia de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

En la Ilustración 23, se muestra una vista de la ubicación física de los principales elementos que conforman esta bancada. Los elementos que aparecen en dicha ilustración son los siguientes.

1. Borna de entrada.
2. Fusibles.
3. Contactor polo positivo de entrada.
4. Contactor polo negativo de entrada.
5. Resistencia de precarga.
6. Contactor de precarga.
7. Convertidor de potencia DCDC con topología BOOST.
8. Bobina.
9. Borna de salida.
10. Alimentación AC de fuentes conmutadas.
11. Diferencial.
12. Magnetotérmico.
13. Fuente de alimentación $\pm 15/+5 V_{DC}$.
14. Fuente de alimentación $+24V_{DC}$.
15. PCB de sensado.
16. PCB de control.

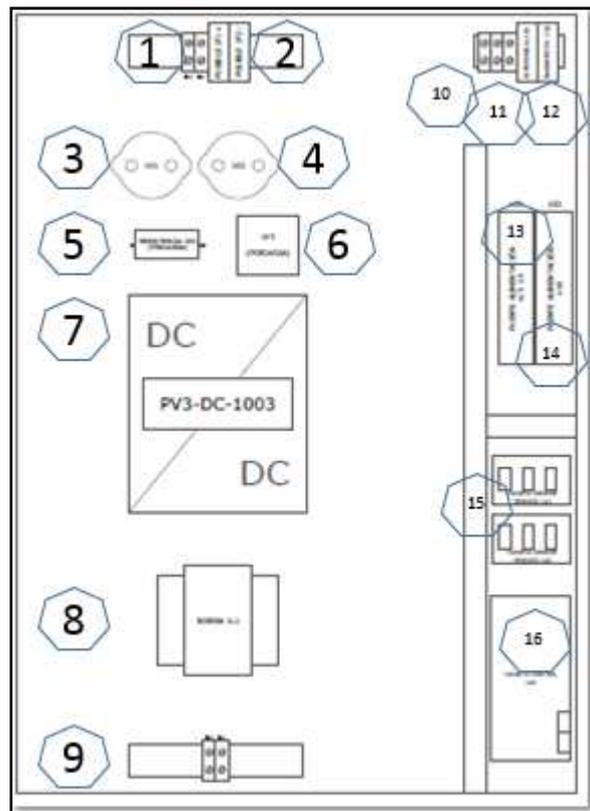


Ilustración 23.- Esquema de conexionado de los diferentes elementos que conforman la bancada.

A nivel de conexionado se puede realizar una distinción entre el conexionado de potencia, y el conexionado de comunicación y control. El esquema que se ilustra en la Ilustración 24 muestra el conexionado de potencia del sistema.

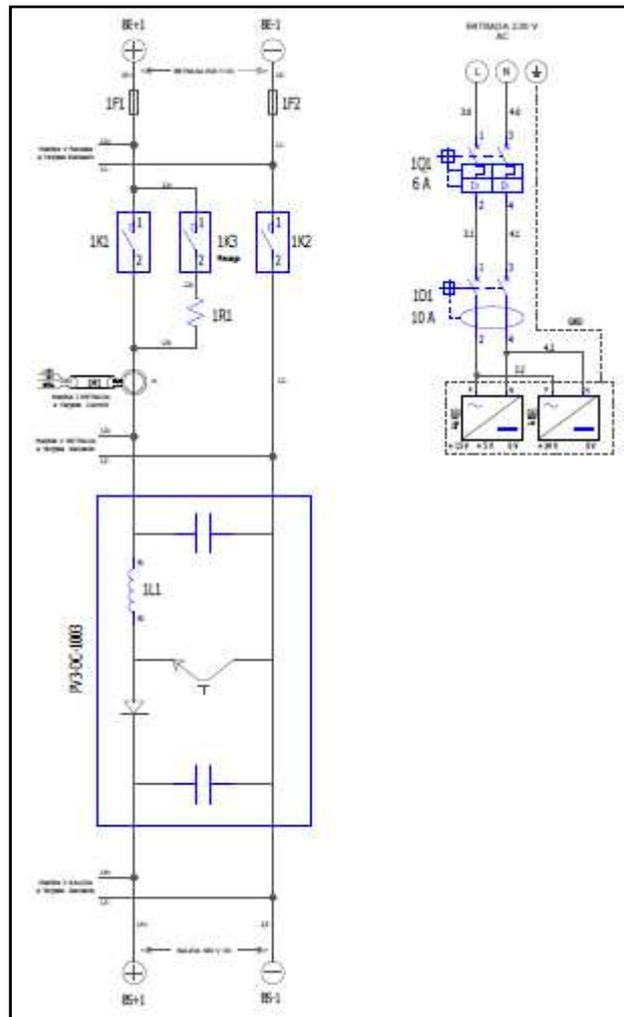


Ilustración 24.- Detalle del conexionado de potencia de la bancada.

En la Ilustración 25, se representa el esquema de conexionado de control y comunicaciones del sistema, entre todos los bloques que conforman la bancada.

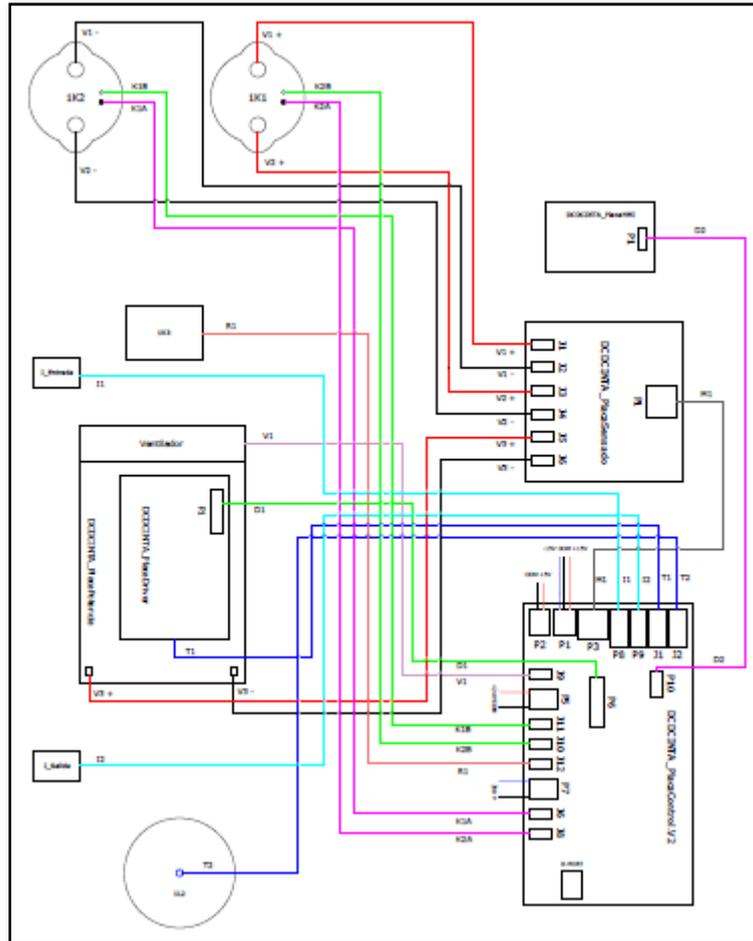


Ilustración 25.- Detalle del conexionado de control y comunicación de la bancada.

Cabe mencionar que, para la implementación de la bancada, se ha empleado instrumentación y protecciones acordes a las especificaciones técnicas del sistema, para garantizar un seguro y correcto funcionamiento. Todo el dispositivo se ha instalado dentro de una envolvente de metal robusta que permite garantizar la seguridad y aislamiento del usuario que trabaje con esta bancada. En la Ilustración 26 se muestra una imagen de la bancada que permite una mejor visualización del sistema con el que se ha trabajado a lo largo de este proyecto.



Ilustración 26.- Detalle de la bancada del convertidor DCDC con topología BOOST.

5.2 Placa de evaluación LAUNCHXL-F28377S

El sistema LAUNCHXL-F28377S resulta ser un kit de evaluación de bajo costo que incluye todo el hardware y software necesarios para desarrollar aplicaciones basadas en el microprocesador F28377S. Esta placa ofrece la posibilidad de una conexión a través una herramienta de emulación JTAG con interfaz directa a PC para programarlo, depurarlo o evaluarlo de manera sencilla. Además de esta conexión JATG, la interfaz USB proporciona una conexión serie UART desde el dispositivo al PC. Esta conexión resultará bastante interesante ya que será a través de la cual se habilite la comunicación con el dispositivo una vez que se encuentre realizando labores de la aplicación final para la que será destinado mediante técnicas de RCP. Este dispositivo electrónico presenta el aspecto físico de la Ilustración 27.

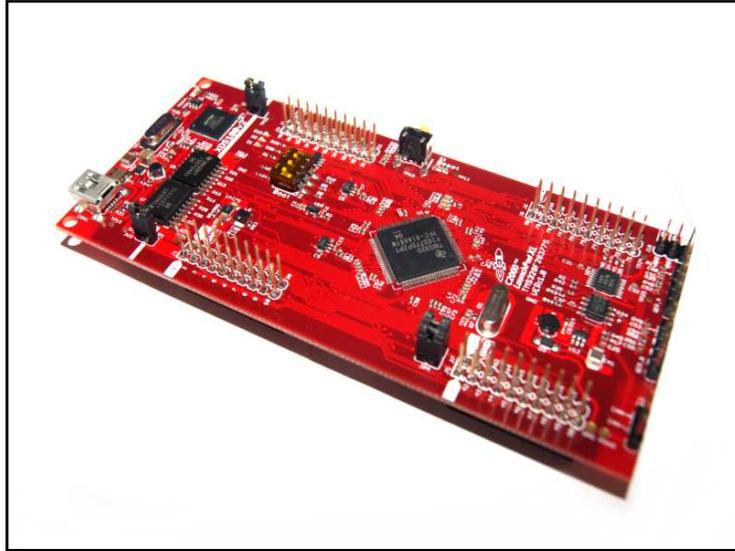


Ilustración 27.- Detalle del aspecto físico que presenta la placa LAUNCHXL-F28377S de Texas Instruments. La información incluida en el presente estudio sobre el dispositivo electrónico LAUNCHXL-F28377S ha sido extraída de la documentación de la referencia del manual del fabricante de dicha placa [7].

Las principales características que presenta esta placa de evaluación se representan en la Tabla 2.

CARACTERÍSTICAS	LAUNCHXL-F28377S
PROCESADOR	200 MHz C28xCPU and CLA
MEMORIA	1 MB Flash
CONECTIVIDAD/DEPURACIÓN	USB asilado XDS100V2 JATG para tareas de depuración y programación en tiempo real
COMUNICACIONES	Interfaz CAN con transceptor integrado
I/O	4x20-pin conectores
ADC/DAC	16-bit/12-bit ADCs / 12-bit DACs
PWMS	Delta-sigma filtros sync, HPRWMs, comparadores
LEDS	Tres LEDs configurables por el usuario

Tabla 2.- Características principales de la placa de evaluación LAUNCHXL-F28377S.

Esta placa de evaluación ha sido diseñada específicamente para aplicaciones de electrónica de potencia o el control de motores. La principal característica que hace inetersante el uso de esta placa resulta el asilamiento galvánico anteriormente mencionado. El diseño es especialmente robusto en este aspecto, lo cual permite que se pueda depurar y monitorear el contenido de los registros internos del microprocesador en tiempo real mientras se realizan tareas de control para aplicaciones de electrónica de potencia, donde el ruido eléctrico producido por la naturaleza de la aplicación es considerable.

5.2.1 Recursos del sistema

El presenta apartado tiene como objetivo establecer una relación de los recursos de la placa de evaluación empleados para la aplicación final.

- Entradas analógicas
- Entradas digitales
- Salidas digitales
- Comunicaciones Serie

La placa dispone de muchos otros recursos como leds indicadores de estado, salidas analógicas o comunicaciones, pero para la aplicación que coinciera este estudio, solo se emplearán estos recursos.

Toda la información proporcionada en estos apartados ha sido adquirida de los manuales propios del dispositivo. [7]

5.2.1.1 Convertidor analógico digital

La conversión analógica a digital (ADC) es el recurso empleado por el procesador digital de señales para la adquisición de señales de naturaleza analógicas del mundo real. El ADC empleado por el DSP utiliza el método de aproximación sucesiva (SAR) con una resolución seleccionable entre 16 bits o 12 bits. Cada módulo ADC consta de un solo circuito de muestreo y retención (S/H). El módulo ADC está diseñado para ser duplicado varias veces en el mismo chip, lo que permite el muestreo simultáneo o la operación independiente de múltiples ADCs. La envoltura de ADC se basa en el inicio de la conversión (SOC). La secuencia de activación y conversión del ADC se realiza a través de inicios de conversión configurables (SOC), por sus siglas en inglés Start Of Conversions.

Cada ADC tiene las siguientes características:

- Resolución seleccionable de 12 bits o 16 bits.
- Referencia externa ratiométrica establecida por VREFHI \ VREFLO
- Conversiones de señales diferenciales (solo modo de 16 bits)
- Conversiones de señal de terminación única (solo en modo de 12 bits)
- Multiplexor de entrada con hasta 16 canales (un extremo) u 8 canales (diferencial)
- 16 SOC configurables
- 16 registros de resultados direccionables individualmente
- Múltiples fuentes de disparo
 - S / W - inicio inmediato del software
 - Todos los ePWM poseen dos canales A y B.- ADCSOC A o B
 - GPIO XINT2
 - CPU Timers 0/1/2
 - ADCINT1 / 2
- Cuatro interrupciones PIE flexibles
- Modo de ráfaga
- Cuatro bloques de post-procesamiento, cada uno con:
 - Calibración offset saturada
 - Error en el cálculo del punto de ajuste.
 - Comparación de alto, bajo y cruce por cero, con interrupción y capacidad de disparo ePWM
 - Captura de retardo de disparo a muestra

5.2.1.2 Entradas y salidas digitales

Las entradas y salidas digitales son otro recurso disponible en procesadores de señales digitales para la gestión de propósito general de los pines de entrada y salida. El módulo de control GPIO, por sus siglas en inglés General Purpose Input Output, controla el MUX de E/S digital del dispositivo. Este gestiona los pines de entrada y salida compartidos para permitir una aplicación más versátil.

El dispositivo con el que se va a trabajar dispone de 6 puertos de entradas y salidas (E/S). Permite multiplexar hasta 12 señales periféricas en un solo pin habilitado.

Desde el punto de vista hardware de este recurso, las entradas y salidas hardware están completamente separada, conectándose solo en el pin. El muxing periférico tiene lugar lejos del pin. Esto ofrece a la CPU y los CLA,

por sus siglas en inglés Control Law Accelerator, leer el estado físico del pin independientemente de la gestión que esté desempeñando la CPU o los periféricos. La interrupción extarne a partir de la actividad periférica es otra de las opciones que ofrece este recurso.

5.2.1.3 Comunicaciones

Con el objetivo de conectarse al dispositivo DSP y poder monitorear cualquier prueba que se quiere implementar en él, existe una comunicación o conexión a través de emulador. El nombre de este emulador es XDS100, del fabricante Texas Instruments.

Este emulador proporciona acceso JTAG de interfaz USB de bajo costo. Es compatible con diversos entornos de desarrollo como Code Composer Estudio™ o MATLAB/Simulink. Existen tres versiones de emuladores. En este caso la versión empleada es la XDS100v2, que consiste en un diseño actualizado de la versión XDS100v1, con más capacidad. Esto supone que las descargas de programas o datos llevarán más tiempo que con emuladores de versiones anteriores.

Posee las siguientes características:

- Funciones de depuración (Emulación Conectar / Desconectar, Lectura / Escritura de memoria, Lectura de registros, Cargar programa, Ejecutar, Detener, Paso, Soporte de punto de interrupción de software y hardware, Modo en tiempo real)
- Compatible con Code Composer Studio™, MATLAB/Simulink.
- Soporte para objetivos con voltajes IO de 1.8v y 3.3v.
- Compatibilidad con los modos de inicio "JTAG reset" / "wait-in-reset" utilizando los dos pines EMU muestreados por el pin nTRST.
- Compatibilidad con los modos de arranque de "reinicio de encendido" utilizando los dos pines EMU muestreados por el pin TVD.
- Soporte para la configuración de las características del pin de la EMU a través de los cuadros de diálogo de configuración de las propiedades de conexión de Code Composer Studio™ similares a los del cable XDS560 Rev-D.
- Compatibilidad con la "detección de pérdida de energía de destino" a través del pin TVD incluso cuando Code Composer Studio™ no se está ejecutando, y aplicando los modos de inicio al inicio de Code Composer Studio™.
- Soporta traza ETB

Toda la información sobre este dispositivo ha sido adquirida desde la web propia del fabricante Texas Instruments. [XDS100v2](#)

5.2.2 Pineado

En las Tablas 4 a 7 se muestra una relación de los recursos empleados.

Entradas analógicas				
ID	Conector	Pin	Puerto	ADC
V_PIN	J3	23	A	14
V_IN		25	B	4
V_OUT		27	A	0
I_IN	J7	63	A	15
I_OUT		65	A	5
T_IGBT		67	A	3

T_COIL		69	A	4
--------	--	----	---	---

Tabla 3.- Relación de entradas analógicas para la aplicación final.

Entradas digitales			
ID	Conector	Pin	GPIO
R1K1	J5	43	87
R1K2		44	86
RST	J2	12	73
ONOFF		11	78
ERROR_D		19	4

Tabla 4.- Relación de entradas digitales para la aplicación final.

Salidas digitales			
ID	Conector	Pin	GPIO
1K1	J8	80	2
1K2		79	3
1K5		76	18
FAN	J5	47	65
LED1	J6	59	91
LED2		54	64
LED3		53	99
LED4		52	92

Tabla 5.- Relación de salidas digitales para la aplicación final.

Generación ePWM				
ID	Conector	Pin	GPIO	ePWM
G	J4	39	13	ePWM2 7B

Tabla 6.- Relación de salidas digitales ePWM para la aplicación final.

Mediante las Tablas 2-5 se establece la relación de recursos físicos empleados. Para la aplicación final ha sido necesario el empleo de placas de acondicionamiento y adaptación para que los niveles de tensión e intensidad de todas las magnitudes estén adaptados en el rango de pequeña señal, y que sean gestionables por esta placa de control.

Ha sido necesario el uso de instrumentación de sensado, protecciones, fuentes de alimentación para auxiliares y otros tipos de circuitos de acondicionamiento necesarios para poner en marcha este sistema en tiempo real.

Todo el material empleado para la puesta en marcha de la aplicación real ha sido proporcionado por el departamento de Tecnología Electrónica, grupo de Electrónica de Potencia.

5.3 MATALB Coder, Simulink Coder y Embedded Coder

La colaboración entre MATLAB Coder™, Simulink Coder™, y Embedded Coder® ha hecho posible la generación de código ANSI/ISO C/C++ que puede ser compilado y ejecutado en procesadores de Texas Instruments®. Embedded Coder permite configurar fácilmente código generado a partir de los algoritmos de MATLAB® y Simulink® para controlar las interfaces de software, optimizar el rendimiento de ejecución y minimizar el consumo de memoria.

Embedded Coder proporciona paquetes de soporte para diferentes plataformas TI, ID y RTOS. Las características varían dentro de cada paquete de soporte y pueden incluir compilación y ejecución automatizadas, código optimizado para cada procesador, la capacidad de realizar pruebas de procesador en bucle (PIL) con perfiles de ejecución, y bibliotecas de bloques periféricos en el chip y en la placa.

Dentro de la lista de dispositivos empleados, en el presente estudio se ha empleado el siguiente dispositivo: Microcontrolador C2000 Delfino. Los microcontroladores de 32 bits C2000 están diseñados para aplicaciones de control en bucle cerrado en tiempo real, tales como control de motores, fuentes de alimentación digitales, drivers industriales, e inversores solares. De entre las diferentes familias de microcontroladores, el empleado para esta aplicación y que posee compatibilidad con el paquete de soporte de codificador incorporado es la familia F2837xS.

La información presentada en el presente estudio sobre las diferentes herramientas software y los dispositivos empleados ha sido proporcionada por las webs propias de los fabricantes. [TI C2000 Support from Embedded Coder](#)

5.4 Fuente de tensión AMREL SPS800-18

Fuente de alimentación del fabricante AMREL, modelo SPS800-18. Dispositivo dispuesto por el departamento de Electrónica de Potencia, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, de la Universidad de Sevilla. Este dispositivo ha sido empleado para el montaje de la bancada durante la prueba del control de corriente. Se ha empleado como fuente de alimentación a la entrada del sistema.

Se trata de una fuente de alimentación con un elevado rendimiento y un bajo nivel de ruido. Resulta fácil de programar y precisa a la hora de proporcionar un suministro de energía. A continuación, se citan las principales especificaciones técnicas del equipo.

- Alta densidad de potencia. 15kW en un tamaño de 3U.
- Protección frente a caídas de tensión indeseadas.
- Elevada precisión en las medidas. Mediciones de tensión y corriente sin DMMs externos.
- Configuración a través de un panel que ofrece una navegación sencilla, y amplia gama de interfaces tales como programación analógica externa, GPIB y RS-232, y una conexión habilitada para Ethernet o USB.
- Tensión de salida máxima (V_{DC}): 800V
- Corriente de salida máxima (I_{DC}): 18A
- Rizado de tensión máxima (mV_{rms}): 300mVrms

En la Ilustración 28 se aprecia la apariencia física que presenta este dispositivo.



Ilustración 28.- Representación de la fuente de alimentación SPS800-18, fabricante AMREL.

5.5 Fuente de tensión AEMETEC MX45

Dispositivo cedido también por el departamento de Electrónica de Potencia, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, de la Universidad de Sevilla. La fuente de alimentación es del fabricante California Instruments, de la Serie MX. Este elemento ha sido empleado para el montaje de la bancada durante la prueba del control de corriente. Se ha empleado como fuente de alimentación a la salida del sistema debido a su naturaleza de comportamiento de fuente regenerativa.

La Serie MX de fuentes de alimentación de este fabricante contiene dispositivos de prueba de alta potencia de CA y CC. Emplea técnicas de conmutación de PWM de última generación. Compacta, robusta y funcional son algunas de las características atribuibles. Las principales especificaciones técnicas de este dispositivo de mencionan a continuación:

- Modelo MX45-3Pi. Potencia de salida AC: 45kVA
- Fases de salida: 1 & 3
- Rango de tensiones AC/DC: 150/200 & 300/400
- Modo salida DC:
 - Potencia 10kW por salida, 3 salidas. 30kW en el modo de un canal
 - Máxima corriente de salida 50-150A para el nivel bajo, y 25-75A para el modo alto configurado

A continuación, en la Ilustración 29 se muestra la apariencia que presenta el dispositivo.



Ilustración 29.- Representación de la fuente de alimentación MX45, fabricante California Instruments.

5.6 Emulador de paneles Keysight Technologies E4360A

Instrumento también cedido por el departamento de Electrónica de Potencia, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, de la Universidad de Sevilla. La fuente de alimentación es del fabricante California Instruments. SE

trata de una fuente de alimentación que se comporta de manera similar a un panel fotovoltaico. Este elemento ha sido empleado para el montaje de la bancada durante la prueba del control MPPT.

Se trata de una fuente de alimentación de CC programable de doble salida que simula las características de salida de un panel solar. Básicamente, es una fuente de corriente con una baja capacitancia de salida y capaz de simular la curva I-V de diferentes paneles fotovoltaicos bajo diferentes condiciones. Tiene la capacidad de proporcionar dos salidas y hasta 1200W en una pequeña envolvente de 2U de altura. Ofrece tres modos de funcionamiento, Simulador (SAS), Tabla y Fijo. Para simular con precisión la curva I-V de un panel fotovoltaico se debe seleccionar el modo SAS. Para el uso de una fuente de alimentación estándar, se emplea el modo fijo. Mediante el modo Table se obtiene una serie de puntos fijos que se pueden ejecutar uno tras otro.

Las principales especificaciones técnicas de este dispositivo se mencionan a continuación:

- Potencia máxima total de salida:
 - 1200W cuando opera con una tensión de entrada de 200-240 V_{AC}
 - 600W cuando opera con una tensión de entrada de 100-120 V_{AC}
- Entrada AC:
 - Rangos nominales de entrada: 100VAC-240VAC: 50/60/400Hz
 - Rango de entrada: 86VAC-264VAC
 - Potencia máxima de entrada: 2000VA, 2000W
- Simulación de cualquier tipo de energía solar
- Tamaño de 2U
- Salida de hasta 600W por unidad. Se dispone de dos unidades de salida
- Cambio rápido de curva I-V y de tiempo de conmutación de recuperación
- Características de protección:
 - Entrada INH: 5useg desde la recepción del inhibidor hasta el inicio de la desconexión
 - Fallo en las salidas desacopladas: <10useg desde la recepción del fallo hasta el inicio de la desconexión

A continuación, en la Ilustración 30 se muestra la apariencia que presenta el dispositivo.



Ilustración 30.- Representación del emulador de paneles E4360A, fabricante Keysight Technologies.

6 IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN

En el presente apartado se muestra todo el desarrollo de la aplicación realizado para llevar a cabo el proceso de evaluación de las diferentes técnicas de control sobre la bancada. Toda la programación y código generado se ha desarrollado con la herramienta MATLAB/Simulink y posteriormente volcada en la memoria de la placa de evaluación Delfino LAUNCHXL-F28377S. Finalmente los resultados obtenidos se podrán visualizar mediante un entorno SCADA desarrollado también con la herramienta software MATLAB/Simulink.

6.1 Modelado del sistema

Con el objetivo de generar todo el código de configuración necesario para configurar los recursos del dispositivo DSP se ha generado un archivo con extensión “.xls” donde se configura y se establecen todas las condiciones de contorno de la aplicación. A continuación, en la Ilustración 31 se pueden visualizar de manera general todos los bloques empleados en el modelo elaborado en Simulink.

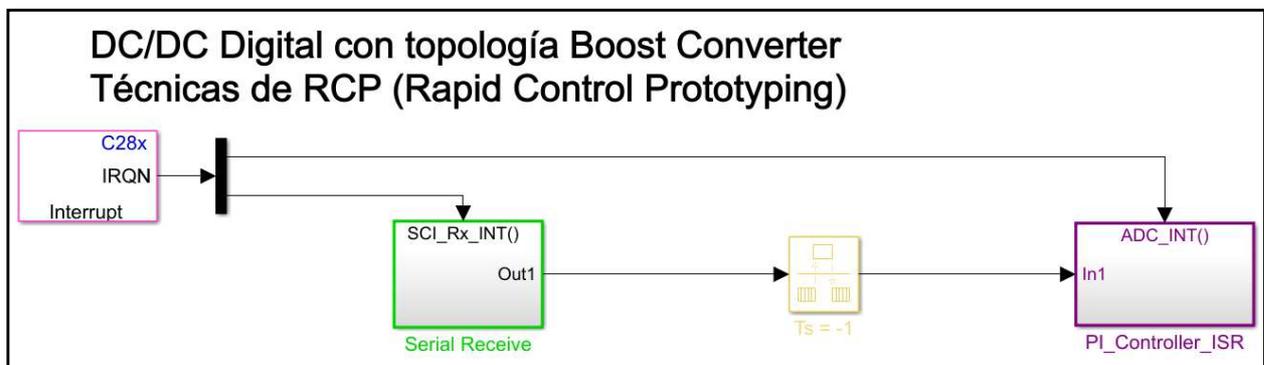


Ilustración 31.- Diagrama de bloques general del sistema de gestión de control.

De esta manera tan sencilla se gestiona todo el control de la aplicación del convertidor de potencia. Existe un bloque que configura las dos interrupciones que se producen en el dispositivo DSP. Dicho bloque, se encuentra representado mediante un bloque de color rosado. En él se configuran las prioridades y se habilitan las interrupciones del sistema.

La primera de las interrupciones programadas es la interrupción de las comunicaciones. En la Ilustración 31 está representada con el cuadrado de color verde. Este bloque gestiona la recepción de datos proveniente del sistema SCADA a través de protocolo serie, según se ha descrito en el apartado anterior.

La segunda de las interrupciones programadas gestiona la adquisición de las entradas analógicas. Dentro de este bloque se realiza el proceso de adquisición y tratamiento de señales analógicas, y posterior uso de las mismas con fines de control. Se ha programado de tal forma que la interrupción se ejecuta una vez que se ha asegurado de haber adquirido todas las señales ADCs configuradas. De esta forma, en el instante de ejecución del algoritmo de control, el sistema garantiza que las medidas adquiridas poseen valores coherentes y no se encuentra en un estado indeterminado el sistema. Está representado en la Ilustración 31 mediante el bloque de color morado.

De manera intermedia entra el bloque de comunicaciones y el bloque de gestión de la interrupción se encuentra un bloque de color amarillo. Es necesario introducir este bloque para adecuar las velocidades de comunicaciones entre subsistemas. Maneja la transferencia de datos entre puertos que operan a diferentes velocidades. Las opciones de configuración le permiten compensar el retardo de transferencia y la eficiencia del código para la seguridad y el determinismo de la transferencia de datos.

En la Ilustración 32 se aprecia el contenido de este bloque y de los diferentes subsistemas que integra en su interior.

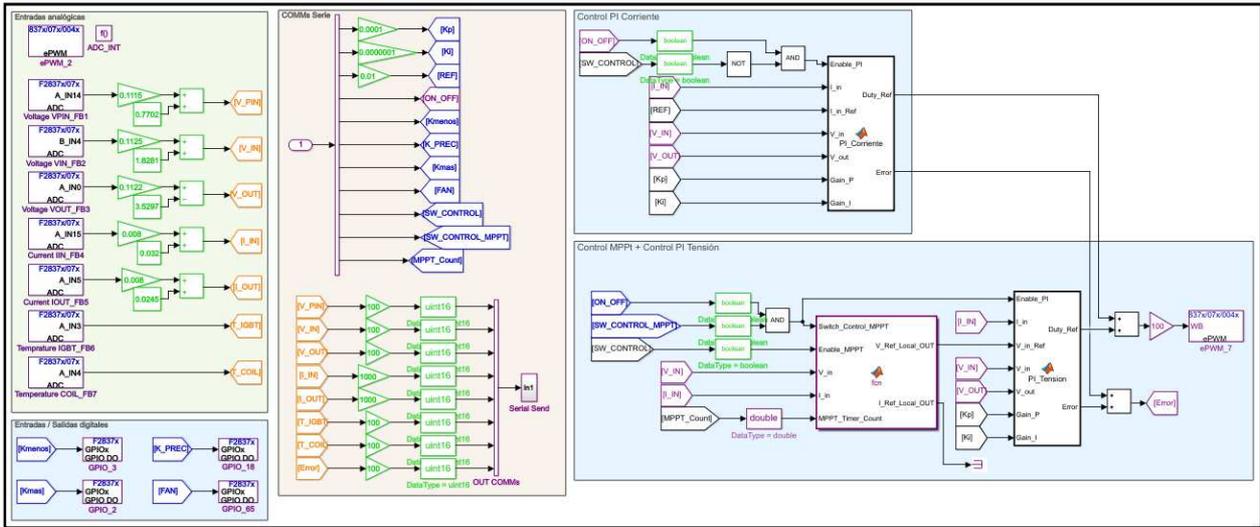


Ilustración 32.- Bloque de gestión de la subrutina de interrupción.

A continuación, se va a analizar por partes cada uno de los bloques que se observan dentro del modelo.

6.1.1 Bloque de adaptación y filtrado de señales analógicas

Este bloque contiene toda la configuración de los recursos gestionados por los ADC del sistema. Se han configurado 7 ADCs, de los puertos A y B. La precisión se ha configurado a 12 bits. Todos ellos están controlados por la temporización de contador ePWM2A. Cuando finaliza cada canal de adquisición su ventana de muestreo, generan una interrupción (INT1), haciendo que se ejecute una subrutina de adquisición donde se ejecuta el paso de parámetros de las magnitudes medidas, a variables internas del sistema.

Para la gestión de temporización o disparo de estos convertidores analógicos/digitales se ha empleado el ePWM2, configurado en cuenta ascendente, con recarga automática cuando pase por cero. El comparador que delimita la ventana de muestreo está configurado al 50% del valor de la cuenta ascendente. Los cambios de valor del comparador están establecidos para que siga la sombra. Esto implica que la modificación del valor de comparación del temporizador no se ejecuta en el instante en que cambia, si no cuando se produce el pase por cero.

Una vez las magnitudes analógicas han sido digitalizadas, estas se procesan mediante unos bloques de ganancia y otros de constante para gestionar el offset y finalmente se adecuan sus valores. Este bloque implementa una serie de ecuaciones que caracterizan los sensores analógicos empleados en la bancada. Mediante esta adecuación se linealiza la medida analógica adquirida y se establece una correlación entre las medidas adquiridas por el ADC y la medida real adquirida por la instrumentación del sistema. A continuación, esta medida linealizada se filtra mediante un filtro digital para obtener una magnitud libre de ruidos que se hubieran podido introducir en la aplicación. Este tipo de ruidos son propios de la electrónica analógica de instrumentación empleada. Debido a su naturaleza introducen una determinada incertidumbre en la medida. Sumado a esto, la electrónica de potencia implica una serie de conmutaciones en el sistema que implica una mayor adición de ruido eléctrico en el sistema.

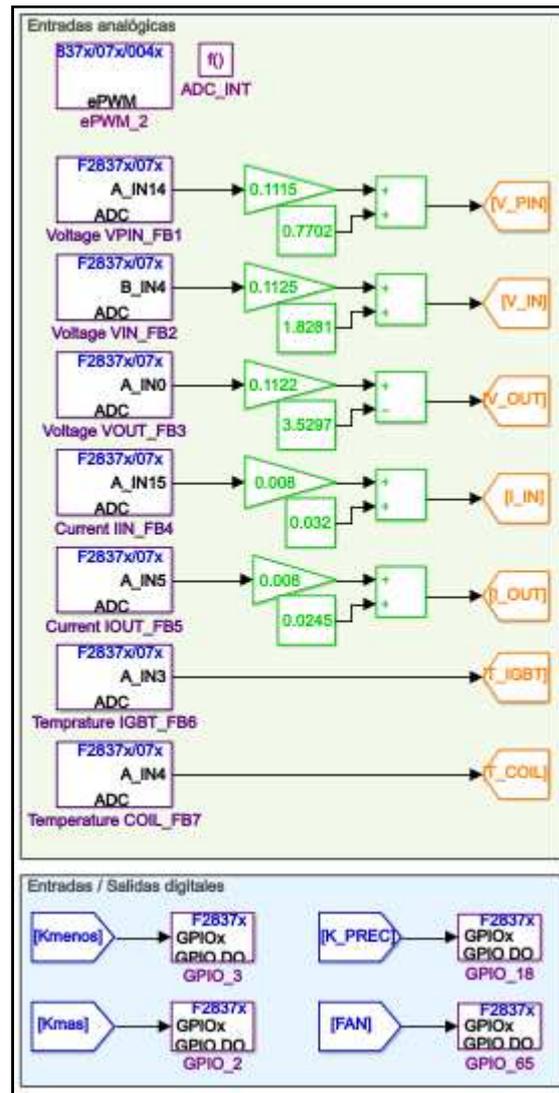


Ilustración 33.- Bloque de gestión de entradas analógicas, y entradas y salidas digitales.

Dentro de este bloque también se gestiona la entrada y salida de señales digitales. Para la aplicación que concierne este estudio se gestiona la apertura y cierre de contactores, negativo, positivo y precarga. Sumado a ello, también se gestiona el accionamiento del sistema de refrigeración.

A través de los bloques representados mediante color morado se configura el hardware del dispositivo DSP. Se adecua la manera en que se quiere procesar una señal o se quiere tener efecto sobre una salida.

6.1.2 Bloque de señales de comunicación

A través de este bloque se procesan las señales de comunicación a través de protocolo de comunicación Serie. Las señales que se observan en la parte superior se tratan de las señales adquiridas o comandadas desde el HMI. El entorno HMI también ha sido desarrollado mediante la herramienta Simulink. Se analizará en apartados posteriores. Las señales que se pueden comandar son las siguientes:

- Constantes K_p y K_i para sintonizar el control PI.
- Referencia que el control debe obtener como objetivo.
- Activación/Desactivación de la aplicación.
- Gestión de contactor negativo, precarga y positivo.
- Gestión del ventilador.

- Interruptores para la selección de un determinado control.
- Variable que gestiona la constante de tiempo de ejecución del algoritmo de control MPPT.

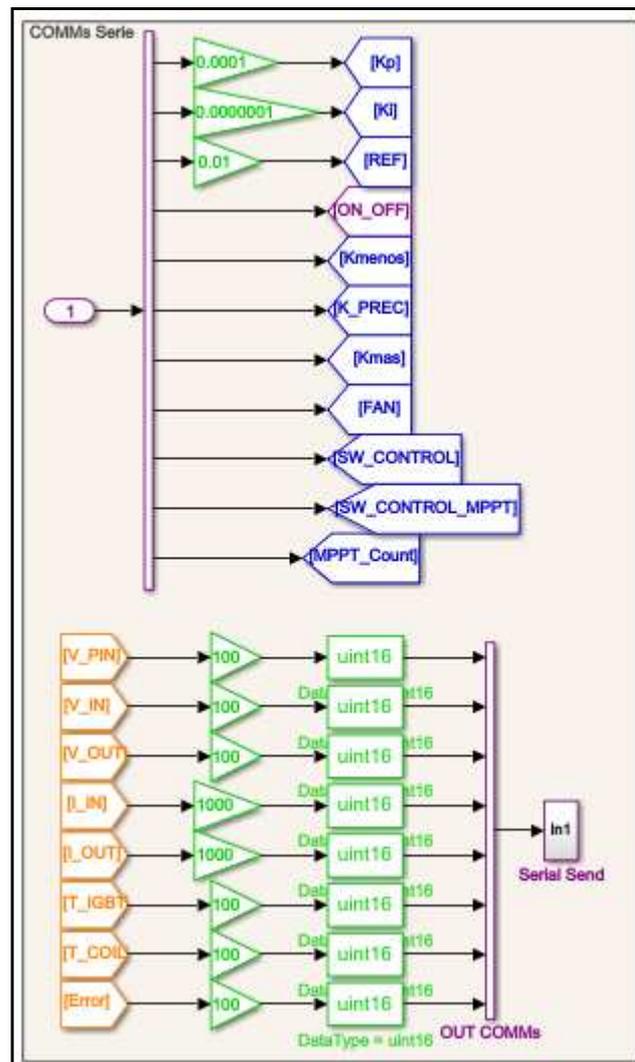


Ilustración 34.- Bloque de gestión de entradas y salidas de señales de comunicación.

En la parte inferior de la Ilustración 34 se observan las señales que se envían al HMI para supervisar el estado de funcionamiento del sistema. Las comunicaciones se realizan a través de intercambio de registros del tipo entero de 16 bits sin signo. Para ello, se aplican bloques de ganancia para proporcionar una precisión de dos o tres decimales a las medidas. A continuación, se muestra la lista de señales enviadas al HMI:

- Tensión de paneles.
- Tensión de bus de entrada DC.
- Tensión de bus de salida DC.
- Corriente de entrada DC.
- Corriente de salida DC.
- Temperatura del semiconductor IGBT.
- Temperatura de la bobina.
- Variable de error del control PI.

6.1.3 Bloque de control

Este bloque es el más importante y donde está implementada toda la lógica de control de la aplicación. Como señales de entradas, dispone de entradas analógicas y digitales de todo el sistema. Como señales de salida, se encuentra la señal de gestión que controla el ePWM que controla la apertura o cierre del semiconductor. Otra de las variables de salida es el error obtenido de la diferencia entre la referencia y la medida en tiempo real de la magnitud que se pretenda controlar.

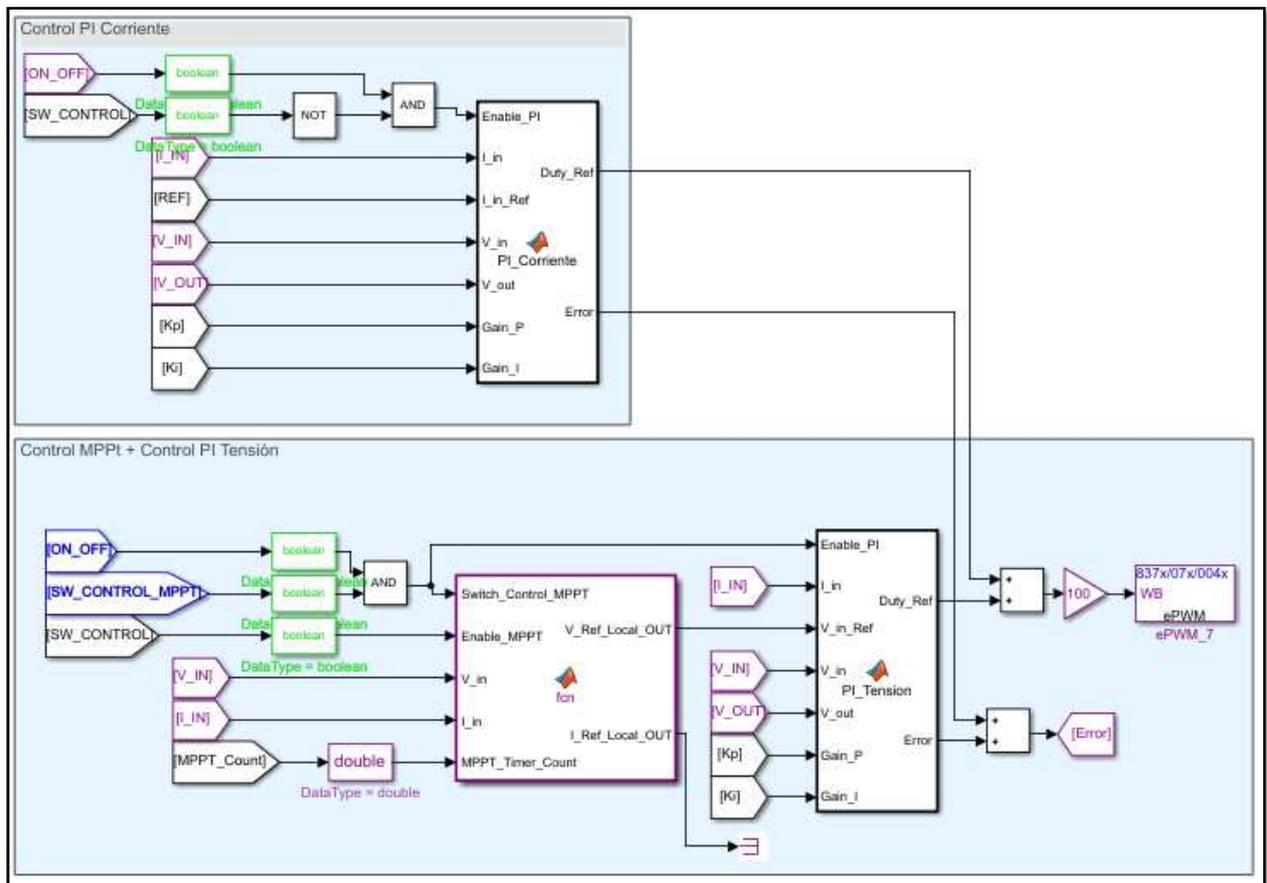


Ilustración 35.- Bloques de gestión de control de la aplicación.

Tres controles fundamentales están implementados. En la parte superior de la Ilustración 35 se encuentra el bloque de función de control PI de corriente desarrollado para esta aplicación. En la parte inferior de la Ilustración 35, se encuentra el bloque de función que implementa el algoritmo de MPPT, tanto el algoritmo de perturbar y observar, como el algoritmo de control incremental. A continuación, se muestra el algoritmo de control PI de tensión necesaria para estabilizar la magnitud de tensión resultante obtenida a través del algoritmo de MPPT.

El bloque que gestiona la señal de control que ataca el semiconductor es el ePWM7. Está configurado en cuenta ascendente y descendente. A una frecuencia de ejecución de 10kHz. La recarga del temporizador se produce cada vez que el contador pasa por 0. De los dos canales que tiene para gestionar el ePWM, se produce a través de canal B.

6.2 Técnicas de control

En el presente apartado se pretende realizar un análisis sobre las diferentes técnicas de control implementadas en la aplicación y de la forma que se han implementado en los diferentes bloques de Simulink. Mediante estos bloques o “Function Block”, se gestionan las entradas y salidas de este bloque, y en su interior se genera un fichero programado en lenguaje propio de MATLAB. Es un lenguaje escrito similar al lenguaje de programación C. Tres técnicas o algoritmos han sido desarrollados:

- Control Proporcional más Integral (PI) de gestión de Corriente.
- Algoritmo de Control de Máximo Punto de Tranferencia de Potencia (MPPT) mediante la técnica de Perturbación y Observación (P&O), más un Control Proporcional más Integral (PI) de gestión de Tensión.
- Algoritmo de Control de Máximo Punto de Tranferencia de Potencia (MPPT) mediante la técnica de Control Incremental, más un Control Proporcional más Integral (PI) de gestión de Tensión.

A continuación, desde la Ilustración 36 a la Ilustración 43 se muestra el código generado para cada una de los tres algoritmos de control.

6.2.1 PI gestión de Corriente

El “Function Block” se inicia con la declaración de la función empleada. En esta declaración se definen las entradas y salidas de la función, y el nombre de la función. En este caso “PI_Corriente”.

```
1      %Control PI Corriente
2      function [Duty_Ref, Error] = PI_Corriente(Enable_PI, I_in, I_in_Ref, V_in, V_out, Gain_P, Gain_I)
```

Ilustración 36.- Declaración de la función “PI_Corriente”.

A continuación, se procede con la inicialización de las variables empleadas en el interior del bloque. Las variables definidas como “Persistent” se consideran variables estáticas. Una variable estática tiene la característica que, durante el tiempo de ejecución, si la ejecución del programa sale de la función y vuelve a entrar, su valor no varía en espacio de memoria.

```
4      %Declaración%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5      persistent Enable_Ini;
6      persistent Integral Err_I_Old I_in_AUX Rampa;
7
8      %Inicialización%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
9      if isempty(Enable_Ini)
10     Integral=0.0;
11     Err_I_Old=0.0;
12     Err_I=0.0;
13     Pre_Duty=0.0;
14     I_in_AUX=0;
15     Rampa=0.00001;
16     Enable_Ini=1;
17 end%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Ilustración 37.- Declaración e inicialización de variables de la función “PI_Corriente”.

El algoritmo tiene implementado una función rampa. Esta controla la rapidez de la evolución con la que la variable de control alcanza la variable de referencia.

El siguiente paso es el cálculo del error que se calcula como la diferencia en ese instante entre la variable de control y la variable de referencia. Una vez calculado, se procede con el cálculo del error integral. El método de integración empleado para este control es el de “Tustin o trapezoidal”.

Con estas dos magnitudes y el valor de las dos variables de control Kp y Ki sintonizadas, se ejecuta la función de control. Las variables de control Kp y Ki, en el algoritmo están representadas como “Gain_P” y “Gain_I”.

Una vez calculada, la variable de control para que tenga efecto sobre la salida, y por consiguiente en el ciclo de trabajo del semiconductor del circuito de electrónica de potencia, se implementa una saturación para que el ciclo de trabajo no supere el 95% de trabajo. También se ha realizado una saturación por debajo para que no se haga negativo y tenga efectos indeseados o no conocidos en el controlador. En esta saturación tiene repercusión en el cálculo del factor de error integral de la función de control. Esta variable se limita para que el cálculo de ese valor no tienda a infinito y se desestabilice el controlador.

```

19 %Algoritmo PI: Tensión
20 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
21 if (Enable_PI)
22     if ((I_in_Ref-I_in_AUX)>Rampa)
23         I_in_AUX=I_in_AUX+Rampa;
24     elseif ((I_in_Ref-I_in_AUX)<=-Rampa)
25         I_in_AUX=I_in_AUX-Rampa;
26     else
27         I_in_AUX=I_in_Ref;
28     end
29     Err_I=I_in_AUX-I_in;
30     Integral=Integral+Gain_I*0.5*(Err_I+Err_I_Old);
31     Pre_Duty=Gain_P*Err_I+Integral;
32     if (Pre_Duty>0.95)
33         Duty_Ref=0.95;
34         Integral=Integral-0.95;
35         if (Integral<0)
36             Integral=0;
37         end
38     elseif (Pre_Duty<0)
39         Duty_Ref=0;
40         Integral=Integral-Pre_Duty;
41         if (Integral>0)
42             Integral=0;
43         end
44     else
45         Duty_Ref=Pre_Duty;
46     end
47     Err_I_Old=Err_I;
48 else
49     Duty_Ref=0;
50     Integral=0;
51     Err_I_Old=0;
52     I_in_AUX=0;
53 end
54 Error=Err_I_Old;
55 end
    
```

Ilustración 38.- Algoritmo de control de la función “PI_Corriente”.

Por lo demás, el algoritmo implementa una serie de comandos, funciones que determinan si se ejecuta o no el control y el valor que deben mantener las variables para determinar un correcto funcionamiento del sistema.

6.2.2 MPPT P&O

Este algoritmo de control se puede determinar en dos funciones claramente diferenciadas. Una función es la del algoritmo MPPT P&O, donde se determina el valor de la variable de control para obtener la referencia. Con el objetivo de que esos cambios o variaciones no se produzcan de manera brusca, se le ha añadido una función de control PI de tensión.

Para este “Function Block” se ha decidido emplear un bloque común a ambos algoritmos de control MPPT. Las principales magnitudes que gestionan son comunes, por tanto, se ha decidido compartir recursos.

```

1 %Control Punto Máxima Transferencia de Potencia
2 function [V_Ref_Local_OUT, I_Ref_Local_OUT] = MPPT(Switch_Control_MPPT, Enable_MPPT, V_in, I_in, MPPT_Timer_Count)
    
```

Ilustración 39.- Declaración de la función “MPPT”.

Esta función tiene como salidas las variables de referencia, tanto de tensión como de intensidad, debido a que dependiendo de la bancada con la que se haya montado para realizar las diferentes pruebas de validación de los algoritmos de control, se emplea una variable u otra. Esto depende de si se ha empleado una fuente de alimentación común, o se ha empleado una fuente emuladora de paneles.

```

4      %Declaración%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5 -    persistent Enable_Ini;
6 -    persistent Incremento_V V_Ref_Local V_in_Old P_in_Old
7 -    persistent MPPT_Timer %MPPT_Timer_Count
8 -    persistent I_in_Old
9 -    persistent I_Ref_Local Incremento_I_inc Incremento_I_dec
10
11     %Inicialización%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
12 -    if isempty(Enable_Ini)
13         %Control P&O
14 -        Incremento_V=2;
15 -        V_Ref_Local=0;
16 -        V_in_Old=0;
17 -        P_in_Old=0;
18 -        P_in=0;
19 -        MPPT_Timer=0;
20 -        %MPPT_Timer_Count=10000;
21         %Control CI
22 -        AV=0;
23 -        AI=0;
24 -        I_in_Old=0;
25
26 -        I_Ref_Local=0;
27 -        Incremento_I_inc=0.5;
28 -        Incremento_I_dec=1;
29 -        Enable_Ini=1;
30     end%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Ilustración 40.- Declaración e inicialización de variables de la función “MPPT”.

La variable “MPPT_Timer_Count” aparece como un comentario ya que se ha configurado para que sea una variable controlada por el HMI de usuario. Esto se hace con la finalidad de que se pueda modificar ese parámetro y ver cómo influye en la estabilización de este algoritmo de control.

Se calcula la variable de referencia de potencia como fruto del producto de la tensión de entrada y la intensidad del panel fotovoltaico en ese instante. Dependiendo del valor obtenido y comparando este valor con el anterior obtenido en la interacción interior, se determina si se mantiene la referencia o se modifica. El criterio de modificación dependerá de la tensión o intensidad, dependiendo del montaje de la bancada, como se ha mencionado anteriormente. En función de este criterio, se hará una variación porcentual de la variable de control y esta será la salida del bloque de control MPPT.

Todo esto se ejecuta en cada ciclo de iteración, dependiendo del ciclo de tiempo que determine el usuario a través del HMI.

```

64 -   if Switch_Control_MPPT
65 -       %Algoritmo MPPT: Pertubar y observar (CORRIENTE)
66 -       %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
67 -       if Enable_MPPT&&MPPT_Timer>MPPT_Timer_Count
68 -           P_in=V_in*I_in;
69 -           if P_in-P_in_Old == 0
70 -               I_Ref_Local=I_Ref_Local;
71 -           else
72 -               if P_in-P_in_Old > 0
73 -                   if I_in-I_in_Old > 0
74 -                       I_Ref_Local=I_Ref_Local+Incremento_I_inc;
75 -                   else
76 -                       I_Ref_Local=I_Ref_Local-Incremento_I_dec;
77 -                   end
78 -               else
79 -                   if I_in-I_in_Old > 0
80 -                       I_Ref_Local=I_Ref_Local-Incremento_I_dec;
81 -                   else
82 -                       I_Ref_Local=I_Ref_Local+Incremento_I_inc;
83 -                   end
84 -               end
85 -           end
86 -           P_in_Old=P_in;
87 -           I_in_Old=I_in;
88 -       else
89 -           if Enable_MPPT==0
90 -               I_Ref_Local=I_in;
91 -               I_in_Old=0;
92 -               P_in_Old=0;
93 -               MPPT_Timer=0;
94 -           end
95 -       end%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
96 -   else%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Ilustración 41.- Algoritmo de control de la función “MPPT P&O”.

Dependiendo de la señal de control que se obtenga de este bloque, si es tensión o intensidad, se empleará un bloque de control PI de tensión o corriente. En el apartado anterior se describió el funcionamiento de un control PI de corriente. Para este caso se va a describir el funcionamiento de un bloque de control PI de tensión.

Al igual que en el control PI de corriente, se ejecuta una función rampa en el inicio. A continuación, se calculan los errores de tensión en el instante actual y en el instante anterior. Se ejecuta la función de control, teniendo en cuenta las variables de sintonización del control K_p y K_i . Con todo esto, se determina una magnitud de control, que está saturada para evitar efectos indeseados.

```

19 %Algoritmo PI: Tensión
20 ~~~~~
21 - if (Enable_PI)
22 -     if ((V_in_Ref-V_in_AUX)>Rampa)
23 -         V_in_AUX=V_in_AUX+Rampa;
24 -     elseif ((V_in_Ref-V_in_AUX)<=-Rampa)
25 -         V_in_AUX=V_in_AUX-Rampa;
26 -     else
27 -         V_in_AUX=V_in_Ref;
28 -     end
29 -     Err_V=V_in_AUX-V_in;
30 -     Integral=Integral+Gain_I*0.5*(Err_V+Err_V_Old);
31 -     Pre_Duty=Gain_P*Err_V+Integral;
32 -     if (Pre_Duty>0.95)
33 -         Duty_Ref=0.95;
34 -         Integral=Integral-0.95;
35 -         if (Integral<0)
36 -             Integral=0;
37 -         end
38 -     elseif (Pre_Duty<0)
39 -         Duty_Ref=0;
40 -         Integral=Integral-Pre_Duty;
41 -         if (Integral>0)
42 -             Integral=0;
43 -         end
44 -     else
45 -         Duty_Ref=Pre_Duty;
46 -     end
47 -     Err_V_Old=Err_V;
48 - else
49 -     Duty_Ref=0;
50 -     Integral=0;
51 -     Err_V_Old=0;
52 -     V_in_AUX=0;
53 - end
54 - Error=Err_V_Old;
55 - end

```

Ilustración 42.- Algoritmo de control de la función “PI_Tension”.

6.2.3 MPPT CI

Por último, queda comentar el algoritmo de control MPPT CI o control incremental. Dentro de los algoritmos de control, este es uno de los más efectivos, ya que presenta un comportamiento bastante bueno ante cambios bruscos de referencia. El único inconveniente que presenta este algoritmo es la potencia de procesado que requiere, ya que necesita ejecutar cálculos de cierta complejidad.

Como primer paso, se calculan los diferenciales de tensión e intensidad, comparando los valores en el instante actual y en el instante anterior. Si el diferencial de tensión resulta ser nulo, se considera la diferencia de intensidad. Si esta diferencial de intensidad resulta ser nula también, la variable de referencia no se actualiza. Sin embargo, si el diferencial de corriente es mayor que cero, se incrementa la variable de control mediante la adición de un factor proporcional. Esta acción repercute en un aumento de la tensión de referencia V_{REF} . Por el contrario, si el diferencial de corriente es menor que cero, se decrementa la variable de control, y por tanto la tensión de referencia V_{REF} , mediante la sustracción de un factor proporcional.

En caso contrario, si el diferencial de tensión resulta ser diferente de cero, se tiene en cuenta la comparación

entre la relación de diferenciales de tensión respecto de la intensidad, y por otro lado, la relación de la corriente con respecto a la tensión en el instante actual. Se tiene en cuenta la igualdad entre ellas. Si son iguales no se produce variación sobre la variable de referencial. Si se produce una diferencia entre ambas, se tiene en cuenta el signo. En función del criterio de signo, se ejecuta una variación porcentual de la variable de referencia.

```

97      %Algoritmo MPPT: Control incremental
98      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
99      if Enable_MPPT&&MPPT_Timer>MPPT_Timer_Count
100         AV=V_in-V_in_Old;
101         AI=I_in-I_in_Old;
102         if AV==0
103             if AI==0
104                 V_Ref_Local=V_Ref_Local;
105             else
106                 if AI>0
107                     V_Ref_Local=V_Ref_Local+Incremento_V;
108                 else
109                     V_Ref_Local=V_Ref_Local-Incremento_V;
110                 end
111             end
112         else
113             if (AI/AV)==-(I_in/V_in)
114                 V_Ref_Local=V_Ref_Local;
115             else
116                 if (AI/AV)>-(I_in/V_in)
117                     V_Ref_Local=V_Ref_Local+Incremento_V;
118                 else
119                     V_Ref_Local=V_Ref_Local-Incremento_V;
120                 end
121             end
122         end
123         V_in_Old=V_in;
124         I_in_Old=I_in;
125         MPPT_Timer=MPPT_Timer+1;
126     else
127         if Enable_MPPT==0
128             V_Ref_Local=0;
129             V_in_Old=0;
130             I_in_Old=0;
131             MPPT_Timer=0;
132         end

```

Ilustración 43.- Algoritmo de control de la función “MPPT CI”.

Resulta uno de los algoritmos MPPT más complejos en cuanto a dificultad de procesado. Sin embargo, es uno de los que ofrece una mejor respuesta.

Como salida de este algoritmo de control MPPT debe existir un Function Block de implemente un control PI de tensión, ya que resulta la variable de control empleada.

Estos algoritmos son ejemplos de los diferentes algoritmos de control que se podrían haber implementar para esta aplicación. Se ha determinado el uso de estos tres de manera arbitraria, y con la finalidad de demostrar las capacidades que se podrían alcanzar.

6.3 HMI

El interfaz creado para el usuario se muestra en la Ilustración 44. Se trata de una interfaz gráfica implementada

con los recursos que ofrece la herramienta Simulink. Cabe destacar que esta herramienta no presenta un potencial muy desarrollado en esta funcionalidad en comparación con otras herramientas software más específicas para el desarrollo de aplicaciones SCADA. Se hace mención a la aplicación LabView como aplicación ejemplo para desarrollo de sistemas de monotreo y control de sistemas. El interfaz desarrollado para la aplicación que se presenta ha resultado bastante útil.

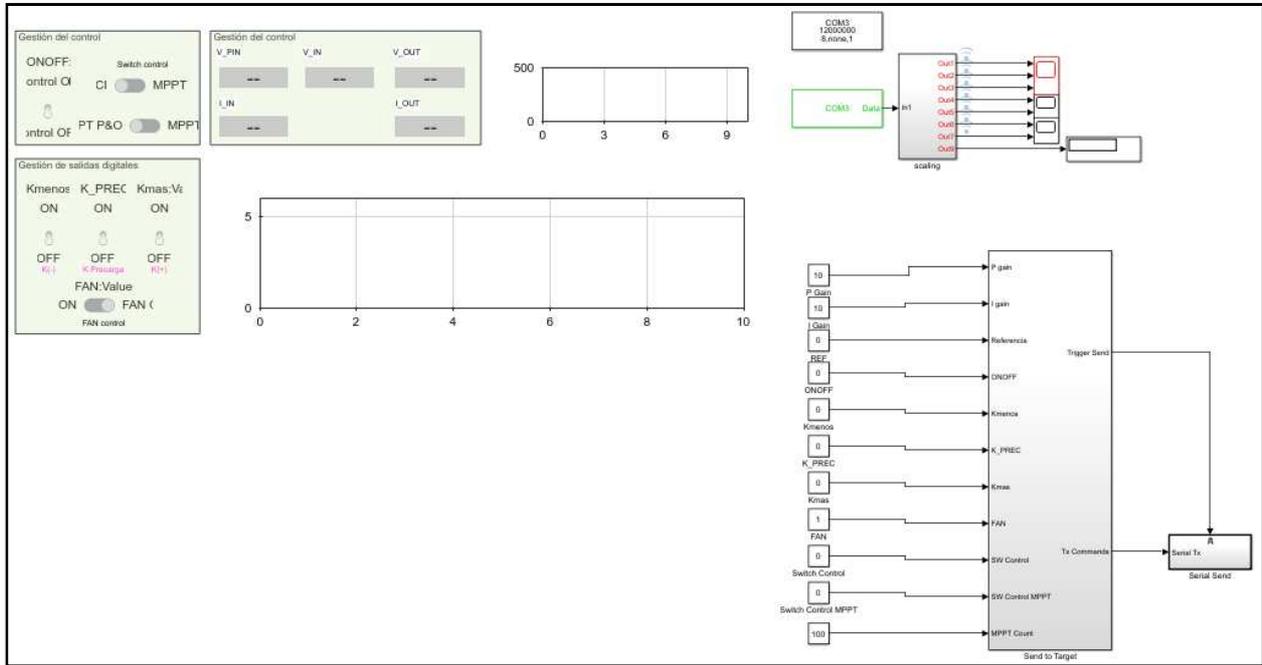


Ilustración 44.- Representación del interfaz de usuario para la aplicación.

Los principales controles que se presentan son:

- Gestión del control
- Gestión de salida digitales
- Principales magnitudes
- Gráficos de principales magnitudes
- Gestión de las comunicaciones Serie

Cada una de estas partes es de utilidad para que el usuario que gestione la aplicación sea capaz de interactuar con el sistema y tener información en tiempo real del estado, pudiendo realizar unas determinadas acciones sobre el mismo.

Mediante el bloque “Gestión del control”, el usuario puede actuar sobre la configuración general del sistema. Habilita o deshabilita si se ejecuta control sobre el sistema. Este bloque se muestra en detalle en la Ilustración 43. Puede seleccionar el tipo de control que se pretende ejecutar en el sistema de entre los tres tipos de controles implementados mediante la aplicación. Estos controles no tienen funcionalidad de bloqueo o gestión de las variables internas del sistema ante cambios del selector de una opción a otra. Esto afecta en que, si se está ejecutando un control y se decide cambiar el control en tiempo real, puede que las consecuencias sean indeseadas. Por tanto, se requiere que los cambios de tipo de control a ejecutar se hagan siempre y cuando el selector de “ON/OFF” este en la posición off.

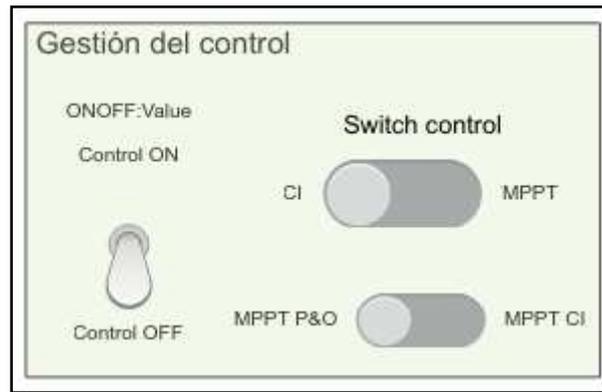


Ilustración 45.- Detalle del HMI para gestión del control de la aplicación.

A través del bloque “Gestión de salidas digitales” el usuario puede ser capaz de gestionar las salidas digitales del sistema que gestionan los contactores de la aplicación. El detalle de este bloque se representa en la Ilustración 46. Estos interruptores activan los contactores, negativo, positivo y pre-carga del sistema. El usuario debe ser capaz de ejecutar la maniobra de pre-carga con el objetivo de no dañar el condensador de bus DC Link instalado a la entrada del convertidor. Esta maniobra consiste en introducir en primera instancia el contactor negativo. Seguidamente el contactor de precarga. Se debe visualizar en el display indicador de la tensión DC Link que aumenta el valor de la tensión progresivamente. Cuando alcance un valor de un tanto por ciento con respecto a la tensión de entrada del convertidor, es cuando el usuario debe introducir el contactor positivo, y seguidamente retirar el contactor de pre-carga. Es entonces cuando las tensiones a la entrada del convertidor y en el bus DC Link deben ser la misma. Mediante esta ventana de gestión, también se actúa sobre el funcionamiento del sistema de refrigeración, donde el único control que se tiene es de activación o desactivación del ventilador.



Ilustración 46.- Detalle del HMI para gestión de las salidas digitales de la aplicación.

En la ventana de “Principales magnitudes” el usuario puede comprobar el estado del sistema en cuanto a las magnitudes de tensión e intensidad. En la Ilustración 47 se muestra el detalle de este bloque. Los valores se proporcionan como tipo flotante, por lo que la precisión de la magnitud es de dos decimales. Esta precisión viene determinada por el formato de registro de comunicación serie que está establecido. Las tramas que se envían y se reciben son de tipo de dato entero de 16 bits sin signo. Para ganar una precisión de dos decimales en el envío de la magnitud, se multiplica por 100 y, en la recepción, se divide entre 100. De esa manera, se obtiene un número de tipo flotante, partiendo de un entero.

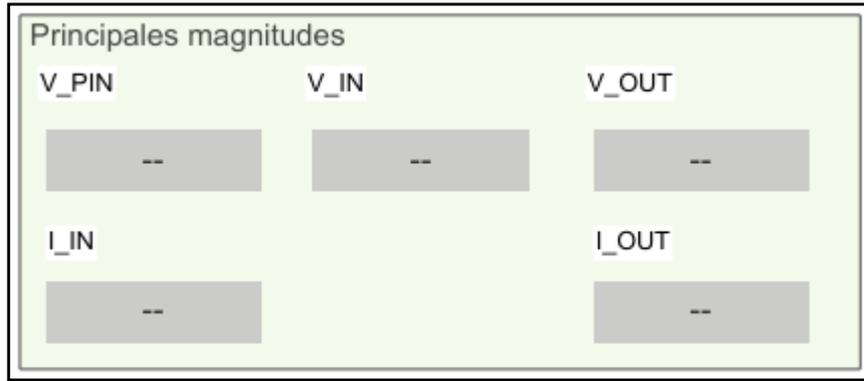


Ilustración 47.- Detalle del HMI para gestión de las principales magnitudes de la aplicación.

Existen dos ventanas “Gráficos de las principales magnitudes”. En uno de ellos, se pueden visualizar las tensiones de entrada del convertidor, del DC Link, y la tensión de salida del sistema. En el otro gráfico, se representa la corriente de entrada y salida del sistema. El gráfico de mayor tamaño es el destinado a la visualización de corrientes, ya que es la principal magnitud que tiene repercusión en los controles del sistema. En estos gráficos, durante la ejecución del HMI, se puede realizar zoom o desplazamiento a través del mismo debido a un buffer de almacenamiento de datos de la magnitud correspondiente.

Por último, se encuentra la “Gestión de las comunicaciones Serie” donde el usuario puede configurar los parámetros correspondientes a este protocolo de comunicación entre el HMI y la bancada de la aplicación. En detalle de este bloque se muestra en la Ilustración 48.

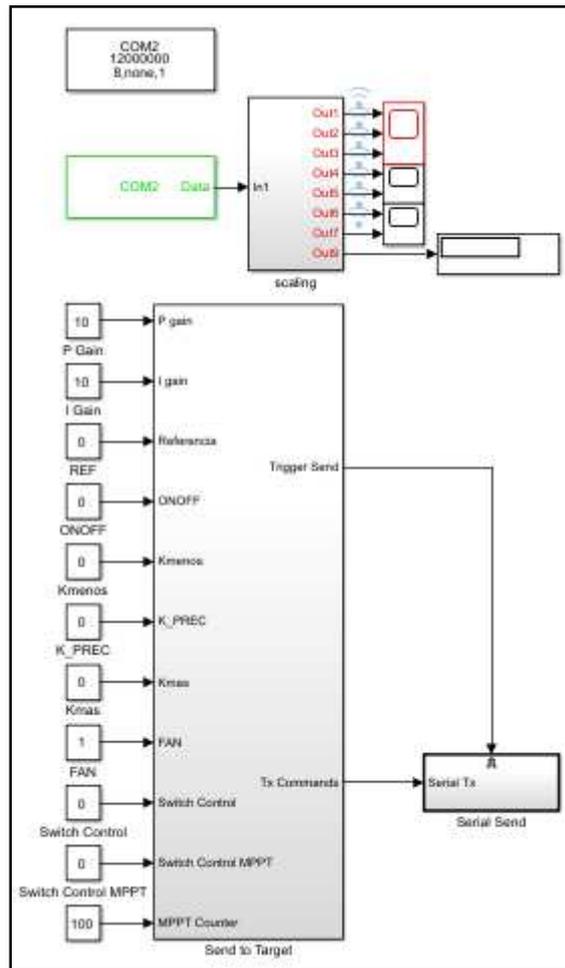


Ilustración 48.- Detalle del HMI para gestión de las comunicaciones Serie de la aplicación.

Los principales parámetros de configuración de este protocolo de comunicación se muestran en la Ilustración 49.

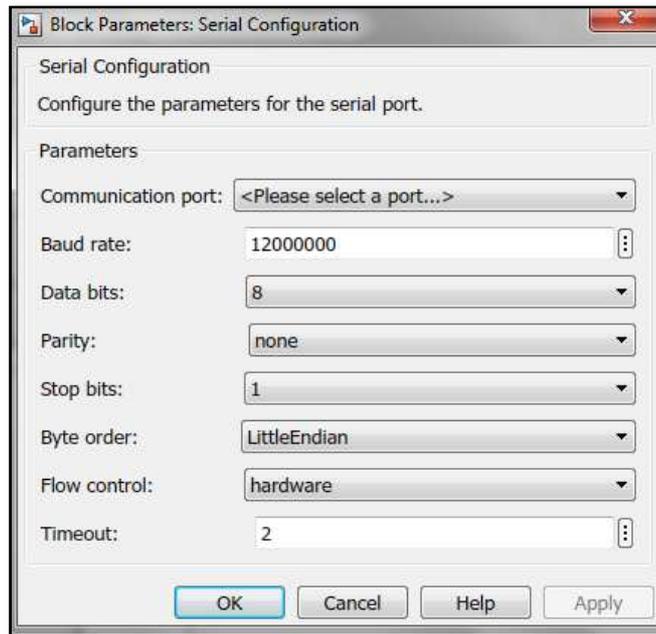


Ilustración 49.- Configuración de los parámetros de comunicación del protocolo Serie.

Los registros que se observan en esta Ilustración 48 son los registros configurables que se envían desde el HMI hasta la bancada de la aplicación. Como se mencionó en párrafos anteriores, la unidad configurada para la comunicación es el tipo de dato entero de 16 bits sin signo. Algunas de estas magnitudes se introducen como tipo de dato flotante, y también se realiza un escalado de la misma, para adecuar la comunicación. La relación de parámetros que se envía es:

- Ganancias de control PI (K_P y K_I). Tipo de dato flotante. Factor de escala de 0.0001 y 0.0000001 respectivamente.
- Referencia. Tipo dato flotante. Factor escala 0.01.
- ON/OFF, K_{menos} , K_{PREC} , K_{mas} , FAN, Switch Control, y Switch Control MPPT. Tipo de dato entero 16 bits sin signo.
- MPPT Counter. Tipo de dato entero 16 bits sin signo.

7 RESULTADOS

7.1 PI gestión de Corriente

El objetivo de esta prueba consiste en la ejecución del algoritmo de control proporcional más integral para un control de corriente y la posterior obtención y representación de los resultados obtenidos en dichas pruebas.

La instrumentación empleada para la realización de la prueba es la siguiente.

- Fuente AMREL SPS800-18
- Fuente California AEMETEC MX45

Los dispositivos empleados para la obtención de resultados y validación son los listados a continuación

- Captura de pantalla del escritorio
- Fotografía a través de un dispositivo móvil

A través de uso de la captura de pantalla del PC de usuario se pretende demostrar que el algoritmo se comporta de la manera que se espera y se valida el funcionamiento del HMI. Mediante el dispositivo móvil se han realizado diferentes fotos y vídeos de la aplicación en funcionamiento. Se adjuntarán como pruebas obtenidas las capturas de vídeo o fotos tomadas. Como documentación anexa al proyecto se adjuntarán vídeos que prueban el correcto funcionamiento.

Se plantea realizar como prueba la aplicación de una serie de escalones de potencia comandados a través de referencias de corriente mediante el HMI. Como resultado se obtendrá un perfil de corrientes que deberá suministrar la fuente conectada a la entrada de la bancada.

Las tensiones a la entrada y salida son:

- Tensión V_{IN} : 300V_{DC}
- Tensión V_{OUT} : 400V_{DC}

Las referencias de potencia que se le van a comandar a la aplicación no superarán el kilowatio de potencia.

Se realizan los siguientes escalones de referencia de corriente.

- Referencia corriente: 1A
- Referencia corriente: 1.5A
- Referencia corriente: 0.5A
- Referencia corriente: 1.8A
- Referencia corriente: 0.2A
- Referencia corriente: 1.5A
- Referencia corriente: 0A

Esta secuencia pretende analizar los cambios de referencia, el tiempo que tarda en alcanzar la referencia, la estabilidad del sistema cuando alcanza el régimen permanente y la búsqueda de referencia en torno a valores de 0A.

La Ilustración 50 representa el montaje de la bancada. El convertidor de potencia junto con las protecciones y la instrumentación de sensado se encuentran en el interior de la caja de protección de metal. La fuente DC es el dispositivo de color blanco situado en la parte inferior del cajón del convertidor. En la parte derecha se observa el PC de usuario empleado para la ejecución de la aplicación HMI.

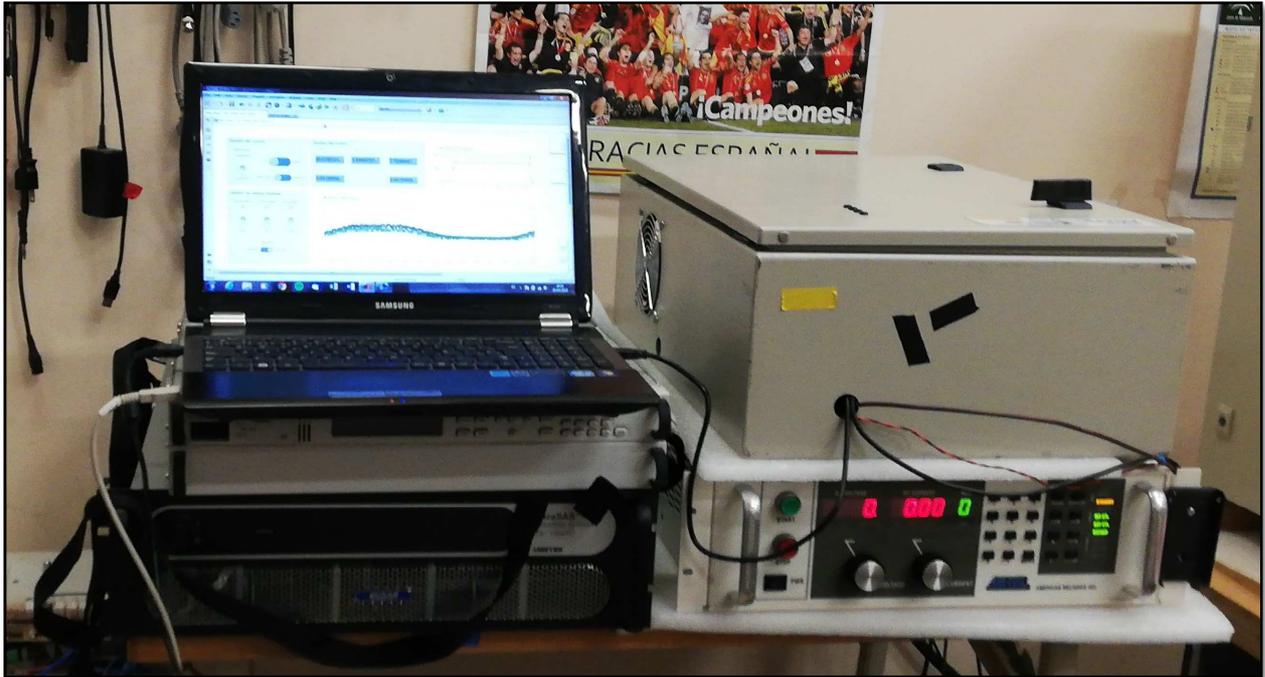


Ilustración 50.- Detalle de la bancada instalada en el interior de la caja junto con la fuente DC y el PC de usuario con el HMI en ejecución.

En esta misma imagen se pueden apreciar los dos dispositivos que se emplearán para la validación de los otros dos algoritmos de control. Se trata de los dispositivos de color blanco y negro respectivamente debajo del PC de usuario. Estos dispositivos son emuladores de paneles solares.

Una vez planteada la prueba, se muestran los resultados obtenidos. En la Ilustración 51 se muestra la etapa de pre-carga mencionada en apartados anteriores. Se observa en la gráfica que representa las tensiones como se establecen los dos escalones de tensión en la magnitud de tensión en el bus DC Link.

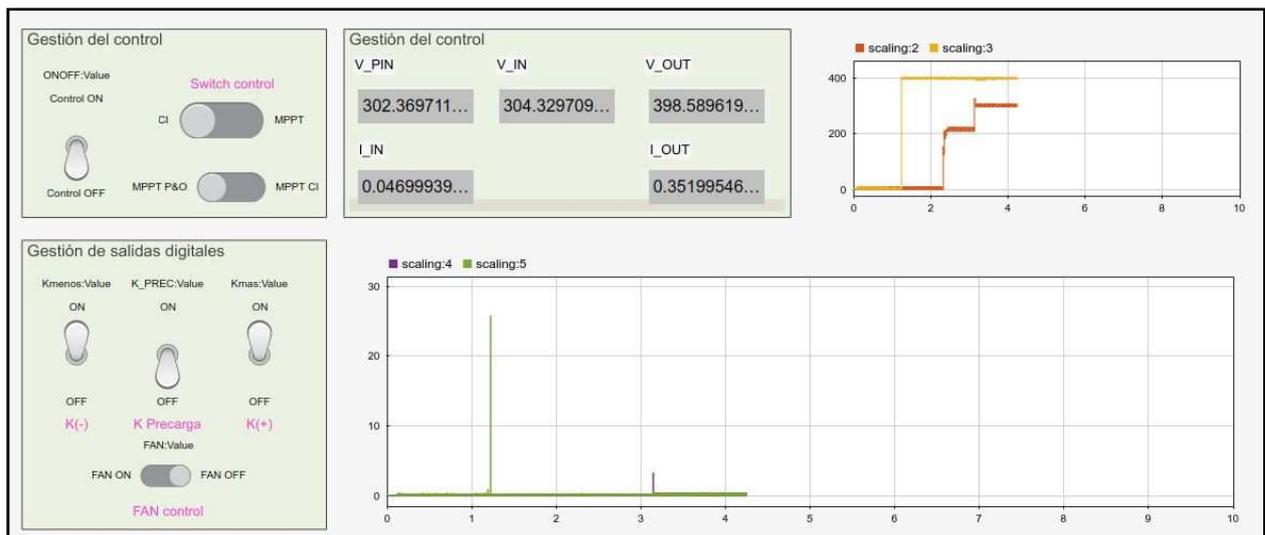


Ilustración 51.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación donde se muestran los resultados tras realizar la maniobra de pre-carga.

En la Ilustración 50 se muestran los resultados obtenidos tras la realización del tren de puntos de referencia mencionados con anterioridad. El sistema se comporta tal como se espera, alcanzado en un tiempo de unos ~25segundos las referencias introducidas por teclado. Una vez alcanzada la referencia, el sistema se comporta estable en torno a la referencia. El régimen permanente no presenta oscilación debido a que el efecto del término integral en el control está bien sintonizado. Se evalúan las referencias en torno a un valor de referencia de 0.

Estas referencias se consideran de fondo de escala. El sistema alcanza las referencias las referencias en un período de tiempo de unos ~25 a 30 segundos, dependiendo del origen de la referencia anterior, y no presenta oscilación ninguna. En la Ilustración 52 se muestra la captura de pantalla tras la realización del “terminating” de HMI de la aplicación implementado en Simulink. Mencionar que los “terminating” que se han obtenido han sido de varios minutos, ya que la cantidad de datos recopilados han sido voluminosos.

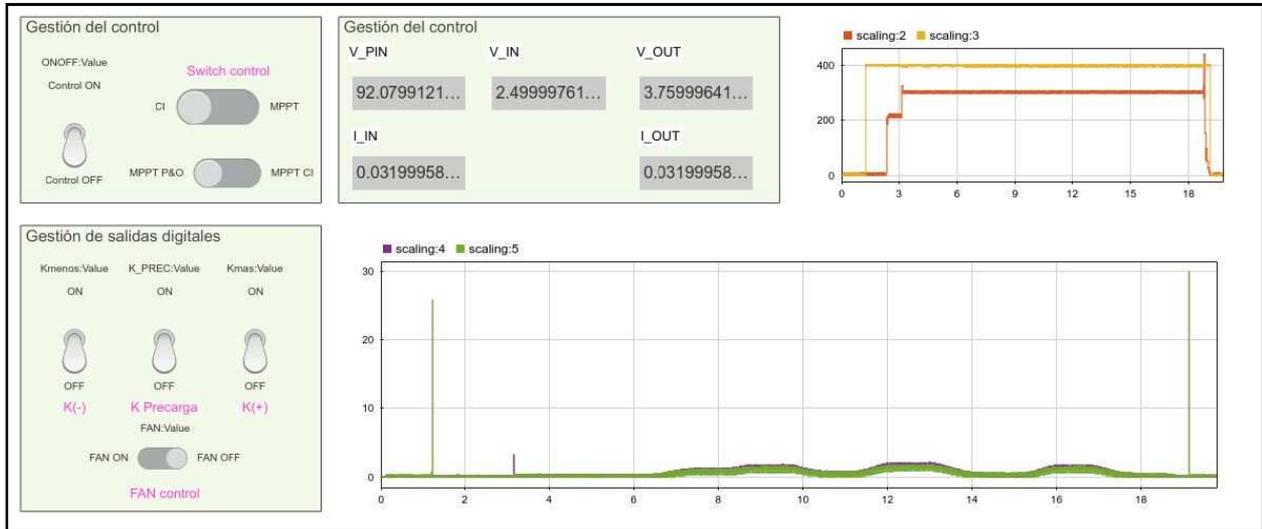


Ilustración 52.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación tras la realización de la prueba.

Se observa en estas curvas que resultan poco visible las magnitudes de corrientes de entrada y salida del sistema, en color morado y verde respectivamente. Esto se debe a que, al recopilar todos los datos de la prueba, se registran también los picos de intensidad en las maniobras de apertura y cierre de contactores. En la gráfica que representa las tensiones de entrada en el DC-Link y salida se presentan correctamente la evolución de las tensiones durante la prueba. Como se muestra en la captura del HMI, los contactores se encuentran abiertos y el control desactivado una vez que ha finalizado la prueba. En adelante se mostrarán en detalle, realizando una ampliación de la gráfica de las corrientes para analizar el detalle algunos de los puntos de referneicas alcanzados.

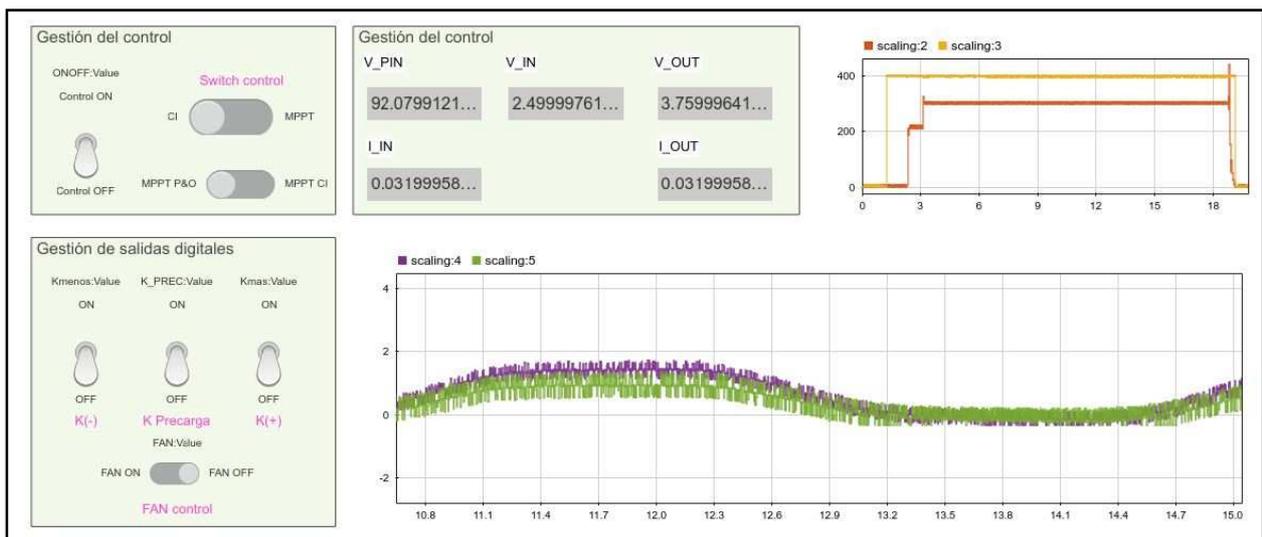


Ilustración 53.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle de los puntos de referencia 1.8A y 0.2A.

En la Ilustración 53, se muestran en detalle el punto de referencia alcanzado de 1.8A. Se observa como la referencia no oscila en torno a la referencia. Se llega de manera muy estable, sin sobreoscilaciones. Las fluctuaciones que se aprecian son debidas a las medias segmentadas o digitalizadas. Se deben a la recepección de datos mediante comunicaciones y el cálculo para obtener los dos decimales de precisión. A continuación, la

referencia comandada es la de 0.2A, donde se pretende comprobar el comportamiento de la aplicación ante referencias que oscilen cercanas a un punto de inestabilidad. Podría existir la posibilidad de que el sistema se desestabilizase en torno a este punto, pero por el contrario se observa como se alcanza y se mantiene de manera estable.

Cabe mencionar que la duración de la prueba ha sido en torno a los 4 minutos. No se han producido inconvenientes algunos durante la realización de la misma. La sintonización del control que se ha probado para la prueba ha proporcionado una estabilidad al sistema aceptable. Si se hubiera sintonizado mal, con el cambio de referencia posiblemente se hubieran obtenido inestabilidades obteniendo un comportamiento indeseado. Estas inestabilidades pueden llegar a dañar al equipo al hacerlo trabajar en rangos para los que no está preparado. Mencionar que la fuente de tensión instalada a la salida del sistema se comporta como fuente regenerativa y tiene la capacidad de absorber la energía proveniente del convertidor. De haber funcionado mal, debido al deterioro de algún componente, el convertidor probablemente hubiera tenido problemas al no tener donde vaciar la energía acumulada en la bobina. Provocando la explosión de los semiconductores instalados y el deterioro de algunos otros componentes pasivos.

De manera complementaria a los resultados mostrados en el presente apartado, se adjunta en la carpeta de archivos anexos un vídeo donde se puede visualizar toda la evolución de la prueba. Este vídeo ha sido realizado mediante el teléfono móvil del autor del presente proyecto.

7.2 MPPT P&O

El objetivo de esta prueba consiste en la ejecución del algoritmo de control para la obtención del máximo punto de transmisión de potencia mediante al algoritmo de perturbar y observar. Los resultados que se muestra a continuación son el resultado de la implementación y ejecución del algoritmo a través de un control PI sobre la tensión de entrada del convertidor.

Instrumentación empleada para la realización de la prueba:

- Emulador de paneles Keysight Technologies E4360A
- Fuente California AEMETEC MX45

Métodos empleados para la obtención de resultados y validación:

- Captura de pantalla del escritorio
- Fotografía a través de un dispositivo móvil

A través de uso de la captura de pantalla del PC de usuario se pretende demostrar que el algoritmo se comporta de la manera que se espera y se valida el funcionamiento del HMI. Mediante el dispositivo móvil se han realizado diferentes fotos y vídeos de la aplicación en funcionamiento. Se adjuntarán como pruebas obtenidas las capturas de vídeo o fotos tomadas. Como documentación anexa al proyecto se adjuntarán vídeos que prueban el correcto funcionamiento.

Se plantean realizar dos pruebas para validar el funcionamiento completamente:

- Alcanzar un punto de máxima transferencia de potencia.
- Alcanzar un tren de puntos de máxima transferencia de potencia.

La primera prueba se ha configurado para que el sistema implemente el siguiente punto de máxima transferencia de potencia, **tensión 136V** e **intensidad 3.1A**. Mediante el HMI se configura para que el sistema se comporte mediante el algoritmo mencionado.

En la Ilustración 54 se observa una captura de pantalla del HMI de la aplicación. Se ha modificado en cierta medida para la realización de esta prueba de una manera más eficaz.

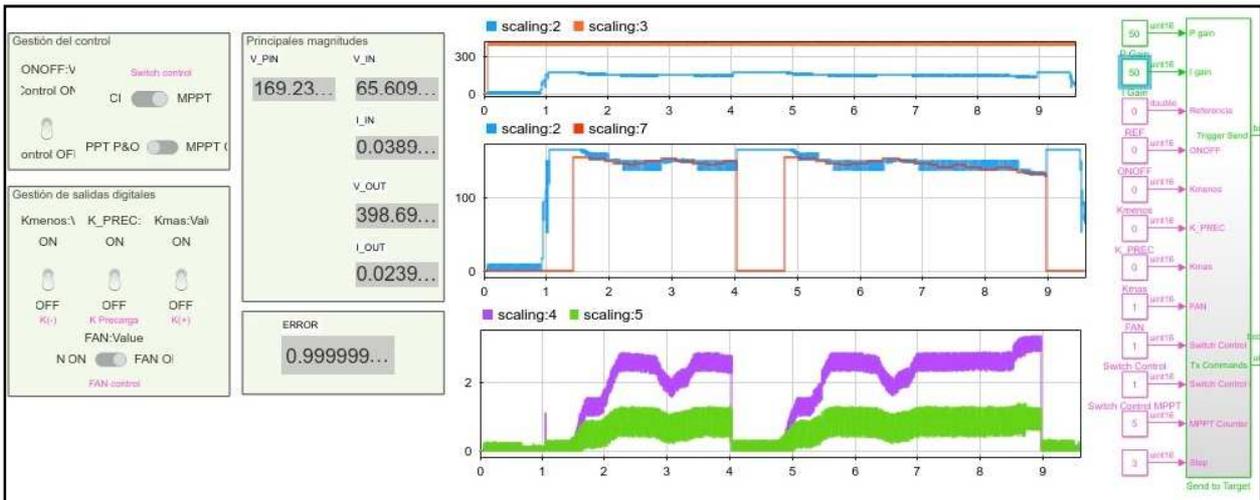


Ilustración 54- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle como se ha alcanzado el punto de referencia de máxima transferencia de potencia.

En la anterior captura se muestra que se ha alcanzado este punto por dos veces de manera continuada. Se observa una oscilación en torno a este punto debido a la oscilación propia provocada por el algoritmo de MPPT, perturbar y observar. El sistema se comporta de manera estable. Las constantes que han sido necesarias para sintonizar el sistema son las siguientes:

- Constante K_P : **0.0005**
- Constante K_I : **0.0000005**
- **Tiempo de ejecución** algoritmo MPPT: **5 seg**
- **Escalones de perturbación** algoritmo: **3V**

Estos parámetros son configurables en tiempo real sobre el HMI de la aplicación. Por tanto, el usuario puede sintonizar el sistema según le interese y obtener conclusiones de las diferentes configuraciones que pueda realizar. Para este caso estos son los valores que se han seleccionado para obtener este resultado. Con estos valores configurados se observa como el control PI alcanza la referencia antes del siguiente escalón de ejecución del MPPT. Se podría haber configurado de manera diferente.

La tensión al inicio de la prueba está impuesta por la fuente del emulador de paneles. Su valor está situado en torno a 170V. Durante la prueba este valor fue disminuyendo hasta alcanzar el punto donde se hace máxima la transferencia de potencia. Los valores de tensión en torno a este punto están entre 146V y 150V. En cuanto a la corriente, los valores en torno a los que oscila para el punto de máxima transferencia de potencia están situados entre 2.5A y 2.6A. La máxima potencia extraída para este punto es de 364W.

Alcanzada esta prueba con resultados favorables, se plantea la segunda prueba en la que se pretende someter a un tren de puntos de máxima transferencia de potencia. Se pretende validar la capacidad de respuesta del sistema ante una situación algo más desfavorable. Entre punto y punto se ha determinado un período de 10 segundos. Los puntos de referencia a los que se va a someter son:

- Tensión: **136V**; corriente: **3.1A**; potencia **421.6W**
- Tensión: **150V**; corriente: **3.4A**; potencia **360W**
- Tensión: **165V**; corriente: **2A**; potencia **330W**
- Tensión: **140V**; corriente: **3.5A**; potencia **490W**
- Tensión: **100V**; corriente: **3.8A**; potencia **380W**
- Tensión: **80V**; corriente: **3.8A**; potencia **304W**
- Tensión: **130V**; corriente: **2.8A**; potencia **364W**

- Tensión: **100V**; corriente: **3.3A**; potencia **330W**
- Tensión: **120V**; corriente: **2A**; potencia **240W**
- Tensión: **150V**; corriente: **3.1A**; potencia **465W**
- Tensión: **100V**; corriente: **3A**; potencia **300W**

Interesa mencionar que la configuración de los parámetros sintonizables del sistema se ha dejado igual. Una vez realizada la prueba y obtenidos los resultados del “terminating” del modelo de Simulink, estos son los resultados obtenidos.

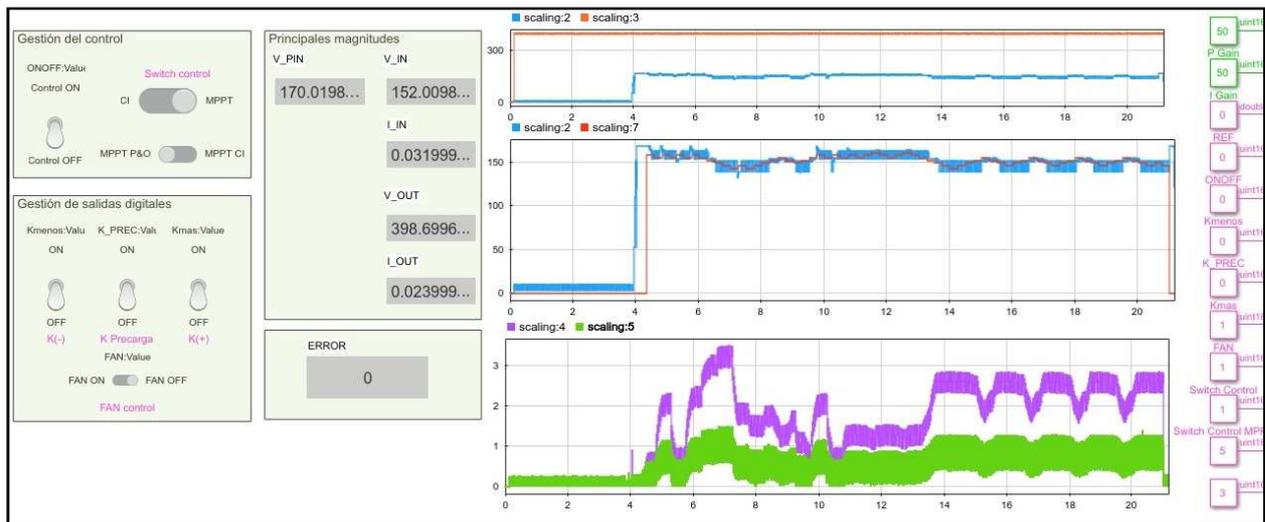


Ilustración 55.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle como se ha alcanzado el tren de puntos de referencia de máxima transferencia de potencia.

La Ilustración 55 muestra los resultados obtenidos. En la gráfica superior se muestra de forma más representativa las tensiones correspondientes al tren de puntos. La gráfica situada en la parte central muestran la tensión de entrada mediante la curva de color azul, y la referencia determinada por el algoritmo de control mediante la curva de color naranja. Resulta muy orientativa porque se plasma como la tensión de paneles sigue la referencia determinada por el algoritmo MPPT. En la gráfica situada en la parte inferior del HMI, se muestra las corrientes de entrada y salida del sistema, representadas en color morado y verde respectivamente. Una vez ejecutado el tren de puntos, el sistema parece que se queda anclado en el punto de máxima transferencia de potencia determinado en la primera parte de este apartado.

En la parte superior izquierda se pueden visualizar los ajustes que determinan la ejecución del control mediante un algoritmo de MPPT con el modo de perturbar y observar. La captura está realizada una vez el control está detenido, por lo que el selector se encuentra en la posición off.

Como conclusión de esta prueba, destacar que el sistema ha superado favorablemente este ensayo de implementación de un algoritmo de control MPPT, con el modo de perturbar y observar, seguido de un control PI de tensión. Los tiempos de respuestas han sido aceptables. Tiempos de cambios de referencia del MPPT están configurados en períodos de 5 segundos, cuando los cambios de puntos de referencia son de 10 segundos. En la anterior prueba se validó que se alcanzaba correctamente el punto de referencia antes de que se variase a la siguiente referencia el MPPT.

Como refuerzo de los resultados obtenidos se dispone de una grabación realizada mediante el uso de un dispositivo móvil de la prueba. El archivo de vídeo se puede encontrar en la carpeta de Anexos del proyecto.

7.3 MPPT CI

El objetivo de esta prueba consiste en la ejecución del algoritmo de control para la obtención del máximo punto de transmisión de potencia mediante el algoritmo de control incremental. Los resultados que se muestra a

continuación son el resultado de la implementación y ejecución del algoritmo a través de un control PI en la tensión.

Para la ejecución de esta prueba se ha empleado la misma instrumentación y metodología que para la prueba referida en el apartado 7.2. Se han realizado las mismas evaluaciones que en el caso anterior, se ha alcanzado el punto de máxima transferencia de potencia, y con posterioridad se ha evaluado el comportamiento del algoritmo de control expuesto a un tren de puntos de transferencia de máxima potencia.

En la Ilustración 56 se observa una captura de pantalla del HMI de la aplicación. Se ha modificado en cierta medida para la realización de esta prueba de una manera más eficaz.

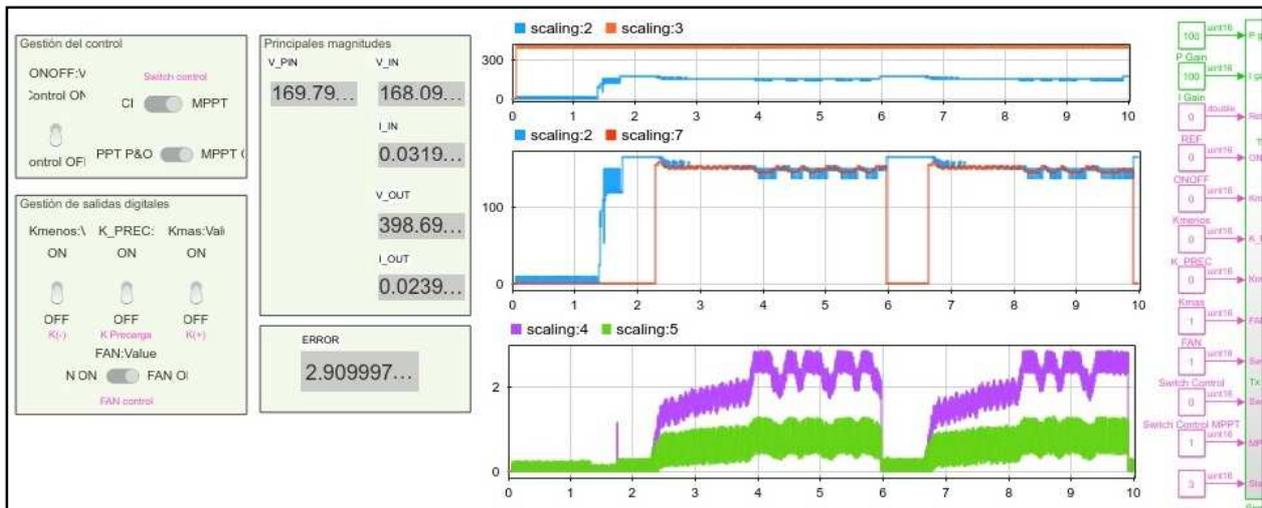


Ilustración 56.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle como se ha alcanzado el punto de referencia de máxima transferencia de potencia.

En la anterior captura se demuestra que se ha alcanzado este punto por dos veces de manera continuada. Se observa una oscilación en torno a este punto debido a la oscilación propia provocada por el algoritmo de MPPT, control incremental. El sistema se comporta de manera estable. Las constantes que han sido necesarias para sintonizar el sistema son las siguientes:

- Constante K_P : **0.001**
- Constante K_I : **0.000001**
- **Tiempo de ejecución** algoritmo MPPT: **1 seg**
- **Escalones de perturbación** algoritmo: **3V**

Estos parámetros son configurables en tiempo real sobre el HMI de la aplicación. Por tanto, el usuario puede sintonizar el sistema según le interese y obtener conclusiones de las diferentes configuraciones que pueda realizar. Para este caso estos son los valores que se han seleccionado para obtener este resultado. Con estos valores configurados se observa como el control PI alcanza la referencia antes del siguiente escalón de ejecución del MPPT. Se podría haber configurado de manera diferente.

La tensión al inicio de la prueba está impuesta por la fuente del emulador de paneles. Su valor está situado en torno a 170V. Durante la prueba este valor fue disminuyendo hasta alcanzar el punto donde se hace máxima la transferencia de potencia. Los valores de tensión en torno a este punto están en torno a los 156V. En cuanto a la corriente, los valores en torno a los que oscila para el punto de máxima transferencia de potencia están situados entre 2.3A y 2.4A. La máxima potencia extraída para este punto es de 374W.

El rendimiento para este control parece ser algo peor que para el algoritmo MPPT de perturbar y observar. De todas formas, se confirma, como se analizó en apartados anteriores que este tipo de algoritmo requiere una potencia de computación más elevada, y el tiempo de reacción del sistema debe ser más reducido.

Se plantea la segunda prueba en la que se pretende someter a un tren de puntos de máxima transferencia de potencia. Se quiere validar la capacidad de respuesta del sistema ante una situación algo más desfavorable. Entre

punto y punto se ha determinado un período de 10 segundos. Los puntos de referencia a los que se va a someter son:

- Tensión: **136V**; corriente: **3.1A**; potencia **421.6W**
- Tensión: **150V**; corriente: **3.4A**; potencia **360W**
- Tensión: **165V**; corriente: **2A**; potencia **330W**
- Tensión: **140V**; corriente: **3.5A**; potencia **490W**
- Tensión: **100V**; corriente: **3.8A**; potencia **380W**
- Tensión: **80V**; corriente: **3.8A**; potencia **304W**
- Tensión: **130V**; corriente: **2.8A**; potencia **364W**
- Tensión: **100V**; corriente: **3.3A**; potencia **330W**
- Tensión: **120V**; corriente: **2A**; potencia **240W**
- Tensión: **150V**; corriente: **3.1A**; potencia **465W**
- Tensión: **100V**; corriente: **3A**; potencia **300W**

La configuración de los parámetros sintonizables del sistema se ha dejado igual que la prueba anterior. Una vez realizada la prueba y obtenidos los resultados del “terminating” del modelo de Simulink, se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Ilustración 57.

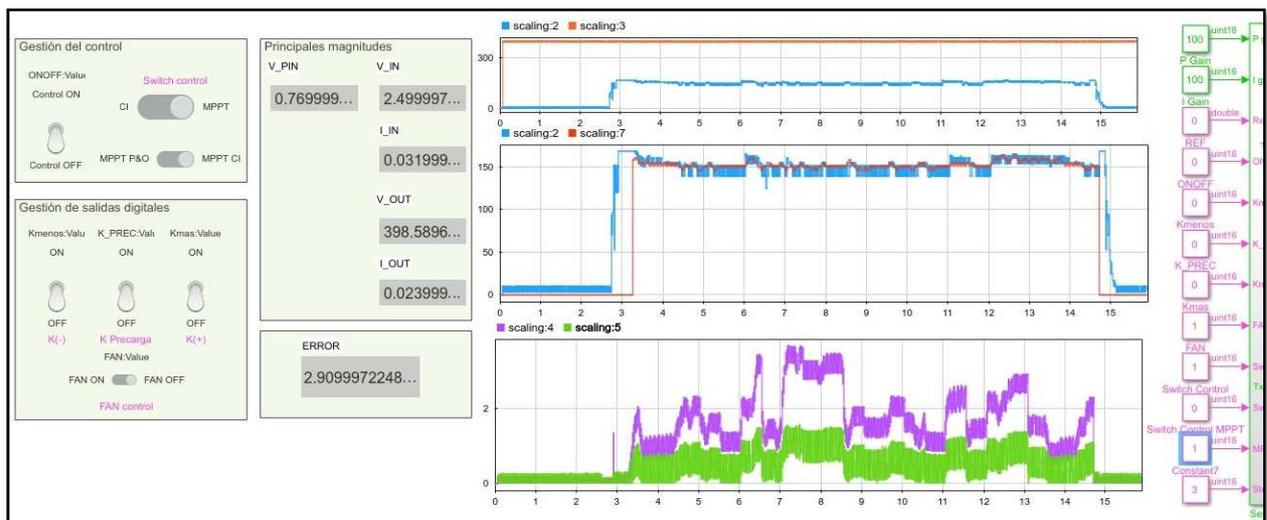


Ilustración 57.- Captura de pantalla del HMI de la aplicación que muestra el detalle como se ha alcanzado el tren de puntos de referencia de máxima transferencia de potencia.

La gráfica situada en la parte central muestra la tensión de entrada mediante la curva de color azul, y la referencia determinada por el algoritmo de control mediante la curva de color naranja. Se aprecia como el sistema sigue fielmente a la referencia marcada por el algoritmo. Las oscilaciones en forma de escalones, o ruido de cuantización, se deben a la precisión en las comunicaciones. Si se pudiera tener más precisión en esta magnitud, se vería mucho más estable la señal. En la gráfica situada en la parte inferior del HMI se muestra las corrientes de entrada y salida del sistema, representadas en color morado y verde respectivamente. Una vez ejecutado el tren de puntos, el sistema parece que se queda anclado en el punto de máxima transferencia de potencia determinado en la primera parte de este apartado.

En la parte superior izquierda se pueden visualizar los contactores que determinan la ejecución del control mediante un algoritmo de MPPT con el modo control incremental. La captura está realizada una vez el control está detenido, por lo que el selector se encuentra en la posición off.

Como conclusión de la prueba destacar que el sistema ha enfrentado correctamente el tren de puntos de máxima transferencia de potencia. El tiempo de respuesta se considera aceptado ante cambios de referencia. Queda

pendiente el estudiar diferentes valores de sinotnización del controlador para validar si se comporta mejor o peor en comparación con el algoritmo MPPT de Perturbar y Observar. A priori, el resultado obtenido muestra que este controlador obtiene de manera menos precisa el punto de máxima transferencia de potencia cuando se le presupone un mejor comportamiento según se ha explicado teóricamente en el apartado 6.2.3.

Como refuerzo de los resultados obtenidos se tiene una grabación realizada mediante el uso de un dispositivo móvil de la prueba realizada. El archivo de vídeo se puede encontrar en la carpeta de Anexos del proyecto.

8 ANÁLISIS DEL PROYECTO

En el presente apartado se agruparán de forma esquemática los aspectos más relevantes del proyecto.

8.1 Factores clave a tener en cuenta

8.1.1 Estudio de Rapid Control Prototyping

Estudio de las diferentes técnicas de simulación en tiempo real. Mediante el presente proyecto se ha profundizado en el conocimiento de la técnica de RCP y su aplicación en el mundo industrial. Se ha realizado una comparativa con las opciones reales que se pueden encontrar en la industria mediante un estudio del arte.

8.1.2 Aplicación en bancada

Adaptación de todo el hardware de una bancada real y posterior integración con el desarrollo software desarrollado para la aplicación. Estudio de los recursos con el objetivo de conocer en profundidad el funcionamiento de la bancada. Realización de batería de pruebas para la obtención de resultados reales para una posterior validación.

8.2 Problemas encontrados

Uno de los principales problemas que se han encontrado durante la implementación de los modelos en el entorno de simulación Simulink ha sido la adaptación del tipo de datos. En entorno de simulación Simulink, de MATLAB, trabaja con un tipo de datos de “double” de 64 bits. 53 bits de mantisa (incluido el signo) y 11 bits de exponente (incluido el signo). Sin embargo, la programación del dispositivo DSP permite el uso de más tipos de datos como son variables enteras, con o sin signo, variables de tipo booleanas, etc. Esta adaptación de formato no viene esclarecida en ninguna documentación de ayuda aportada por el entorno de desarrollo.

Otro de los inconvenientes ha estado relacionado con las tareas de programación de la memoria del dispositivo DSP. A la hora de configurar el modelo generado en Simulink, para que al compilar genere un archivo de salida que pueda programarse en una de las memorias del DSP, este solo permite configurarse para su almacenamiento en memoria Flash (no volátil). Esto implica un tiempo de programación más elevado. A su vez implica un menor número de programaciones debido al deterioro que sufre el dispositivo.

8.3 Conclusiones y futuras mejoras

Como conclusión del presente proyecto se pueden considerar los siguientes ítems.

- Se ha realizado un acercamiento sobre las técnicas de control RCP. Este estudio ha permitido ampliar conocimiento sobre la aplicación de estas técnicas en el mundo industrial.
- El estudio de una topología de un circuito de electrónica de potencia mediante teoría y simulación. Se ha analizado el funcionamiento de un sistema DC/DC con topología Boost, y su aplicación para la aplicación de gestión de paneles fotovoltaicos mediante la implementación de algoritmos de optimización o MPPT.
- Se han realizado pruebas en una bancada de laboratorio permitiendo la obtención de resultados reales. Se ha validado completamente la integración de los modelos implementados mediante el entorno de simulación, y la aplicación en una aplicación real.

Las mejoras propuestas para futuros desarrollos son las siguientes:

- La aplicación de funcionalidades más complejas implementadas en las librerías desarrolladas para este

tipo de dispositivos por Texas Instruments en colaboración con Matlab. Existen funcionalidades de algoritmia y control previamente desarrolladas que no han sido aplicadas en este proyecto.

- Estudio sobre la programación del dispositivo DSP en memoria RAM. Permite reducción de tiempo de programación y posibilidad de aumentar el número de pruebas de algoritmos.
- La implementación de una máquina de estados que conduzca al sistema hacia estado de funcionamiento seguros se considera de vital importancia.
- Desarrollo de un interfaz visual más profesional que permita una mayor funcionalidad.

8.4 Enriquecimiento personal

La ejecución de este proyecto ha permitido profundizar al ejecutor del mismo en los siguientes conceptos.

- Estudio en detalle de una topología de circuito de electrónica de potencia
- Diseño, desarrollo e implementación de sistemas de control
- Puesta en marcha y realización de pruebas sobre una bancada

8.5 Próximos pasos

El presente estudio pretende ser la base de la elaboración de una bancada con fines didácticos que favorezcan el acercamiento de los conceptos de programación de procesadores y aplicación de técnicas de control, relacionada con la electrónica de potencia.

REFERENCIAS

- [1] K. J. Darko Hercog, «Rapid Control Prototyping using MATLAB/Simulink and a DSP-based Motor Controller,» *TEMPUS Publications*, 2005.
- [2] V. H. Lauri Palmroff, «Rapid control prototyping in test sequence design for condition monitoring of a hydraulic valve,» *ResearchGate*, 2004.
- [3] O. V. G. S. S. H. Saptarshi De, «Rapid Control Prototyping of Voltage Controller for Three Phase Voltage Source Inverter,» *ARPJN Journall of Engineering and Applied Sciences* , 2015.
- [4] T. M. U. W. P. R. Ned Mohan, Power Electronics. Converters, Applications and Desing.
- [5] L. G. Fraquelo, Sistemas Electrónicos para Smart Grids, Sevilla, 2016.
- [6] E. G. Diez, «Sistemas Electrónicos para Gestión de Energías Renovables,» Sevilla, 2017.
- [7] T. Instruments, «LAUNCHXL-F28377S Overview,» *Manual*, vol. 2, nº 13, 2017.

