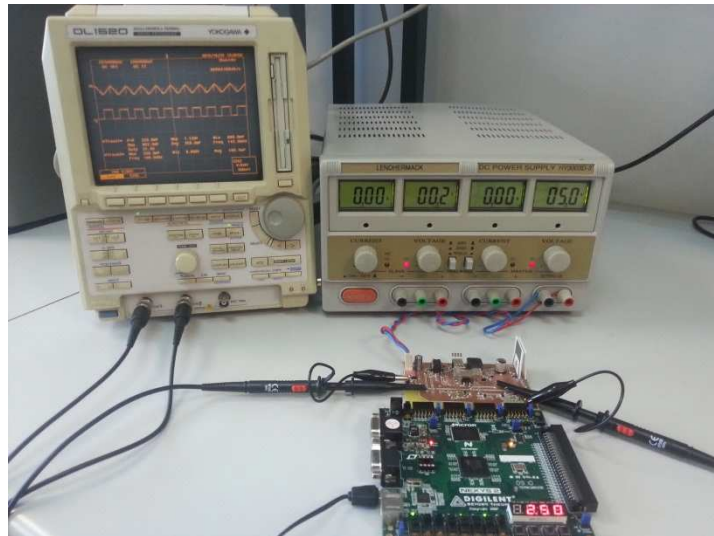


Trabajo Fin de Máster

Control en FPGA de un convertidor reductor en
modo corriente de pico



Autor

José Manuel Iguaz Navarro

Director/es

José Ignacio Artigas
Luis Ángel Barragán

EINA
2013

Lista de símbolos y acrónimos

$(i_L)_{AV}$: Corriente media por la bobina del convertidor.

$(i_L)_{max}$: Corriente máxima por la bobina del convertidor.

$(i_L)_{min}$: Corriente mínima por la bobina del convertidor.

$(V_o)_{max}$: Tensión máxima a la salida del convertidor.

$(V_o)_{min}$: Tensión mínima a la salida del convertidor.

A/D: Analógico Digital.

ACC: Acumulador de la celda de multiplicación y acumulación del regulador.

BCD: *Binary Coded Decimal*.

C: Condensador del filtro de salida del convertidor.

C₁: Condensador del primer filtro paso bajo a la salida del control.

C₂: Condensador del segundo filtro paso bajo a la salida del control.

CH1: Canal 1 del osciloscopio usado para realizar las medidas experimentales.

CH2: Canal 2 del osciloscopio usado para realizar las medidas experimentales.

D/A: Digital Analógico.

D: Ciclo de servicio.

EINA: Escuela de Ingeniería y Arquitectura.

EMC: *Electromagnetic Compatibility*.

ESR: *Equivalent Serial Resistance*.

f_c: frecuencia de cruce del sistema a controlar.

FM: Ganancia del modulador.

F_{max}: Fase máxima aportada por el regulador.

FPGA: *Field Programmable Gate Array*.

f_{sw}: Frecuencia de conmutación del convertidor.

G_i: Función de transferencia de corriente del convertidor.

i_L: Corriente en la bobina L.

i_o : Corriente a la salida del convertidor.

I_{REF} : Corriente de referencia del control.

K: Constante del regulador tipo II-b.

L: Bobina del filtro de salida del convertidor.

MAC: Multiplicación y acumulación.

Matlab: *Matrix laboratory*.

m_e : Pendiente de la rampa de compensación.

MF: Margen de fase del sistema en lazo cerrado.

m_{off} : Pendiente de la corriente en el estado *off* del transistor.

m_{on} : Pendiente de la corriente en el estado *on* del transistor.

MOSFET: *Metal Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*.

PAF: Proporcional en Avance de Fase.

PCB: *Printed Circuit Board*.

P_{Dcond} : Pérdidas del diodo de libre circulación del convertidor en conducción.

P_{Dsw} : Pérdidas del diodo de libre circulación del convertidor en conmutación.

PMOD: *Peripheral Module*.

PRF: Proporcional en Retraso de Fase.

P_{Tcond} : Pérdidas del transistor MOSFET del convertidor en conducción.

P_{Tsw} : Pérdidas del transistor MOSFET del convertidor en conmutación.

PWM: *Pulse Width Modulation*.

Q: Designación para el transistor del convertidor.

q : Número de bits de la parte decimal de una señal tipo signed.

R: Regulador tipo II-b.

R_1 : Resistencia del primer filtro paso bajo a la salida del control..

R_1 : Resistencia del segundo filtro paso bajo a la salida del control.

R_c : Resistencia interna serie del condensador (ESR).

$R_{DS(on)}$: Resistencia en conducción del transistor MOSFET del convertidor.

R_i : Ganancia de la medida de corriente.

R_L : Resistencia de la carga del convertidor.

s : variable continua del campo transformado de Laplace.

SMD: *Surface Mounted Device*.

T_A : Temperatura ambiente del sistema.

T_A : Temperatura ambiente.

t_{adc} : tiempo requerido por el conversor A/D para la conversión de datos.

T_{CLK} : Periodo del reloj interno de la FPGA.

t_{gc} : tiempo requerido por el regulador para realizar sus operaciones.

T_{sw} : Periodo de conmutación del convertidor.

V_C : Tensión en el condensador C.

V_D : Tensión en conducción del diodo de libre circulación del convertidor.

VHDL: *VHSIC Hardware Description Language*.

V_i : Tensión a la entrada del convertidor.

V_L : Tensión en la bobina L.

V_O : Tensión a la salida del convertidor.

V_{REF} : Tensión de referencia del control.

V_{sat} : Tensión de saturación del transistor MOSFET del convertidor.

w : Número total de bits de una señal tipo signed.

w_p : Frecuencia angular del polo del regulador tipo II-b.

w_z : Frecuencia angular del cero del regulador tipo II-b.

z : variable del campo transformado en tiempo discreto.

Z_O : Impedancia equivalente a la salida del convertidor.

θ_{JAD} : Impedancia térmica unión ambiente del diodo de libre circulación del convertidor.

θ_{JAT} : Impedancia térmica unión ambiente del transistor MOSFET del convertidor.

Δi_O : Rizado de corriente en la bobina del convertidor.

Δv_O : Rizado de tensión a la salida del convertidor.

Contenido

1	Introducción	7
1.1	Objetivo del trabajo.....	7
1.2	Estado del arte.....	7
1.3	Descripción general del sistema desarrollado	9
2	Diseño del control	11
2.1	Modelado del convertidor	11
2.2	Control por corriente de pico	12
2.3	Modelado del control	13
2.3.1	Lazo de corriente	13
2.3.2	Lazo de tensión	14
2.4	Ajuste del regulador mediante Matlab.....	15
2.5	Implementación en Matlab/Simulink	16
2.5.1	Modelo continuo	16
2.5.2	Modelo discreto.....	19
3	Implementación en FPGA	25
3.1	Modelo del hardware no sintetizable en VHDL.....	25
3.2	Diseño del control digital en VHDL	26
3.2.1	Control ADC	27
3.2.2	Regulador tipo II-b	28
3.2.3	Rampa digital de compensación	29
3.2.4	Conversor DA sigma-delta de segundo orden	29
3.2.5	Biestable RS	30
3.2.6	Arranque del convertidor suave (Soft start)	30
3.3	Resultados simulación en Modelsim	30
4	Resultados experimentales	33
5	Conclusiones y trabajo futuro	37
	Anexos	39
1.	Diseño del convertidor	39
2.	Modelado del convertidor.....	43
3.	Funcionamiento del control	47
4.	Modelado del control	53
5.	Simulación del control en Matlab/Simulink	57

6. Discretización del modelo del buck y del filtro pasivo	69
7. Código VHDL del control y del hardware del buck	71
8. Diseño de la PCB del convertidor	87
Bibliografía.....	95

1 Introducción

1.1 Objetivo del trabajo

El control en modo corriente de pico de convertidores continua-continua implementa dos lazos, uno interno de corriente y otro externo de tensión. Es uno de los más utilizados en las fuentes de alimentación conmutadas ya que limita la corriente de forma inherente y mejora la regulación respecto al control en modo tensión.

La mayor parte de los controles en modo corriente de pico se implementan analógicamente. El objetivo del presente trabajo es realizar un control digital de un convertidor reductor en modo corriente de pico. Este control incluye la técnica de control en modo tensión que ha sido visto en la asignatura "Control Digital de Etapas Electrónicas de Potencia" y complementa la formación recibida en el máster.

El control digital se describirá en VHDL y se implementará en una FPGA. Deberá incluir una rampa de compensación para que el funcionamiento sea estable para ciclo de trabajo mayor o igual que 0.5. El regulador digital elegido para el lazo externo de tensión será de tipo II. Su función de transferencia presenta un cero y dos polos, uno de los polos se posiciona en el origen para asegurar error de posición nulo.

Uno de los retos en la implementación de un control digital en modo corriente de pico es la comparación entre la rampa de compensación y la corriente por el inductor. Esta corriente cambia desde un valor mínimo hasta su valor máximo cada ciclo de conmutación. Una implementación digital de la comparación entre la rampa de compensación y la corriente, requeriría muestrear la corriente con un conversor A/D de gran ancho de banda. Por consiguiente, en este trabajo se analizarán alternativas que sean válidas para su implementación en FPGA.

Una vez diseñado e implementado el control, se elegirán los componentes del convertidor reductor y se diseñará una placa de circuito impreso para su implementación. Por último, se realizarán medidas experimentales y se compararán con las simulaciones obtenidas.

1.2 Estado del arte

Los convertidores continua-continua son sistemas variantes en el tiempo y su comportamiento es no lineal. Para poder realizar el diseño de controles lineales, modelos promediados de dichos convertidores han sido desarrollados en [1], pp. 187-213, mediante los que se ha obtenido un modelo lineal, a partir de la determinación de su función de transferencia en pequeña señal. Para ello la pequeña señal es considerada sobre el valor promedio de las variables en un periodo de conmutación.

A la hora de realizar un control sobre un convertidor de potencia, es necesario saber si la corriente se va a anular en algún momento o no. Con esta premisa, se tienen modelos promediados para modo de conducción continuo (CCM) y para modo de conducción discontinuo (DCM). En ambos modos el ciclo de servicio es la acción de entrada al modelo del

convertidor. Estando en CCM, aparte de la dependencia de las no idealidades de los componentes del convertidor, la relación existente entre la tensión de salida y la de entrada del convertidor depende del ciclo de servicio. En DCM depende dicho ciclo, de la frecuencia de conmutación y de la carga.

En cuanto al modo de controlar los convertidores existen dos variantes básicas al respecto, el control en modo tensión y el control en modo corriente. En función del modo de control, la función de transferencia a extraer relaciona distintas variables. En el control de tensión la relación se da entre el ciclo de servicio y la tensión de salida, mientras que en el control de corriente se da entre el ciclo de servicio y la corriente que circula por la bobina del convertidor.

En [1], pp. 187-213, se presenta el control tradicional en modo tensión, el cual tiene una única realimentación con la tensión de salida. En [2] y en [3] se ha desarrollado una variante del control de tensión mediante la realimentación lineal del estado. El control por realimentación del estado toma mayor importancia cuando el convertidor a controlar no es estable realimentando únicamente en tensión, un caso de este tipo se desarrolla en [4].

El control en modo corriente puede realizarse mediante la técnica basada en el control de la corriente media, la cual se describe en [5], en [6] y en [7].

En [8] se desarrolla un control mixto de tensión y corriente que ofrece un mejor comportamiento que un control PI convencional.

En [9] se implementa un manejo del convertidor buck con varios modos de control según la evolución del convertidor, mejorando la respuesta frente a la aplicación de un solo modo de control de corriente o de tensión.

En ese contexto, se plantea otro posible control de corriente basado en la regulación del pico de la misma en modo CCM. En [1], pp. 439-473, se describe el control tradicional en modo corriente de pico, en el que se necesitan dos lazos de realimentación, uno de la tensión de salida y otro de la corriente por la bobina. Este control presenta la desventaja del doble lazo de realimentación frente al control de tensión y una inestabilidad para un ciclo de servicio superior o igual a 0.5, siendo necesaria la inclusión de una rampa adicional de compensación, para poder variar el ciclo de servicio en todo su rango.

En [1], pp. 449-473, en [10], en [11] y en [12], se plantea como realizar la extracción de la función de transferencia del convertidor en modo corriente de pico, aproximándola a un primer orden, presentando una clara ventaja ante el segundo orden resultante del control de tensión, de cara a la determinación del regulador que interviene en el mismo.

La mayoría de los controles en modo corriente de pico, se suelen realizar de manera analógica [13], implementando tanto el regulador como la rampa de compensación mediante integrados electrónicos y elementos pasivos. Por este motivo, la implementación analógica presenta un elevado coste en el diseño de la placa de circuito impreso del convertidor, siendo una clara desventaja en este aspecto.

Una solución a este problema se describe en [14], donde el regulador y la rampa de compensación se han realizado de manera digital, pudiendo diseñar tantas veces como se

desea ambos elementos. Dicha solución presenta inconvenientes frente al control analógico, siendo uno de ellos la resolución finita del control digital frente a la resolución infinita del analógico. Otra de las desventajas que presenta, es la inclusión de un conversor DA hardware de gran ancho de banda para reconstruir la referencia de corriente compensada, lo que implica un aumento en el coste del diseño del convertidor.

En el presente trabajo se propone una alternativa al conversor DA hardware, mediante la implementación de un conversor DA sigma-delta ($\Sigma\Delta$) de segundo orden digital en FPGA, el cual se ha modelado como viene explicado en [15]. Para reconstruir la señal proporcionada por el conversor, bastará con incluir un filtro paso bajo pasivo, que en comparación con el conversor DA hardware resulta más económico.

1.3 Descripción general del sistema desarrollado

En términos generales, el sistema desarrollado en el presente trabajo se observa en la Figura 1.

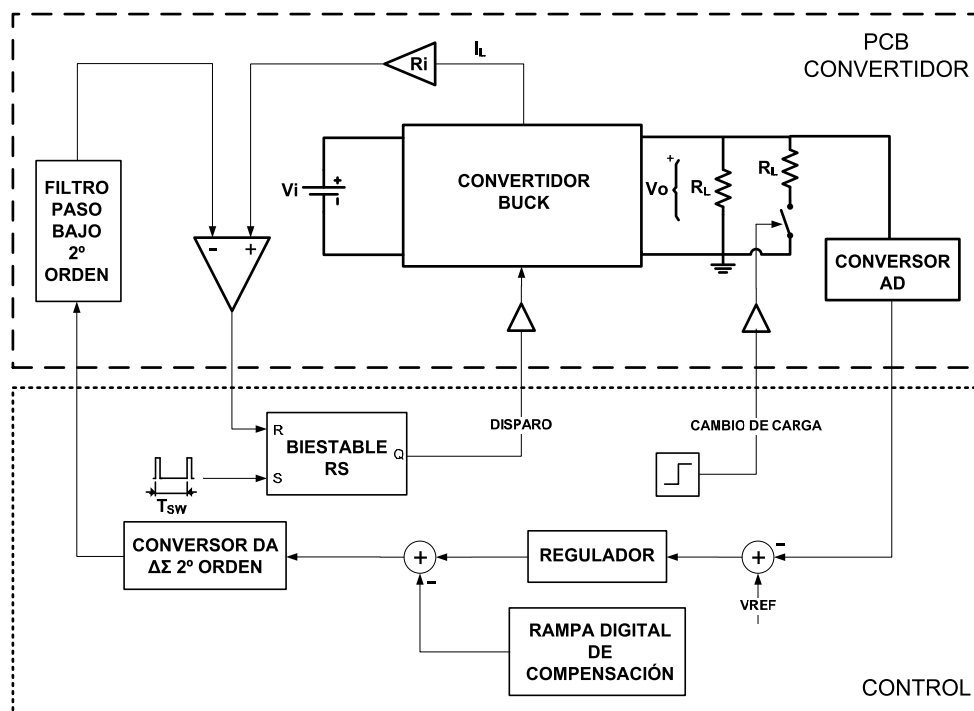


Figura 1 Diagrama de bloques genérico del trabajo realizado (Software y hardware).

Analizándola se observan dos partes importantes:

▪ PCB CONVERTIDOR

Representa la placa de circuito impreso realizada en el anexo 8. Está formada por un convertidor buck, un conversor A/D para leer la tensión de salida (V_o), la medida de la corriente por la bobina ($R_i \cdot I_L$), un filtro paso bajo que reconstruya la corriente de referencia procedente del conversor $\Sigma\Delta$ y un comparador cuyas entradas son las corrientes citadas. En el diseño también se ha incluido la posibilidad de realizar cambios de carga a la mitad de su valor, en el instante que se desee.

▪ CONTROL

Representa la placa de una FPGA modelo Nexys 2, a la que se va a conectar la PCB diseñada, para poder realizar el control en lazo cerrado del convertidor.

El control se ha descrito en el apartado 2.2, se ha modelado junto con el convertidor en los apartados 2.3 y 2.1 respectivamente. En el apartado 2.5, ambos se han definido en Matlab para ajustar el regulador. Después se ha realizado el control y el convertidor en la herramienta SimPowerSystems de Matlab. Finalmente, en el apartado 3.2 se ha implementado el control en VHDL, se ha simulado en la herramienta Modelsim y se ha programado la FPGA.

2 Diseño del control

Para diseñar el control en modo corriente de pico de un convertidor buck, se han seguido los siguientes pasos:

1. Modelado en pequeña señal del convertidor.
2. Análisis del funcionamiento del control del convertidor.
3. Modelado en pequeña señal del control del convertidor.
4. Ajuste del regulador del control mediante Matlab.

2.1 Modelado del convertidor

La Figura 2 muestra el circuito típico de un convertidor buck con carga resistiva.

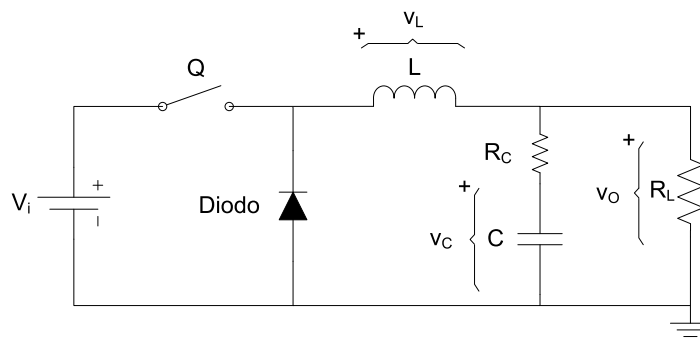


Figura 2 Convertidor buck con carga resistiva.

Los parámetros correspondientes a los componentes del convertidor de la Figura 2, diseñado en el anexo 1, son los siguientes: tensión de entrada $V_i = 5$ V, tensión de salida $V_o = 2.5$ V, $L = 68 \mu\text{H}$, $C = 220 \mu\text{F}$, resistencia serie equivalente del condensador $R_C = 25 \text{ m}\Omega$, resistencia de carga $R_o = 5 \Omega$ y la frecuencia de conmutación $f_{sw} = 100 \text{ kHz}$.

Para modelarlo se ha partido de la idea genérica de su función de transferencia (Figura 3).

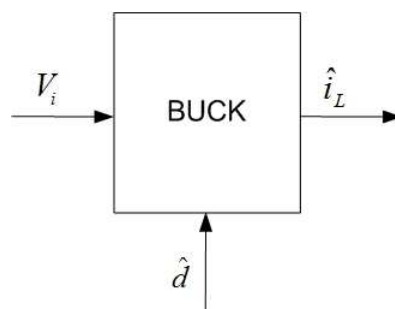


Figura 3 Modelo genérico en pequeña señal del convertidor.

Para ello, se han determinado las dinámicas que rigen el funcionamiento del convertidor en los distintos estados del transistor, se han perturbado las variables que intervienen en las mismas en torno a un punto en estado estacionario y se ha extraído el modelo en pequeña señal.

Finalmente, se ha determinado la función de transferencia pasando el resultado al campo transformado de Laplace (1).

$$G_i(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = V_i \cdot \frac{1 + C \cdot (R_L + R_C) \cdot s}{(R_L + R_C) \cdot L \cdot C \cdot s^2 + (R_L \cdot R_C \cdot C + L) \cdot s + R_L} \quad (1)$$

El desarrollo matemático para la obtención de la misma se muestra en el anexo 2.

2.2 Control por corriente de pico

Como viene explicado en [1], pp. 439-489, el control por corriente de pico se basa en el esquema de la Figura 4.

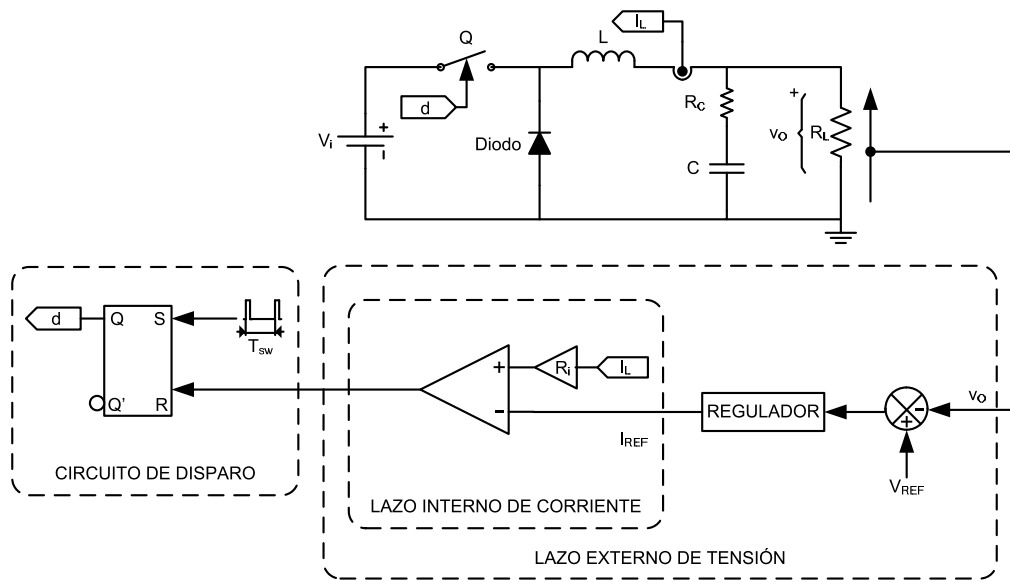


Figura 4 Diagrama del control modo corriente de pico.

El control está formado por:

- **Lazo externo de tensión:** Este contiene un regulador con el que se controla la tensión de salida (V_o) a una referencia dada (V_{REF}), proporcionando una referencia para el lazo interno de corriente (I_{REF}).
- **Lazo interno de corriente:** En este se realiza la comparación entre la referencia de corriente y la corriente medida, siendo su salida activa cada vez que la corriente supere la de referencia.
- **Circuito de disparo:** Formado por un biestable RS que se activa (S) con un pulso al principio de cada periodo de conmutación (T_{sw}), conmutando el transistor a *on* e incrementando de este modo la corriente por la bobina. Cuando dicha corriente supera la de referencia, la salida del comparador resetea (R) el biestable, pasando a *off* el transistor, lo cual origina un decremento en la corriente.

El problema que presenta el control de corriente de pico es su inestabilidad para un ciclo de servicio igual o superior a 0.5. Para mitigarlo y poder variar el ciclo en todo su rango ($0 < D < 1$), hay que incluir una rampa de compensación de corriente a la salida del regulador (Figura 5).

El valor de pico de la rampa (A_{rampa}) se ha definido en términos de su pendiente (m_e) y el periodo de conmutación (T_{sw}).

$$A_{rampa} = m_e \cdot T_{sw} \quad (2)$$

La elección del valor de la pendiente, así como el desarrollo del funcionamiento del control en detalle, se han desarrollado en el anexo 3.

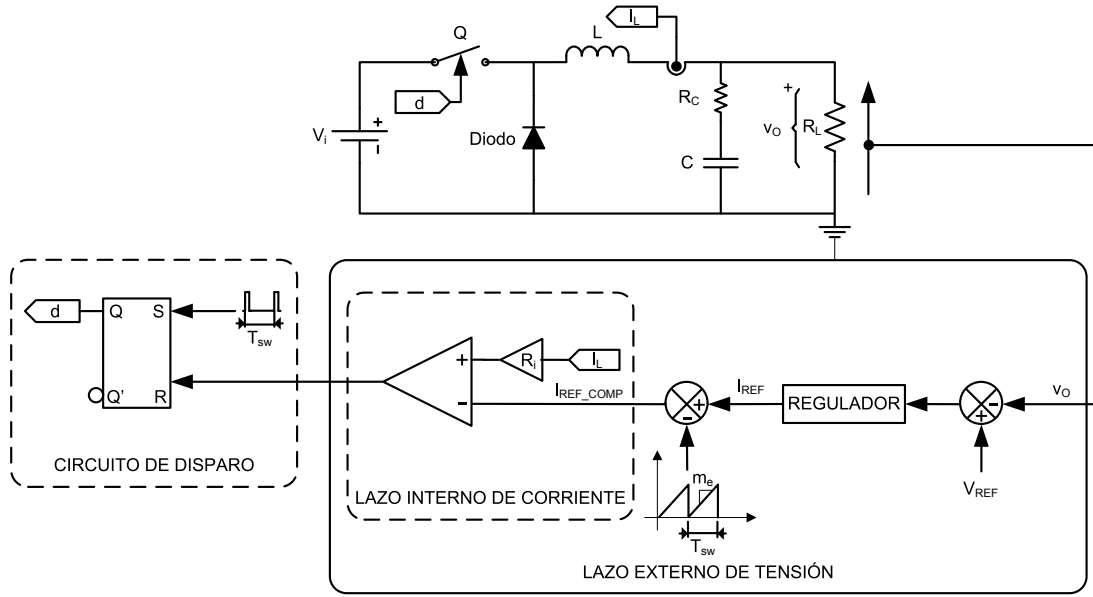


Figura 5 Diagrama del control modo corriente de pico con rampa de compensación.

2.3 Modelado del control

2.3.1 Lazo de corriente

Tal como se ha desarrollado en el anexo 4, analizando el lazo de corriente en términos de pequeña señal, se ha determinado la relación existente entre el ciclo de servicio y la diferencia entre la corriente de referencia y la medida en la bobina, considerando la rampa de compensación y la compensación de posibles perturbaciones en V_i y V_o (3).

$$\hat{d} = \frac{2 \cdot D \cdot L}{v_o \cdot (1 - D) \cdot T_{sw} \cdot n} \cdot (\hat{i}_{REF} - \hat{i}_L) - \frac{D^2}{v_o \cdot (1 - D) \cdot n} (\hat{v}_i - \hat{v}_o) \quad (3)$$

Donde D es el ciclo de servicio nominal del convertidor:

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (4)$$

Y el parámetro n es:

$$n = \left(1 + 2 \cdot \frac{m_e}{m_{on}} \right) \quad (5)$$

Siendo m_{on} la pendiente de la corriente cuando el transistor esta en *on*.

Con la relación definida anteriormente en este apartado y la función de transferencia del convertidor definida en el apartado 2.1, se ha elaborado el diagrama de bloques de lazo de corriente (Figura 6).

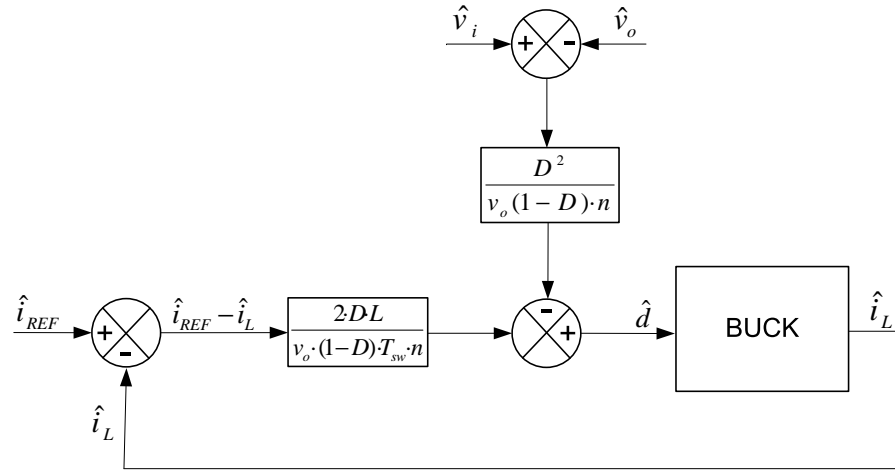


Figura 6 Diagrama de bloques control de corriente y función de transferencia del buck.

2.3.2 Lazo de tensión

El siguiente paso es incluir el lazo de control de tensión. Para ello, se ha determinado v_o (6) a partir de la impedancia equivalente del condensador y la carga (Z_o) y la corriente por la inductancia.

$$\hat{v}_o = \hat{i}_L \cdot Z_o(s) = \hat{i}_L \cdot \frac{(R_C \cdot C \cdot s + 1) \cdot R_L}{(R_C + R) \cdot C \cdot s + 1} \quad (6)$$

Se desea obtener un error de posición nulo de tensión y un margen de fase (MF) mínimo de 60 grados a la frecuencia de cruce del sistema (f_c). Como se explica en [14], el regulador a incluir es de tipo II-b y su expresión viene dada por:

$$R(s) = K \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1 + \frac{s}{w_z}}{1 + \frac{s}{w_p}} \quad (7)$$

Mediante la constante K del regulador, se ha ajustado f_c una década por debajo de f_{sw} . Al incluir un integrador para anular el error de posición, se añade una fase de menos 90 grados a lo largo de todo el rango de frecuencias, pudiendo inestabilizar el sistema. Para obtener el margen de fase deseado y asegurar la estabilidad del sistema, se ha diseñado un PAF-PRF con el cero (w_z) y el polo (w_p) que forman el regulador tipo II-b respectivamente.

La Figura 7 muestra el diagrama de bloques que modela el comportamiento y el control por corriente de pico del convertidor buck.

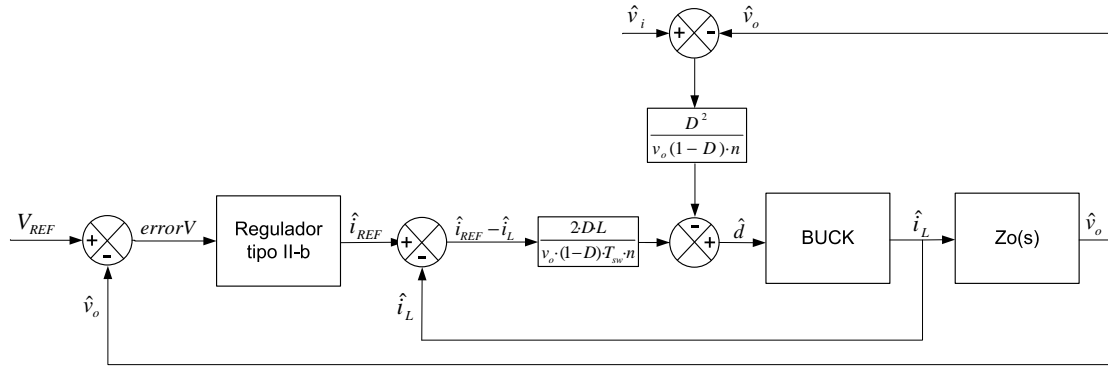


Figura 7 Diagrama de bloques del control modo pico corriente completo.

El ajuste del regulador se ha realizado mediante la herramienta Sisotool de Matlab en el siguiente punto, donde se han desestimado las posibles perturbaciones en V_i , ya que esta se ha obtenido de una fuente de alimentación comercial. También se han despreciado posibles perturbaciones en v_o , ya que su rizado es despreciable frente a su valor medio, tal y como se ha determinado en el anexo 1.

2.4 Ajuste del regulador mediante Matlab

Para determinar el regulador, se ha analizado el comportamiento del sistema en lazo cerrado en términos de la función de transferencia en lazo abierto del sistema. Dicha ganancia de lazo, se ha definido como el producto de las funciones de transferencia que se disponen en cascada (excluyendo signo -).

Partiendo del diagrama de la Figura 7, en Matlab se ha definido la ganancia del modulador:

$$FM = \frac{2 \cdot D \cdot L}{v_o \cdot (1 - D) \cdot T_{sw} \cdot n} \quad (8)$$

A partir de esta y la función de transferencia del convertidor buck (G_i), se ha definido la función de transferencia del lazo de corriente, considerando la ganancia de la medida de la misma (R_i):

$$TF_i = FM \cdot \frac{G_i(s)}{(1 + R_i \cdot FM \cdot G_i(s))} \quad (9)$$

Con esta función, se ha definido la ganancia de lazo sin regulador:

$$TF_{ol} = FM \cdot \frac{G_i(s)}{(1 + R_i \cdot FM \cdot G_i(s))} \cdot Z_o(s) \quad (10)$$

Esta ganancia representa el comportamiento del sistema en lazo abierto, que comparada con la ganancia de lazo cerrado, servirá para ver la aportación del regulador al sistema.

La ganancia de lazo cerrado se ha definido como:

$$TF_{cl} = TF_{ol} \cdot R(s) \quad (11)$$

El regulador diseñado con Sisotool resulta:

$$R(s) = 282743 \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1 + s/13333}{1 + s/500000} \quad (12)$$

La Figura 8 muestra el diagrama de bode resultante del sistema en lazo abierto y lazo cerrado. En lazo cerrado se ha obtenido un margen de fase de 100° en f_c , asegurando la estabilidad del sistema.

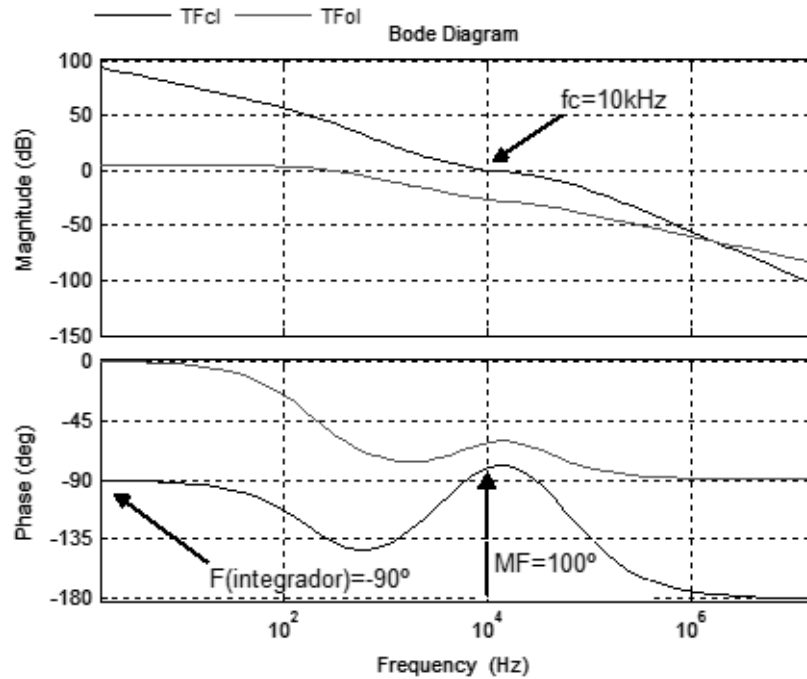


Figura 8 Diagrama de Bode del sistema en lazo abierto y en lazo cerrado.

2.5 Implementación en Matlab/Simulink

2.5.1 Modelo continuo

La Figura 9 muestra en control en modo continuo, modelado en la herramienta Simulink de Matlab.

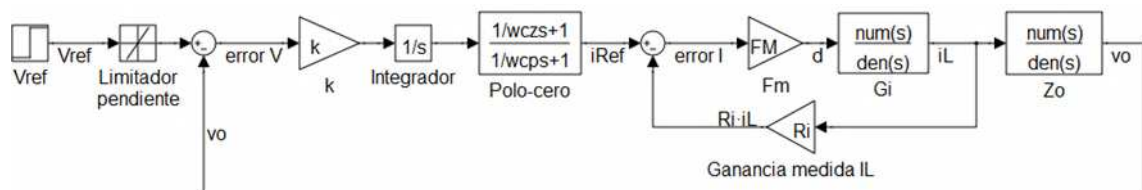


Figura 9 Diagrama de bloques modelo continuo (buck y control) en Simulink.

La Figura 10 muestra el resultado de la simulación de la respuesta del sistema controlado, ante una referencia de tensión en rampa 2.5 voltios de amplitud.

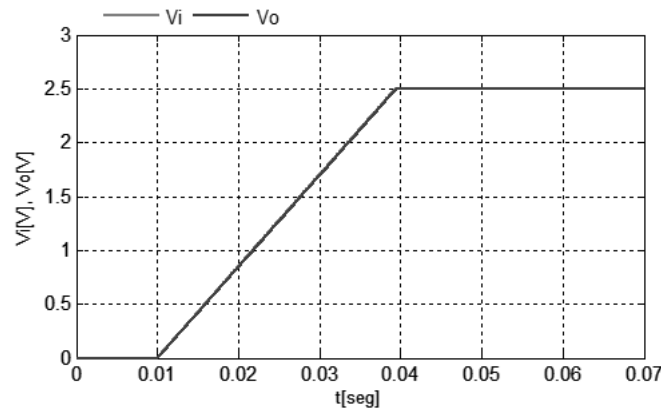


Figura 10 Respuesta del control de corriente ante referencia de tensión en rampa.

El sistema tiene una buena respuesta, siendo su error de posición nulo en régimen permanente.

Dado el buen funcionamiento del regulador, se ha modelado el convertidor buck con bloques de la herramienta SimPowerSystems de Simulink y su correspondiente control en modo continuo. En la Figura 11 se observa la etapa de electrónica de potencia, a la que se le ha incluido un interruptor (Breaker) y una resistencia del mismo valor que la de carga, en paralelo con la misma, con el fin de imponer cambios de carga y ver la estabilidad que el regulador proporciona al control. En la parte de control, al igual que en la Figura 9, se ha limitado la pendiente de subida de la tensión de referencia, evitando de este modo sobre oscilaciones indeseadas en el inicio del control.

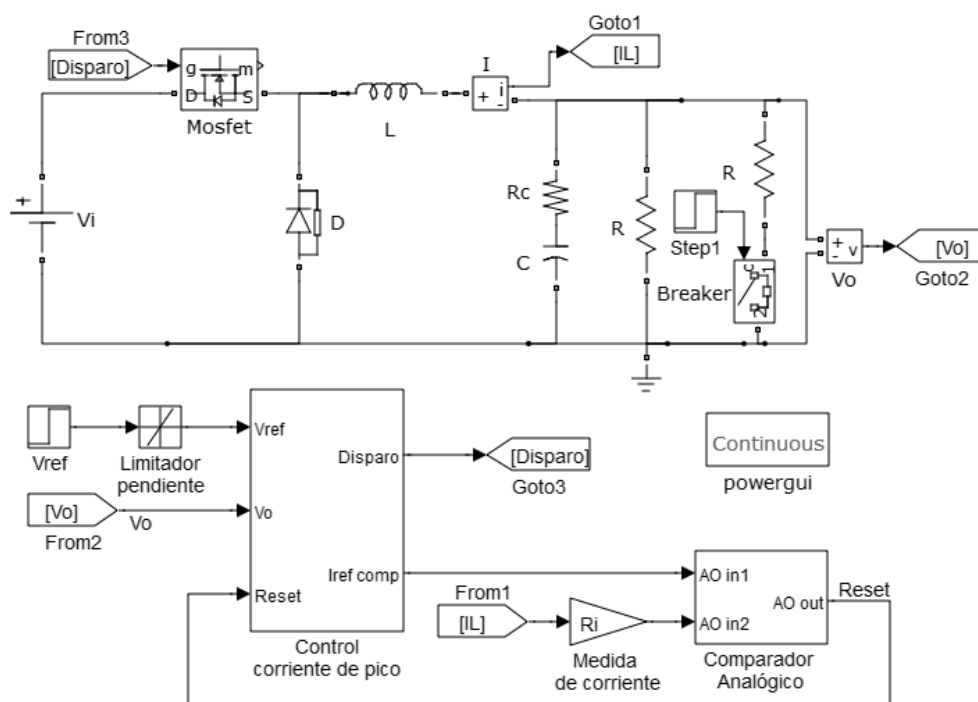


Figura 11 Convertidor buck en bloques de SimpowerSystems y control continuo en Simulink

El detalle del control de la Figura 11 se muestra a continuación:

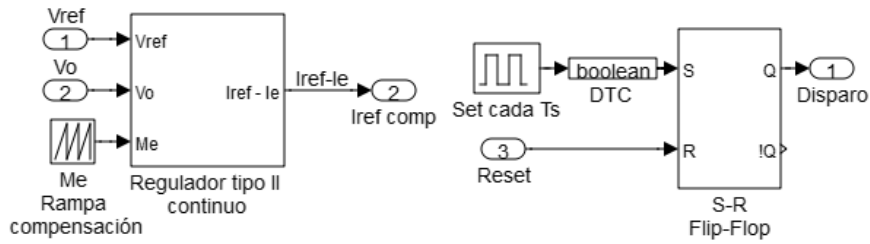


Figura 12 Control por corriente de pico continuo detallado en Simulink.

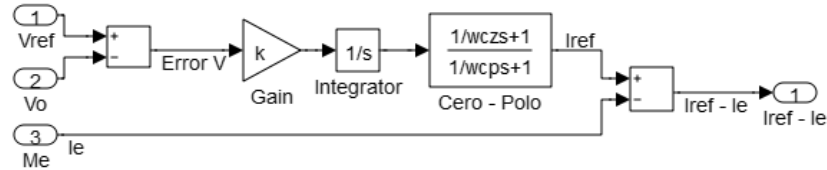


Figura 13 Regulador continuo detallado y compensación en Simulink.

Analizando el resultado de la simulación de la Figura 14, se observa que en $t=0.01$ segundos se ha realizado un arranque suave del convertidor, alcanzando la tensión de salida deseada en $t=0.04$ segundos. En $t=0.05$ segundos se ha realizado un cambio de carga a la mitad de su valor, ante el cual el control se comporta de manera adecuada, estableciendo la corriente sin apenas sobre oscilación y manteniendo la tensión de salida constante.

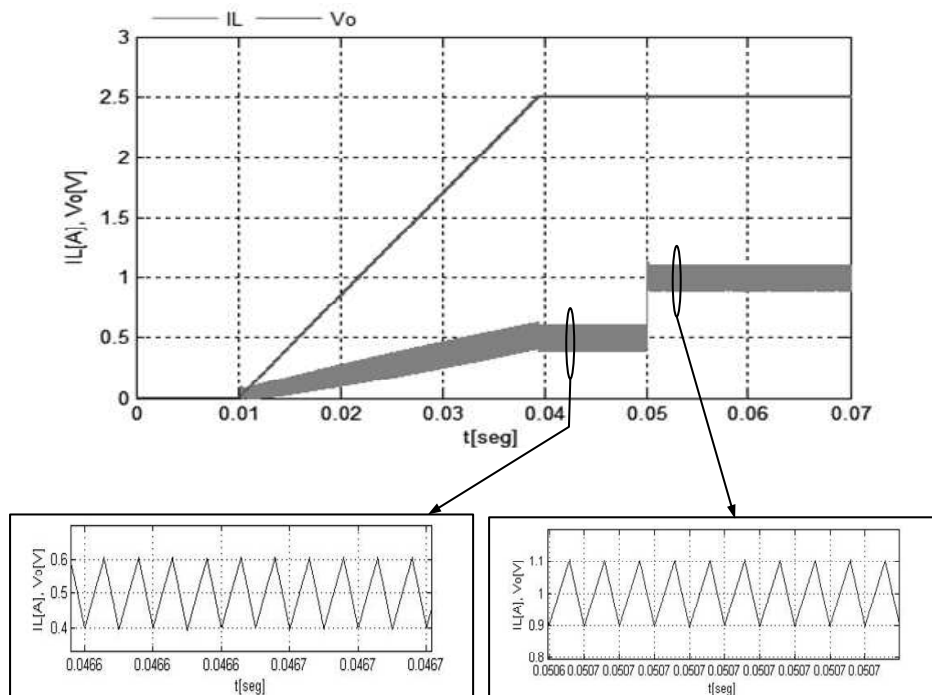


Figura 14 IL y Vo ante cambio a mitad de carga con control continuo.

La corriente antes del cambio de carga tiene un valor medio de 0.5 amperios, siendo su rizado de 0.2 amperios. Al darse el cambio de carga, existe una leve sobre oscilación de 0.2 amperios sobre el valor medio en régimen permanente, el cual asciende a 1 amperio con el mismo rizado.

La tensión en el cambio desciende hasta un mínimo de 2.45 voltios, adquiriendo la tensión de referencia en aproximadamente 200 μ s.

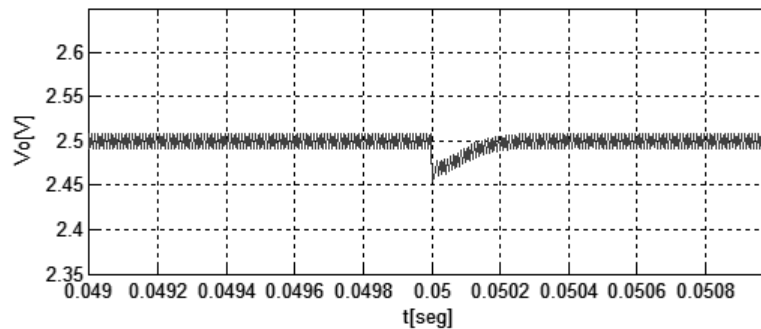


Figura 15 Evolución de la tensión ante un cambio de carga a mitad de su valor.

2.5.2 Modelo discreto

La Figura 16 muestra el convertidor y el control discreto del mismo.

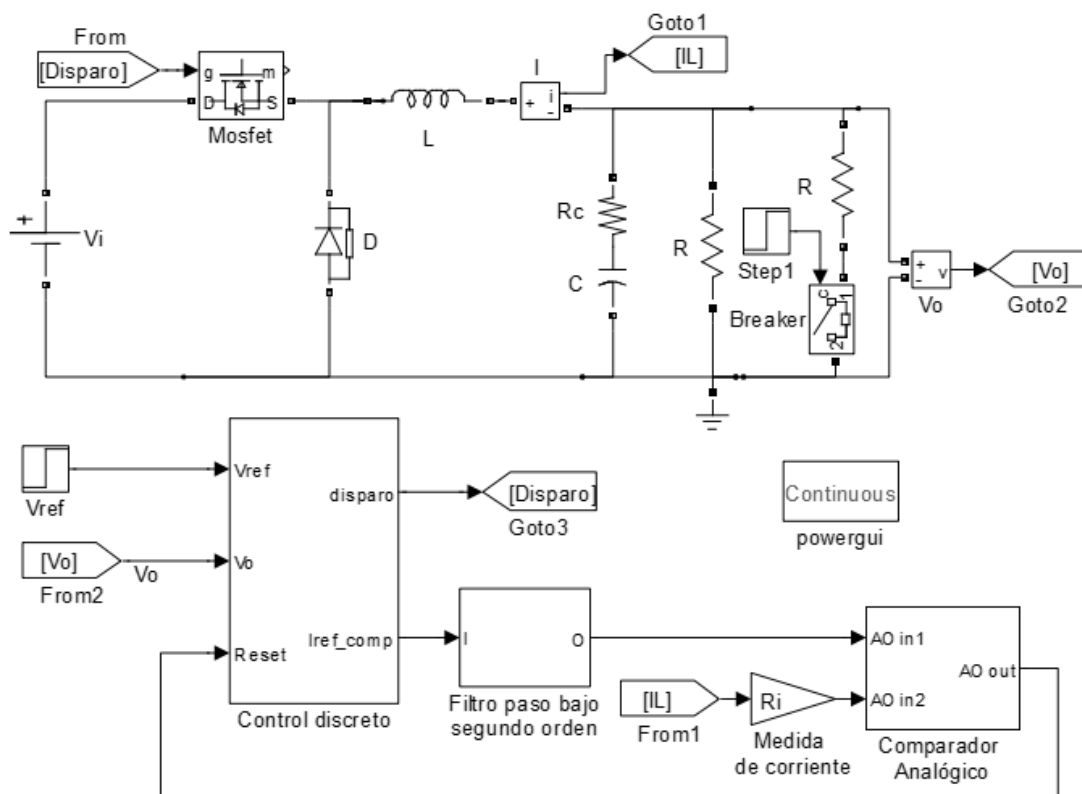


Figura 16 Convertidor buck en bloques de SimpowerSystems y control discreto en Simulink.

A la salida del control se ha incluido un filtro paso bajo, para reconstruir la señal digital de la corriente de referencia compensada. Para modelar el filtro, se han definido las frecuencias de corte de los dos filtros paso bajo de primer orden que lo forman. Ambas frecuencias se han ajustado por simulación en 750 kHz.

El regulador se ha discretizado mediante el método de transformación bilineal (13), usando la función c2d de Matlab.

$$R(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}} \quad (13)$$

Los coeficientes del mismo son:

- $(b_2, b_1, b_0) = (-14.14, 2, 16.16)$
- $(a_2, a_1) = (-0.4286, -0.5714)$

Dentro del bloque de control discreto (Figura 17), el regulador se ha muestreado cada T_{sw} , dado el pequeño rizado de tensión a la salida. A la referencia establecida por el regulador, se le ha restado una rampa digital de compensación, obteniendo la referencia digital de corriente compensada. La conversión digital analógica, se ha llevado a cabo mediante un conversor DA sigma delta ($\Sigma\Delta$) de segundo orden, razón por la cual el filtro paso bajo es de segundo orden.

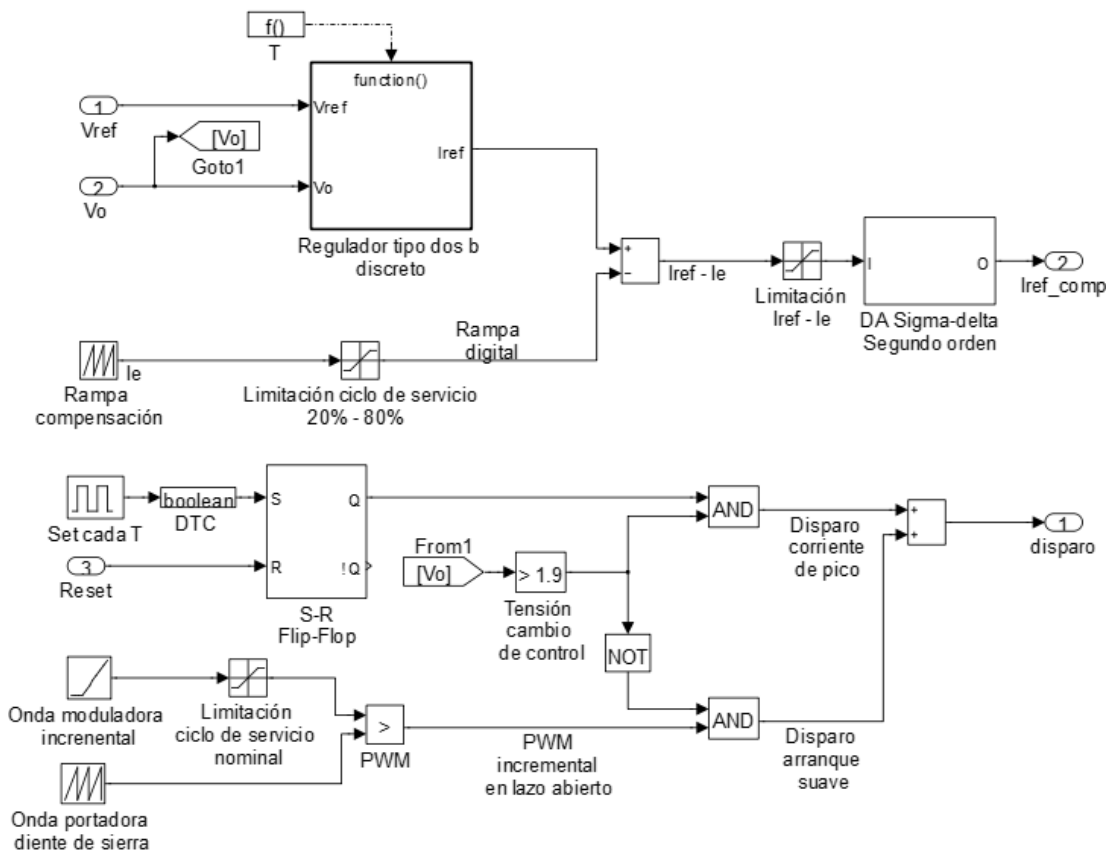


Figura 17 Modelo detallado del control discreto del convertidor.

Una problemática que ha surgido a raíz de la inclusión del $\Sigma\Delta$ en el control, es que las amplitudes de corriente en el arranque son demasiado pequeñas. Por esta razón, se ha implementado un arranque suave del convertidor mediante una modulación PWM, con un incremento progresivo del ciclo de servicio. A partir de un valor de tensión a la salida, donde la corriente adquiere una amplitud aceptable para el conversor, se ha desactivado el control PWM y se ha activado el de corriente de pico. De esta manera se ha realizado un cambio automático de control de manera similar a la desarrollada en [9].

Otro aspecto a resaltar por la inclusión del $\Sigma\Delta$ y su posterior filtrado, es la limitación del ciclo de servicio, para dar tiempo a que la señal sea reconstruida por completo. La limitación se ha realizado recortando el valor de la amplitud de la rampa de compensación, ya que al compararse con la corriente medida, resetea el biestable que impone el ciclo de servicio en cada periodo de conmutación. Para un correcto funcionamiento del conversor se ha limitado el ciclo de servicio entre 0.2 y 0.8, es decir, se ha recortado la rampa entre un 20% y un 80% de su amplitud. El citado conversor se ha modelado según [15] y su implementación en Simulink es:

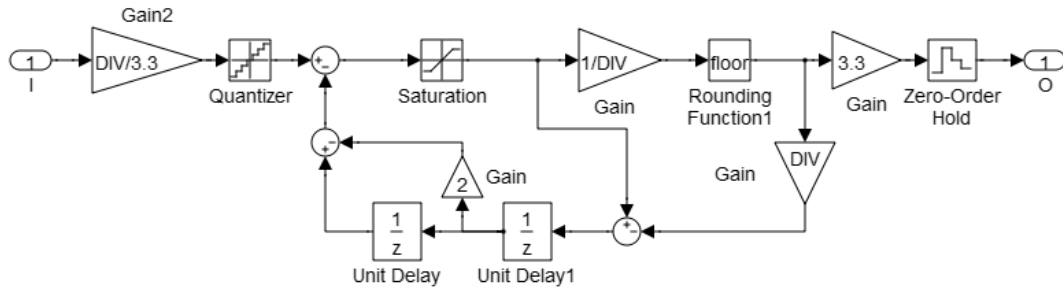


Figura 18 Modelo del conversor DA sigma-delta de segundo orden en Simulink.

La entrada al conversor se ha pasado de su valor real a entero de la siguiente manera:

$$I_{entero} = I_{real} \cdot \frac{DIV}{V_{FS}} = I_{real} \cdot \frac{2^{n-1}}{V_{FS}} \quad (14)$$

Siendo n el numero de bits del dato a convertir (9 bits) y V_{FS} la tensión de fondo de escala del conversor (3.3 voltios). Después se ha cuantizado el dato con un intervalo:

$$q = \frac{V_{FS}}{DIV} = \frac{V_{FS}}{2^{n-1}} \quad (15)$$

El dato se ha limitado entre 0 y (2^n-1) y se ha convertido a binario dividiéndolo por DIV . El bit mas significativo (MSB) del dato se ha llevado a la salida, realimentando los bits menos significativos (LSBs) con valor entero, que a través de la función de transferencia de ruido del conversor (NTF) (16) se ha suministrado a la salida del cuantizador.

$$NTF(z) = 1 - \left(1 - \frac{1}{z}\right)^2 = \frac{1}{z} \cdot \left(2 - \frac{1}{z}\right) \quad (16)$$

Siendo la frecuencia de muestreo de NTF igual a la máxima del reloj de la FPGA ($f_{CLK}=50\text{MHz}$), en la salida se obtiene una señal digital de un bit a esa frecuencia, la cual contiene la información binaria del dato. Mediante un cambio de escala a V_{FS} y un mantenedor de orden cero muestreado a f_{CLK} , se ha reconstruido la señal y con el filtro paso bajo a la salida del control, se ha obtenido la referencia de corriente compensada a la frecuencia de conmutación.

La Figura 19 muestra el comportamiento de las señales del conversor ante una referencia compensada de 0.7 voltios de amplitud. Arriba se observa la señal cuantizada y la rampa reconstruida y filtrada, en medio se aprecia el bit más significativo a la salida y abajo se ve el ruido realimentado.

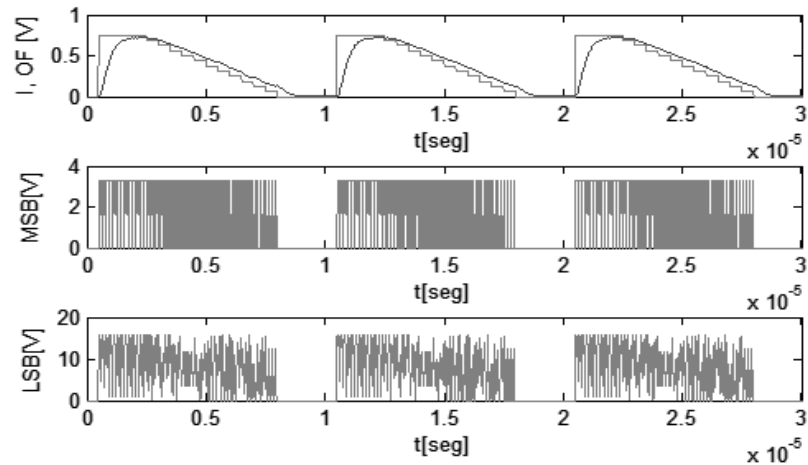


Figura 19 Señal cuantizada (I) vs salida filtrada (OF) (arriba), MSB (medio) y ruido realimentado (LSBs) (abajo).

En la Figura 20 se observa el arranque suave el convertidor y al llegar la tensión de salida a 1.9 voltios, se impone el control por corriente. Actuando el control por corriente, en $t=0.05$ segundos se produce un cambio de carga a la mitad de su valor y en $t=0.06$ segundos se vuelve a establecer el valor de carga completo.

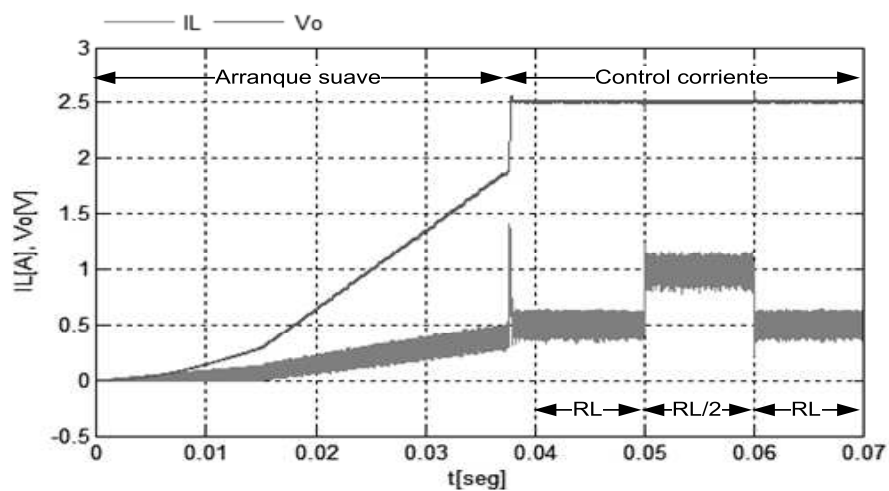


Figura 20 IL y Vo ante cambios de carga con control discreto

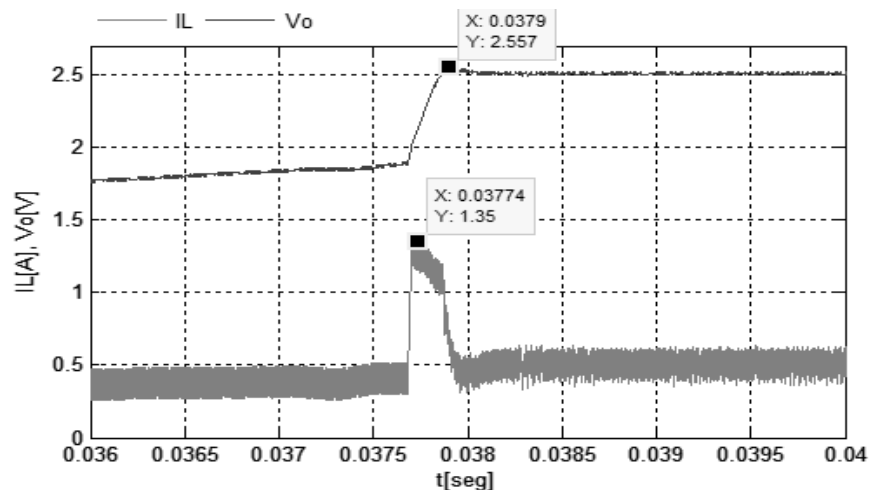


Figura 21 Detalle IL y Vo en el cambio de control.

Analizando los cambios de carga en la Figura 22, se observa que al reducir la carga a la mitad de su valor, la corriente tiene un máximo de 1.19 amperios. Por el contrario, al establecer de nuevo la carga completa, la corriente tiene un mínimo en 0.25 amperios. El rizado de la corriente es de 0.2 amperios, independientemente de la carga impuesta.

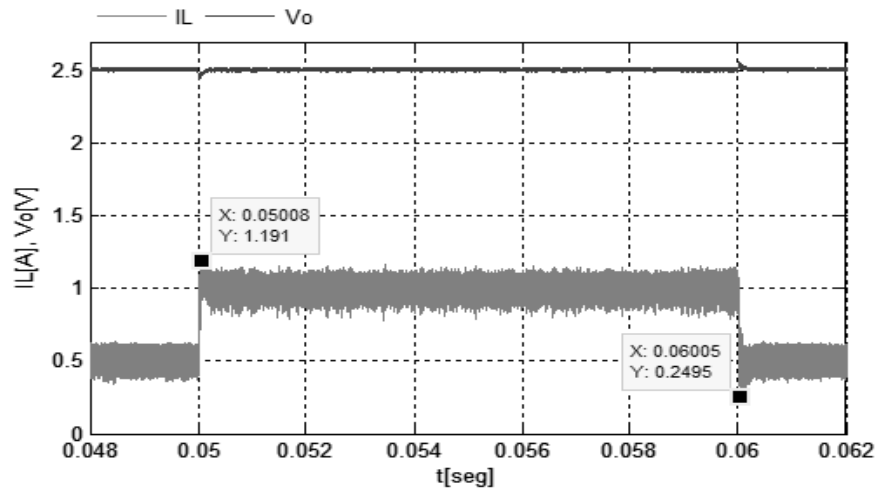


Figura 22 Detalle I_L y V_o en los cambios de carga en el control de corriente.

La tensión en el primer cambio desciende hasta 2.44 voltios, mientras que en el segundo cambio asciende hasta 2.57 voltios, alcanzando el valor de referencia en aproximadamente 200 μs en ambos cambios.

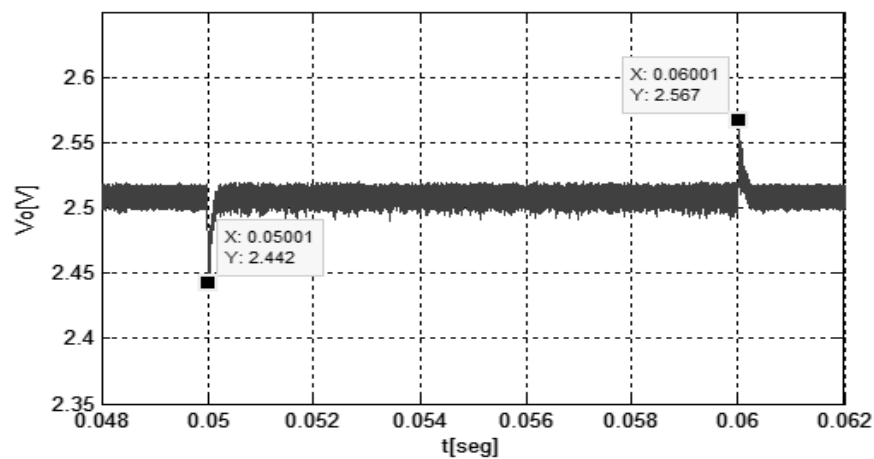


Figura 23 Detalle V_o en los cambios de carga.

En el anexo 5 se han detallado la realización de los modelos y las simulaciones que se han presentado a lo largo de este apartado, con los archivos de inicialización necesarios para el correcto funcionamiento de los mismos.

3 Implementación en FPGA

La Figura 24 muestra el diagrama de bloques del control digital basado en FPGA, con las conexiones entre la placa Nexys2 modelo Spartan 3E 1200 de Digilent y la PCB del convertidor.

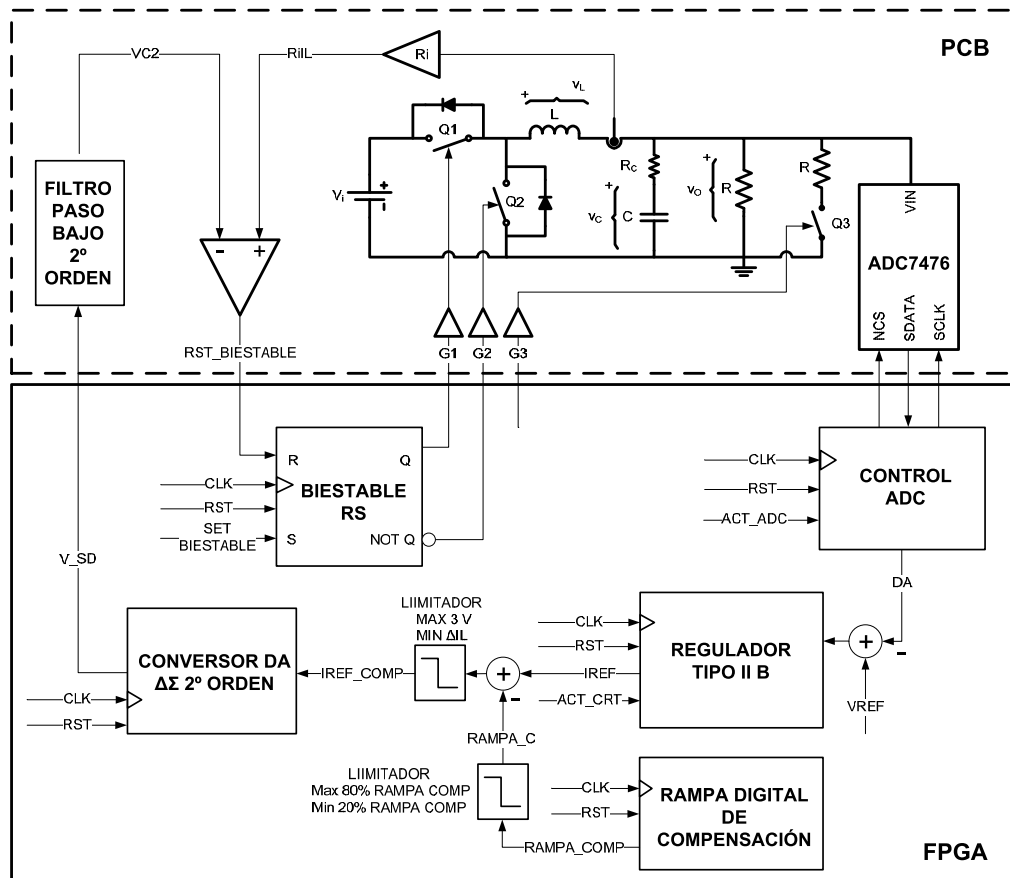


Figura 24 Diagrama de bloques del control digital en FPGA.

Para la verificación del diseño del control en FPGA, se va a seguir la estrategia de simular en VHDL todo el sistema en lazo cerrado, lo que requiere modelar en VHDL no sintetizable todos los bloques de la PCB que van conectados a la FPGA. El código sintetizable del control en FPGA y la descripción comportamental del hardware no sintetizable de la PCB, se encuentran en el anexo 7.

3.1 Modelo del hardware no sintetizable en VHDL

La parte hardware no sintetizable se ha modelado en un test bench en VHDL, mediante el software de programación ISE 10.1 de Xilinx. Los bloques que forman el hardware se describen a continuación:

▪ Convertidor buck

Éste se ha modelado al igual que en [16]. Para ello se han discretizado las ecuaciones diferenciales lineales que modelan el convertidor determinadas en el anexo 2 ((50), (51), (52) y

(53)), mediante el algoritmo de integración numérica de Euler hacia adelante, transformándolas en ecuaciones en diferencias lineales.

Para la discretización se ha usado un paso de cálculo (T_s) suficientemente pequeño para seguir la respuesta natural del sistema, siendo 20 nanosegundos en este caso. El desarrollo matemático de la discretización del convertidor se observa en el anexo 6.

- **Filtro paso bajo de segundo orden**

En este caso se han extraído las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento lineal del filtro. La discretización de las mismas se ha realizado del mismo modo que el convertidor buck y el desarrollo matemático se observa en el anexo 6.

- **Comparador analógico**

Este se ha realizado comparando la corriente medida ($R_i \cdot I_L$) y la señal a la salida del filtro pasivo ($VC2$). La señal $RST_BIESTABLE$ se activa cuando $R_i \cdot I_L > VC2$.

- **Conversor A/D**

Representa el comportamiento de la salida ($SDATA$) del conversor ADC7476 en función de las entradas (NCS y $SCLK$). En el apartado 3.2.1 se ha controlado el conversor en función de sus entradas, para poder leer la tensión a salida del convertidor.

3.2 Diseño del control digital en VHDL

Para realizar el diseño del control se ha usado un reloj (CLK) de 50MHz para la FPGA, con lo que se han necesitado 500 ciclos de reloj en cada periodo de conmutación. Para determinar dichos ciclos se ha realizado un contador ascendente de 9 bits (CNT_TS).

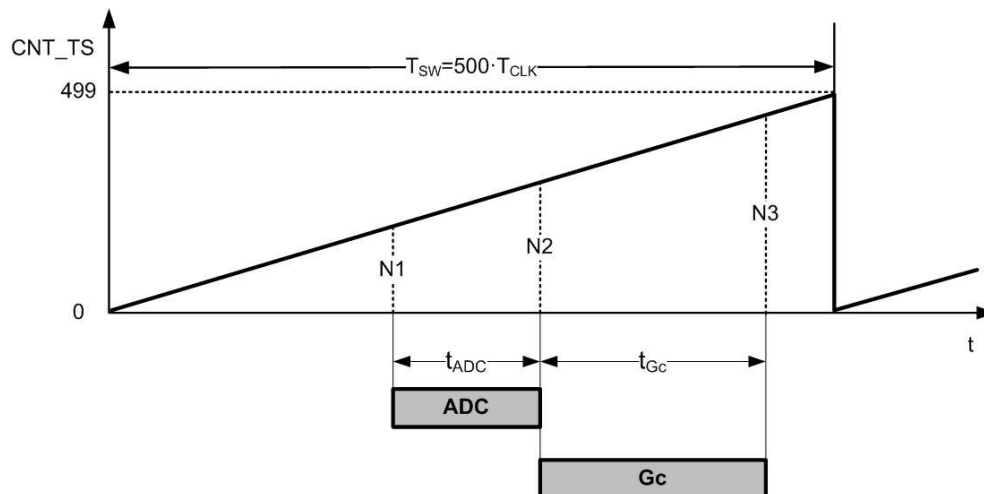


Figura 25 Planificación temporal del control sobre el contador CNT_TS .

En la Figura 25 se pueden observar dos tiempos para implementar el control sobre CNT_TS . Uno es t_{ADC} , tiempo que le cuesta realizar la conversión de un valor analógico a uno digital al conversor ADC y el otro es t_{Gc} , tiempo que le cuesta al controlador realizar las operaciones

para regular la tensión de salida del convertidor. Al llegar a N3 se ha actualizado el ciclo de servicio para el siguiente periodo de conmutación.

A partir de CNT_TS se ha detectado el tiempo de inicio de la conversión (N1) y el propio para el regulador (N2), activando las señales ACT_ADC y ACT_CRT respectivamente, para habilitar cada bloque en su debido momento (Figura 24).

3.2.1 Control ADC

En este apartado se ha realizado el control del conversor analógico digital ADCS7476, de 12 bits salida serie. El dato de salida del ADC deberá ser convertido de serie SDATA a paralelo DA de 8 bits. En este, para realizar el envío y la recepción de datos hay que cumplir una serie de tiempos, los cuales vienen definidos en la hoja de datos del fabricante.

Dicho protocolo se ha realizado mediante una máquina de estados, la cual se puede ver el esquema de la Figura 26. Además se utilizará un contador para llevar la cuenta del número de bits que se han recibido (CONTADOR_BITS) y otro contador para fijar el número de ciclos que se permanece en cada estado (CONTADOR_DIV_FRECUENCIA).

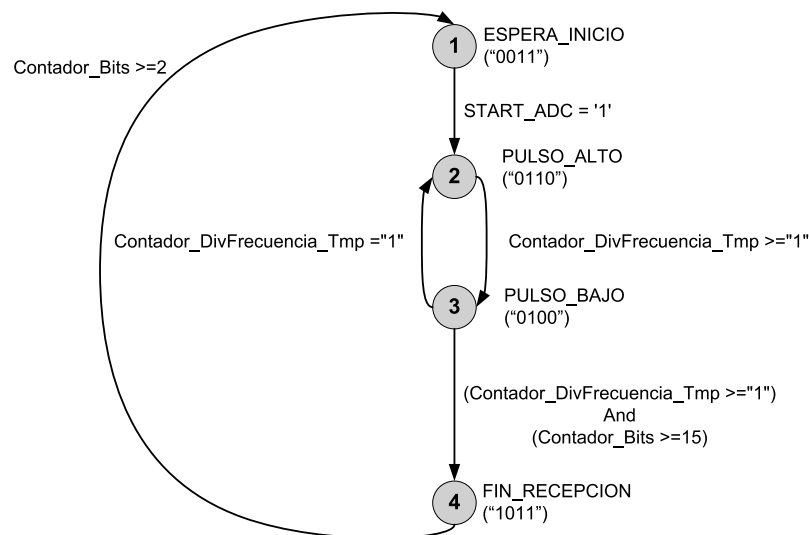


Figura 26 Máquina de estados para el control del proceso de comunicación con el ADC.

El valor de codificación de los estados se utiliza para dar valor a las señales de salida nCS y SCLK. De esta forma a cada bit de los valores utilizados para la codificación de los estados, se le asigna una señal de salida. Los valores de las salidas asignados para cada estado se pueden ver en la Tabla 1.

		ESTADOS			
		1) ESPERA_INICIO "0011"	2) PULSO_ALTO "0110"	3) PULSO_BAJO "0100"	4) FIN_RECEPCION "1011"
SALIDAS	nCS (bit 0)	1	0	0	1
	SCLK (bit 1)	1	1	0	1

Tabla 1 Valores que toman las señales de salida para los distintos estados de la máquina de estados.

3.2.2 Regulador tipo II-b

El dato DA obtenido del conversor y el resto de señales que intervienen en el control, tienen formato $\langle w, q \rangle$, donde w es el número de bits totales del dato y q el número de bits de la parte fraccionaria del mismo.

En este caso el dato del conversor ($\langle 8, 0 \rangle$) se suministra a una referencia VREF ($\langle 8, 0 \rangle$) establecida, con la que proporcionar el error al regulador.

Como se ha comentado en el apartado 3.2, las operaciones aritméticas del regulador (13) se van a distribuir en ciclos de reloj, de tal forma que en cada uno se realice una operación de multiplicación y acumulación (MAC). La Tabla 2 muestra las operaciones de la unidad MAC.

Ciclo	X	Y	ACC
N2	b_0	$e(k)$	$ACC \leftarrow X \times Y$
N2+1	b_1	$e(k-1)$	$ACC \leftarrow ACC + X \times Y$
N2+2	b_2	$e(k-2)$	$ACC \leftarrow ACC + X \times Y$
N2+3	$-a_1$	$d(k-1)$	$ACC \leftarrow ACC + X \times Y$
N2+4	$-a_2$	$d(k-2)$	$ACC \leftarrow ACC + X \times Y$

Tabla 2 Operación de la unidad MAC

Para realizar la unidad MAC se ha diseñado un contador ascendente de tres bits (CNT_CICLOS_CRT), para realizar las operaciones del regulador en su debido momento.

Para almacenar el error actual $e(k)$ (e_0), el error anterior $e(k-1)$ (e_1) y el error anterior anterior $e(k-2)$ (e_2), se ha diseñado un registro de desplazamiento con tres biestables. Por otro lado, se ha realizado un registro de desplazamiento con dos biestables, para almacenar el ciclo de servicio anterior $d(k-1)$ (d_1) y el ciclo de servicio anterior anterior $d(k-2)$ (d_2).

Para hacer sintetizable el código, se ha trabajado con coma fija mediante señales y constantes de tipo signed, de manera que las operaciones sean con números enteros con signo. Al igual que en el tema 4 de [17], se ha determinado el formato de cada una de las señales y constantes, quedando recogidas en la Tabla 3.

Señal	Formato $\langle w, q \rangle$	
e_0, e_1, e_2	$\langle 9, 0 \rangle$	
d, d_1, d_2	$\langle 20, 10 \rangle$	
ACC	$\langle 41, 27 \rangle$	
Constante	Formato $\langle w, q \rangle$	Valor
b_0	$\langle 18, 13 \rangle$	87327
b_1	$\langle 18, 13 \rangle$	10813
b_2	$\langle 18, 13 \rangle$	-76431
$-a_1$	$\langle 18, 17 \rangle$	-74895
$-a_2$	$\langle 18, 17 \rangle$	-56177

Tabla 3 Formato de las constantes y señales en coma fija.

El resultado de la celda MAC (d), se ha almacenado en la señal de salida del regulador (IREF) de 9 bits ($\langle 8, 0 \rangle$).

3.2.3 Rampa digital de compensación

La amplitud de la rampa digital de compensación se ha determinado en el anexo 5, siendo 0.7 voltios aproximadamente. Para diseñarla en VHDL, se ha dividido por cuatro el contador CNT_TS, dado que el valor máximo de éste equivale a 3.3 voltios (máxima tensión a la salida de los pines de la FPGA).

La rampa obtenida (RAMPA_COMP (<7,0>)) se ha limitado entre un 20% y un 80% de su amplitud. El resultado de dicha limitación se ha almacenado en la señal RAMPA_C (<7,0>), que se ha sustraído a IREF, resultando la señal de entrada al conversor $\Sigma\Delta$ (IREF_COMP (<8,0>)).

IREF_COMP también ha sido limitada a un valor máximo equivalente a 3 voltios, evitando de este modo la saturación del $\Sigma\Delta$, ya que el valor máximo a la entrada del mismo son 3.3 voltios. El límite inferior se ha establecido en un valor equivalente a 0.4 voltios, siendo este el valor de la medida del rizado de la corriente, asegurando el modo de conducción continua del convertidor.

3.2.4 Conversor DA sigma-delta de segundo orden

Para realizar en VHDL el conversor sigma delta, se ha partido del modelo que aparece en [15]. La Figura 27 muestra dicho modelo con las señales que intervienen en la conversión:

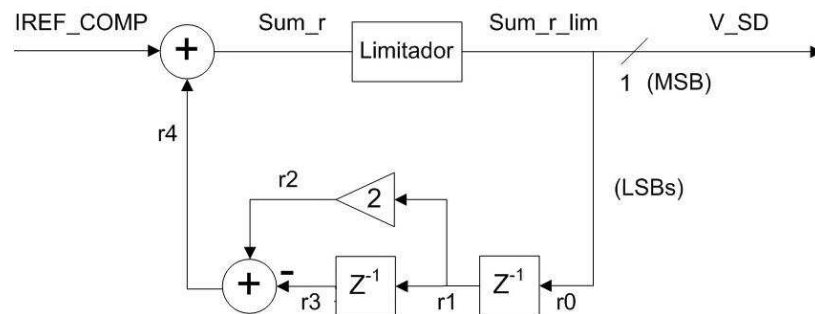


Figura 27 Modelo del conversor sigma delta de segundo orden.

Los formatos de las señales se recogen en la siguiente tabla

Señal	Formato <w, q>
<i>IREF_COMP</i>	< 9, 0 >
<i>Sum_r, r₄</i>	< 11, 0 >
<i>Sum_r_lim, r₂</i>	< 10, 0 >
<i>r₀, r₁, r₃</i>	< 9, 0 >
<i>V_SD</i>	< 1, 0 >

Tabla 4 Formato de las señales que intervienen en el conversor sigma delta.

Para implementar el conversor se ha realizado un registro de desplazamiento cada ciclo de CLK con dos biestables para determinar r1 y r3. Por otra parte se ha limitado la señal Sum_r a $2^{n_{Sum_r_lim}} - 1$ bits, para evitar desbordamientos en el lazo de realimentación.

3.2.5 Biestable RS

La salida del biestable RS (Q) se ha diseñado en función de sus señales de control. SET_BIESTABLE ha de activar dicha salida cada T_{sw} y se ha obtenido a partir del período calculado en el apartado 3.2. RST_BIESTABLE ha de desactivar la salida y procede de la comparación analógica de RAMPA_SD reconstruida (VC2) y la corriente medida en la bobina (Ri·IL).

3.2.6 Arranque del convertidor suave (Soft start)

Para realizar el arranque del convertidor se ha incrementado el ciclo de servicio (d) en una unidad, cada periodo de conmutación. Dicho incremento se ha limitado al valor del ciclo de servicio nominal ($D=0.5$), el cual equivale a la mitad del valor máximo de CNT_TS, ya que su máximo corresponde a todo un período de conmutación ($D=1$). Cuando el dato proporcionado por el conversor supere el equivalente a 1.9 voltios, se implantará el control de corriente.

3.3 Resultados simulación en Modelsim

El funcionamiento del control, se ha simulado sobre el test bench mediante la herramienta Modelsim. La Figura 28 muestra la simulación completa realizada.

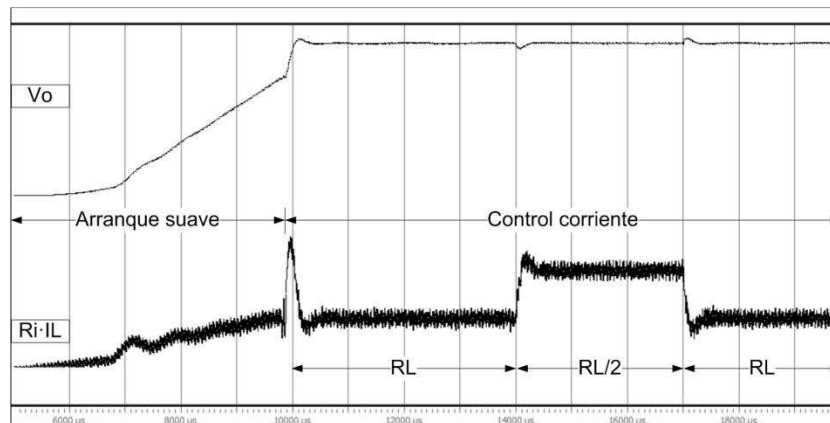


Figura 28 Simulación del control VHDL en Modelsim.

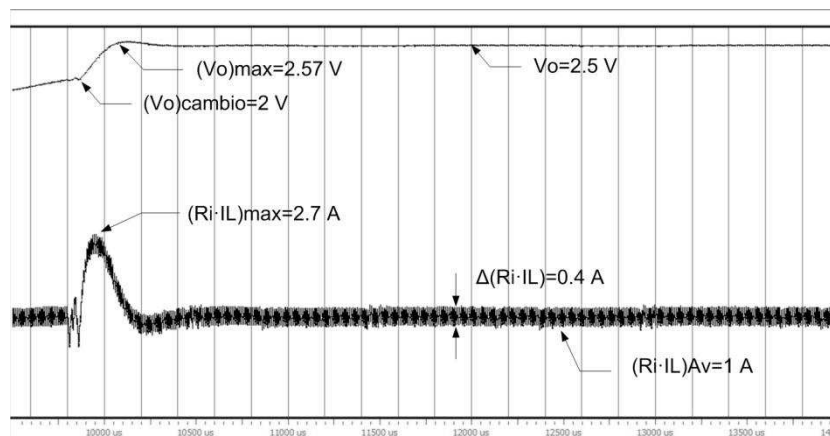


Figura 29 Detalle del cambio de control y funcionamiento del control de corriente.

La Figura 29 muestra el detalle del cambio de control, donde la corriente adquiere un pico máximo de:

$$(i_L)_{max} = \frac{(R_i \cdot i_L)_{max}}{R_i} = \frac{2.7}{2} = 1.35 \text{ A} \quad (17)$$

Su valor medio en régimen permanente:

$$(i_L)_{Av} = \frac{(R_i \cdot i_L)_{Av}}{R_i} = \frac{1}{2} = 0.5 \text{ A} \quad (18)$$

Y el rizado de la misma es:

$$\Delta i_L = \frac{\Delta(R_i \cdot i_L)}{R_i} = \frac{0.4}{2} = 0.2 \text{ A} \quad (19)$$

Por otra parte, la tensión adquiere un valor máximo en el cambio de 2.57 voltios, con un error de posición nulo en régimen permanente.

La Figura 30 muestra la respuesta del control ante cambios en la carga del convertidor.

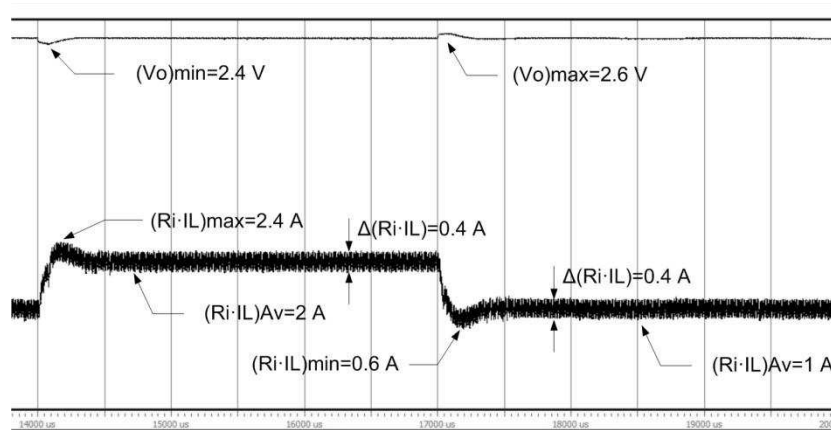


Figura 30 Detalle del funcionamiento del control de corriente ante cambios de carga.

Al reducir la carga a la mitad de su valor la corriente tiene un máximo de:

$$(i_L)_{max} = \frac{(R_i \cdot i_L)_{max}}{R_i} = \frac{2.4}{2} = 1.2 \text{ A} \quad (20)$$

EL rizado de la misma es:

$$\Delta i_L = \frac{\Delta(R_i \cdot i_L)}{R_i} = \frac{0.4}{2} = 0.2 \text{ A} \quad (21)$$

Y su valor medio en régimen permanente:

$$(i_L)_{Av} = \frac{(R_i \cdot i_L)_{Av}}{R_i} = \frac{2}{2} = 1 \text{ A} \quad (22)$$

La tensión en este caso cae hasta un mínimo de 2.41 voltios y se recupera al valor establecido en la referencia en aproximadamente 200 μs.

Al establecer la carga en su valor inicial la corriente tiene un mínimo de:

$$(i_L)_{max} = \frac{(R_i \cdot i_L)_{max}}{R_i} = \frac{0.6}{2} = 0.3 \text{ A} \quad (23)$$

La tensión en este caso asciende hasta un máximo de 2.6 voltios y se establece en el valor de la referencia en aproximadamente 200 μs .

4 Resultados experimentales

Para la comprobar el funcionamiento del control de manera experimental, la PCB se ha conectado a la placa Nexys2 a través de uno de sus conectores PMOD. Mediante el software de programación para FPGA ISE 10.1 de Xilinx, se han asignado las señales que intervienen en el control a los pines del citado conector.

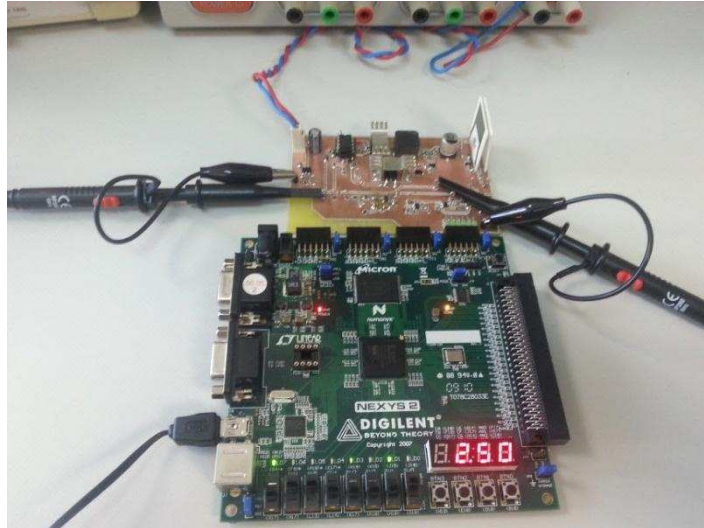


Figura 31 Montaje experimental del convertidor (arriba) y la tarjeta Nexys 2 (abajo).

En la Figura 32 se observa el montaje realizado para la obtención de medidas experimentales mediante el osciloscopio y la tensión de salida en el visualizador BCD 7 segmentos de la tarjeta Nexys 2.

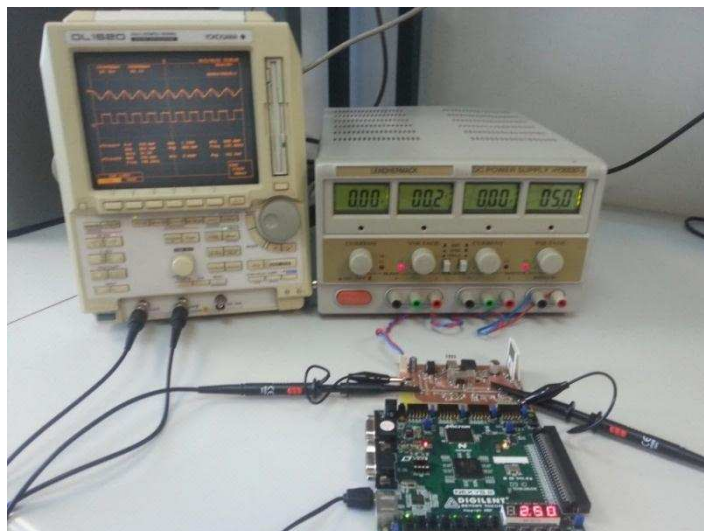


Figura 32 Montaje para la obtención de medidas experimentales.

Para obtener los resultados experimentales se ha usado un osciloscopio Yokowawa modelo DL1520, con el que medir las señales. Para obtener la tensión de entrada continua con la que alimentar a la tarjeta diseñada, se ha trabajado con una fuente de alimentación Lenchermack.

La Figura 33 muestra la captura de las formas de onda de la tensión a la salida (CH2) y la medida de la corriente (CH1) en el cambio de control.

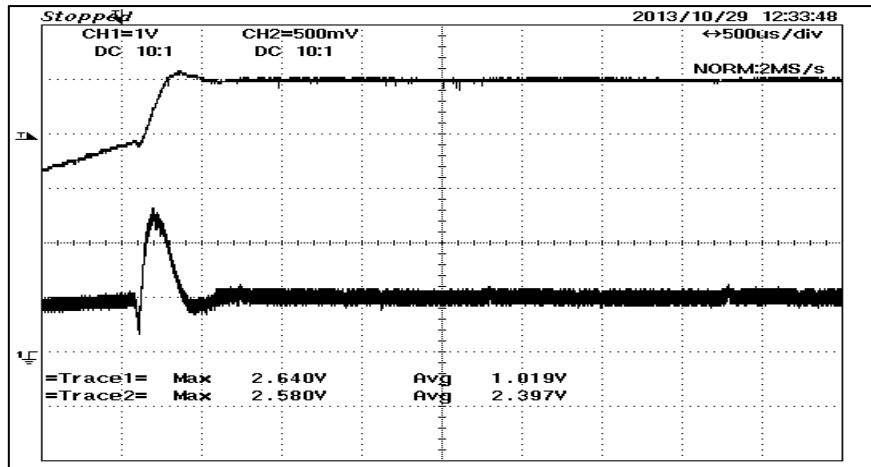


Figura 33 Captura de V_o e $R_L \cdot I_L$ en el cambio de control y el control de corriente.

La corriente tiene un pico cuyo valor máximo es:

$$(i_L)_{max} = \frac{2.64}{2} = 1.32 \text{ A} \quad (24)$$

Su valor medio en régimen permanente es:

$$(i_L)_{Av} = \frac{1}{2} = 0.5 \text{ A} \quad (25)$$

Y el rizado de la misma es:

$$\Delta i_L = \frac{0.4}{2} = 0.2 \text{ A} \quad (26)$$

La tensión a la que se produce el cambio es 1.9 voltios, su valor máximo es 2.58 voltios y en régimen permanente es 2.5 voltios.

La Figura 34 muestra las mismas medidas en el momento de un cambio de carga a la mitad de su valor.

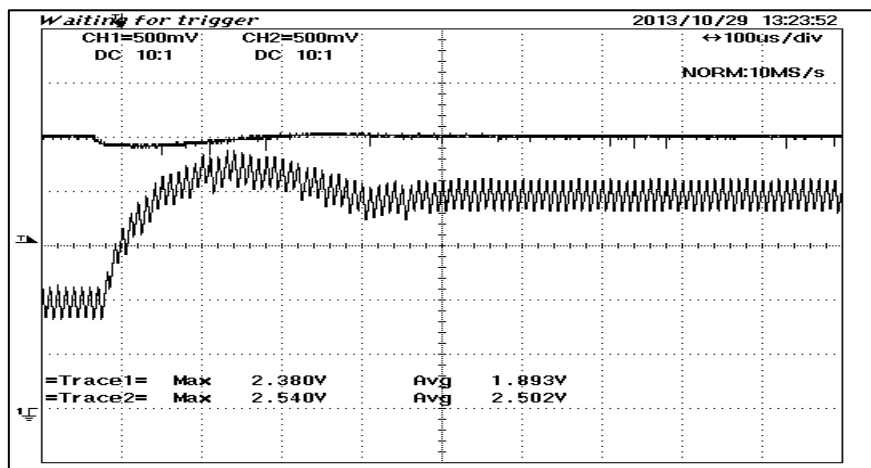


Figura 34 Captura de V_o e $R_L \cdot I_L$ en el cambio de carga a la mitad de su valor.

La corriente tiene un valor máximo de:

$$(i_L)_{max} = \frac{2.38}{2} = 1.19 \text{ A} \quad (27)$$

Su valor medio en régimen permanente es:

$$(i_L)_{Av} = \frac{1.9}{2} = 0.95 \text{ A} \quad (28)$$

Y el rizado de la misma es:

$$\Delta i_L = \frac{0.4}{2} = 0.2 \text{ A} \quad (29)$$

La tensión carga decrece hasta 2.38 voltios, alcanzando de nuevo la tensión de referencia en aproximadamente 200 μs .

La Figura 34 muestra el momento de un cambio de carga a la totalidad de su valor.

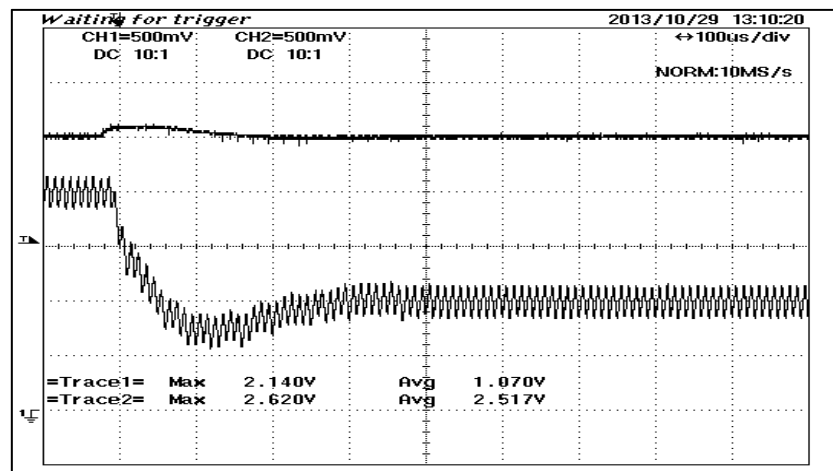


Figura 35 Captura de V_o e $R_L \cdot I_L$ en el cambio de carga a la totalidad de su valor.

La corriente tiene un valor mínimo de:

$$(i_L)_{min} = \frac{0.6}{2} = 0.3 \text{ A} \quad (30)$$

Su valor medio en régimen permanente es:

$$(i_L)_{Av} = \frac{1}{2} = 0.5 \text{ A} \quad (31)$$

Y el rizado de la misma es:

$$\Delta i_L = \frac{0.4}{2} = 0.2 \text{ A} \quad (32)$$

La tensión aumenta hasta 2.62 voltios, alcanzando de nuevo la tensión de referencia en aproximadamente 200 μs .

La Tabla 5 muestra la comparación entre los resultados obtenidos en Simulink, los obtenidos en Modelsim y las medidas experimentales, siendo prácticamente idénticos.

		Simulink	Modelsim	Medida experimental
Cambio de control	$(i_L)_{\max}$	1.34 A	1.35 A	1.32 A
	$(V_o)_{\max}$	2.55 V	2.57 V	2.58 V
Control de corriente	$(i_L)_{Av}$	0.5 A	0.5 A	0.5 A
	Δi_L	0.2 A	0.2 A	0.2 A
Cambio de carga RL \rightarrow RL/2	$(i_L)_{\max}$	1.19	1.2 A	1.19 A
	$(i_L)_{Av}$	1 A	1 A	0.95 A
	Δi_L	0.2 A	0.2 A	0.2 A
	$(V_o)_{\min}$	2.45 V	2.41 V	2.38 V
	$t_{\text{recuperación}}$	200 μ s	200 μ s	200 μ s
Cambio de carga RL/2 \rightarrow RL	$(i_L)_{\min}$	0.25 A	0.3 A	0.3 A
	$(V_o)_{\max}$	2.57 V	2.6 V	2.62 V
	$t_{\text{recuperación}}$	200 μ s	200 μ s	200 μ s

Tabla 5 Comparativa de resultados de la simulación de Simulink, Modelsim y las medidas experimentales.

5 Conclusiones y trabajo futuro

De los objetivos marcados al principio del presente trabajo, se han llevado a cabo todos y cada uno de ellos.

En primer lugar se ha realizado una modelización matemática del convertidor y su control, con la que se ha diseñado un regulador a través de Matlab, cumpliendo una serie de especificaciones para que el sistema sea estable.

Diseñado el regulador, se ha implementado el convertidor y el control de corriente con señales continuas, con la herramienta SimPowerSystems de Simulink, obteniendo resultados satisfactorios. Después se ha realizado un control discreto en la herramienta citada, de cara a la implementación en FPGA, donde se ha discretizado el regulador, se ha modelado el conversor $\Sigma\Delta$ digital y el filtro paso bajo, siendo los resultados muy similares a los del modelo continuo.

Dado el correcto funcionamiento del control en simulación, se ha realizado el control en VHDL y se ha comprobado mediante la herramienta Modelsim que el funcionamiento del mismo es idéntico al implementado en Matlab. Siendo así, se ha programado la FPGA y se ha realizado el control sobre la PCB diseñada en este trabajo.

Por último se han realizado medidas experimentales de las señales del control, obteniendo unos resultados prácticamente idénticos a los extraídos en las simulaciones.

De cara a un futuro, la PCB diseñada se ha dejado en el departamento de electrónica y comunicaciones de la universidad de Zaragoza, por si se realizara otro tipo de control en el que sean necesarios los lazos de realimentación de tensión y corriente. También cabe la posibilidad de poder realizar el control de un buck síncrono.

Otra posibilidad es la enseñanza del control por corriente de pico en la asignatura "Control Digital de Etapas Electrónicas de Potencia", impartida en el máster en ingeniería electrónica de la universidad de Zaragoza.

Anexos

1. Diseño del convertidor

La Figura 36 muestra el circuito típico de un convertidor buck con carga resistiva. En dicho circuito, se puede apreciar la consideración de la resistencia interna del condensador, de cara a la modelización del mismo.

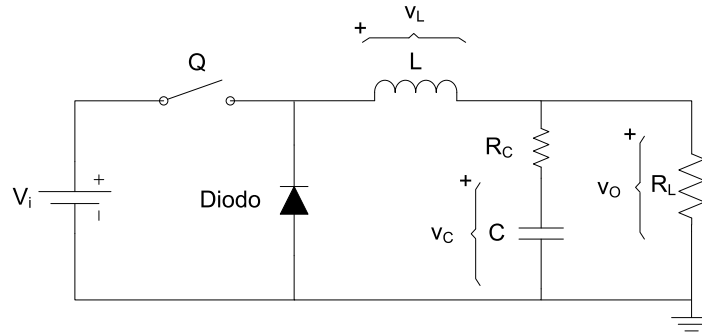


Figura 36 Convertidor buck con carga resistiva.

Para realizar su diseño, al igual que en [18], se han partido de las siguientes especificaciones:

Parámetro	Símbolo	Valor
Tensión de entrada	V_i	5 V
Tensión de salida,	V_O	2.5 V
Corriente de salida	I_O	1 A
Rizado de la tensión de salida	ΔV_O	< 50 mV
Tensión de saturación del transistor	V_{sat}	0.11 V
Resistencia en conducción del transistor	$R_{DS(on)}$	0.11 Ω
Impedancia térmica unión ambiente del transistor	θ_{JAT}	110°C/W
Tensión en conducción del diodo	V_D	0.5 V
Impedancia térmica unión ambiente del diodo	θ_{JAD}	115°C/W
Frecuencia de conmutación	f_{sw}	100 kHz
Temperatura ambiente	T_A	50°C

Tabla 6 Especificaciones de partida para el diseño del convertidor buck.

▪ Ciclo de servicio

Con los datos de partida lo primero que se ha determinado es el ciclo de servicio nominal en modo de conducción continua:

$$D = \frac{V_O}{V_i} = \frac{2.5}{5} = 0.5 \quad (33)$$

▪ Filtro de salida (L-C)

Bobina (L)

El valor de la bobina, se ha elegido para mantener la operación en modo continuo hasta un 10% de la corriente de salida nominal.

El valor del rizado pico a pico de dicha corriente es:

$$\Delta I_O = 2 \cdot 0.1 \cdot I_O = 2 \cdot 0.1 \cdot 1 = 0.2 \text{ A} \quad (34)$$

El rizado de la corriente se puede definir en función de la tensión en la bobina (V_L), el tiempo de conmutación a on del transistor (t_{on}) y el propio valor de la bobina (L).

$$\Delta I_O = \frac{V_L \cdot t_{on}}{L} = \frac{V_L \cdot D}{L \cdot f_{sw}} \quad (35)$$

La tensión en la bobina es:

$$V_L = V_i - V_{sat} - V_o = 5 - 0.11 - 2.5 = 2.39 \text{ V} \quad (36)$$

Despejando L de (35) y sustituyendo los valores determinados en (33), (34) y (36), resulta:

$$L = \frac{V_L \cdot D}{\Delta I_O \cdot f_{sw}} = \frac{2.39 \cdot 0.5}{0.2 \cdot 100 \cdot 10^3} = 59.75 \mu\text{H} \quad (37)$$

Este valor corresponde al mínimo para asegurar la conducción continua, por lo que se ha elegido una bobina EPCOS modelo B82477P4683M000 de 68 μH .

Condensador (C)

El condensador, se ha elegido par limitar el rizado de la tensión de salida (ΔV_O) definido en las especificaciones de la Tabla 6. Los tres elementos que contribuyen al rizado son: la resistencia equivalente serie (ESR), La inductancia equivalente serie (ESL) y el propio valor del condensador (C). Suponiendo que todo el rizado de corriente circula por el condensador y aproximando ESR a cero, el valor del condensador es:

$$C = \frac{\Delta I_O}{8 \cdot f_{sw} \cdot \Delta V_O} = \frac{0.2}{8 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 5 \mu\text{F} \quad (38)$$

Suponiendo que la capacidad es muy grande, el ESR necesario para limitar el rizado a 50 mV es:

$$ESR = \frac{\Delta V_O}{\Delta I_O} = \frac{0.05}{0.2} = 250 \text{ m}\Omega \quad (39)$$

La capacidad debe elegirse al menos 10 veces mayor a la mínima calculada en (38), con un ESR entre el 10% y el 50% del máximo calculado y con una tensión de al menos $1.5 \cdot V_i$.

En este caso se ha elegido un condensador Panasonic modelo EEEFP1V221AP de 220 μF , 35 V, el cual posee una ESR de 25 m Ω a 100kHz.

▪ Transistor (Q)

El transistor elegido para el diseño es un MOSFET canal P, de International Rectifier, modelo IRFR5505PBF. La elección de un canal P simplifica el circuito de disparo del mismo, minimizando los componentes a utilizar.

Para determinar la temperatura que se alcanza en la unión del transistor, se han calculado las pérdidas en conducción:

$$P_{Tcond} = R_{DS(on)} \cdot I_O^2 \cdot D = 0.11 \cdot 1^2 \cdot 0.5 = 55 \text{ mW} \quad (40)$$

Y en conmutación:

$$P_{Tsw} = 0.5 \cdot V_i \cdot I_O \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{sw} = 0.5 \cdot 5 \cdot 1 \cdot (28 + 16) \cdot 10^{-9} \cdot 10^5 = 11 \text{ mW} \quad (41)$$

Las pérdidas totales en el transistor son:

$$P_T = P_{Tcond} + P_{Tsw} = 55 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot 10^{-3} = 66 \text{ mW} \quad (42)$$

Con estas pérdidas, θ_{JAT} y T_A se ha calculado la temperatura de la unión:

$$T_J = T_A + \theta_{JAT} \cdot P_T = 50 + 110 \cdot 66 \cdot 10^{-3} = 57.26 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (43)$$

En teoría no es necesaria la inclusión de un disipador para el transistor, ya que la temperatura en la unión no supera la máxima permitida por el fabricante ($T_{Jmax}=150^\circ\text{C}$). En la práctica por motivos de seguridad se ha incluido un disipador FISCHER ELEKTRONIK modelo FK 244 08 D PAK, con una impedancia térmica de 31.5°C/W .

▪ Diodo

El diodo conduce cuando el transistor se encuentra en corte proporcionando un camino de circulación a la corriente por la bobina. El elegido para ello es un diodo VISHAY modelo SS2P3L, este cumple con las características necesarias para el funcionamiento como diodo de libre circulación en convertidor buck. Dichas características son una baja caída de tensión en conducción para minimizar pérdidas y rapidez en su recuperación en inversa.

La temperatura que se alcanza en la unión del diodo, se ha determinado a partir de las pérdidas en el mismo:

$$P_{Dcond} = V_D \cdot I_O \cdot (1 - D) = 0.5 \cdot 1 \cdot (1 - 0.5) = 250 \text{ mW} \quad (44)$$

Con estas pérdidas, θ_{JAD} y T_A se ha calculado la temperatura de la unión:

$$T_J = T_A + \theta_{JAD} \cdot P_T = 50 + 115 \cdot 250 \cdot 10^{-3} = 78.75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (45)$$

No es necesaria la inclusión de un disipador para el diodo, ya que la temperatura en la unión no supera la máxima permitida por el fabricante ($T_{Jmax}=150^\circ\text{C}$).

2. Modelado del convertidor

Para modelar el convertidor buck en pequeña señal y obtener la función de transferencia del mismo, se han seguido por orden los siguientes pasos:

- 1) Extraer las dinámicas de la etapa mediante un análisis de ecuaciones de estado.
- 2) Perturbar las variables del sistema que intervienen en las dinámicas, en torno a un punto en estado estacionario.
- 3) Linealizar y obtener el modelo en pequeña señal.
- 4) Paso al campo transformado de Laplace y obtención de la función de transferencia.

1) Análisis de ecuaciones de estado

Las dinámicas citadas corresponden a la bobina y al condensador que forman la etapa. Hay dos posibles configuraciones de la etapa en función del estado del transistor, por consiguiente dos dinámicas de corriente de la bobina y otras dos de tensión del condensador.

- **Transistor ON, diodo OFF.**

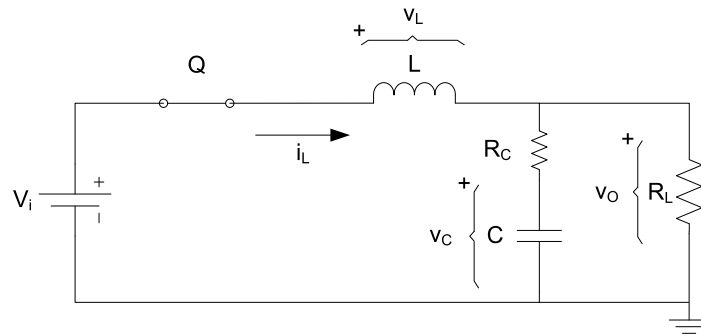


Figura 37 Circuito resultante con S ON y D OFF.

Analizando la etapa por mallas resulta:

$$v_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_i - v_o \quad (46)$$

Analizando la etapa por nudos resulta:

$$i_C = C \cdot \frac{dv_C}{dt} = i_L - i_o = i_L - \frac{v_o}{R_L} \quad (47)$$

Rescribiendo (47) queda:

$$\frac{v_o - v_C}{R_C} = i_L - \frac{v_o}{R_L} \quad (48)$$

Despejando v_o de (48):

$$v_o = \frac{R_L \cdot R_C \cdot i_L + v_C \cdot R_L}{R_L + R_C} \quad (49)$$

Sustituyendo (49) en (46), se ha despejado la dinámica de la corriente:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i}{L} - i_L \cdot \frac{R \cdot R_C}{L \cdot (R + R_C)} - v_C \cdot \frac{R}{L \cdot (R + R_C)} \quad (50)$$

Análogamente, sustituyendo (49) en (47), se ha despejado la dinámica de la tensión:

$$\frac{dv_C}{dt} = i_L \cdot \frac{R}{C \cdot (R + R_C)} - v_C \cdot \frac{1}{C \cdot (R + R_C)} \quad (51)$$

▪ **Transistor OFF, diodo ON**

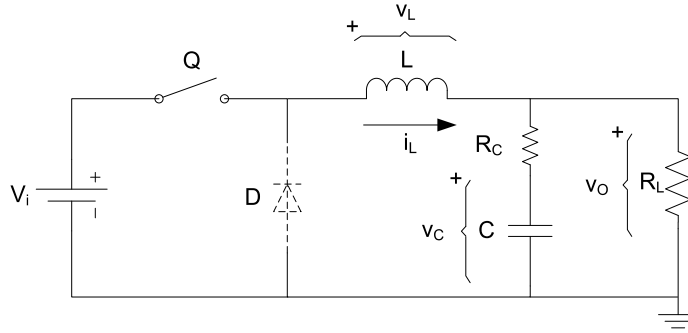


Figura 38 Circuito resultante con S OFF y D ON.

En este caso la dinámica de la corriente es la misma que la obtenida en (50), con la salvedad que la tensión de entrada es nula ($V_i = 0$), despreciando la caída de tensión de conducción del diodo.

$$\frac{di_L}{dt} = -i_L \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{L \cdot (R_L + R_C)} - v_C \cdot \frac{R_L}{L \cdot (R_L + R_C)} \quad (52)$$

La dinámica de la tensión en este caso es idéntica a la de (51).

$$\frac{dv_C}{dt} = i_L \cdot \frac{R_L}{C \cdot (R_L + R_C)} - v_C \cdot \frac{1}{C \cdot (R_L + R_C)} \quad (53)$$

Rescribiendo la dinámica de la corriente en función del ciclo de servicio (D):

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} = & D \cdot \left(\frac{V_i}{L} - i_L \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{L \cdot (R_L + R_C)} - v_C \cdot \frac{R_L}{L \cdot (R_L + R_C)} \right) + \\ & (1 - D) \cdot \left(-i_L \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{L \cdot (R_L + R_C)} - v_C \cdot \frac{R_L}{L \cdot (R_L + R_C)} \right) \end{aligned} \quad (54)$$

Desarrollando:

$$\frac{di_L}{dt} = D \cdot \frac{V_i}{L} - i_L \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{L \cdot (R_L + R_C)} - v_C \cdot \frac{R_L}{L \cdot (R_L + R_C)} \quad (55)$$

Análogamente, la dinámica de la tensión:

$$\begin{aligned} \frac{dv_C}{dt} = D \cdot \left(i_L \cdot \frac{R_L}{C \cdot (R_L + R_C)} - v_C \cdot \frac{1}{C \cdot (R_L + R_C)} \right) + \\ (1 - D) \cdot \left(i_L \cdot \frac{R_L}{C \cdot (R_L + R_C)} - v_C \cdot \frac{1}{C \cdot (R_L + R_C)} \right) \end{aligned} \quad (56)$$

Desarrollando:

$$\frac{dv_C}{dt} = i_L \cdot \frac{R_L}{C \cdot (R_L + R_C)} - v_C \cdot \frac{1}{C \cdot (R_L + R_C)} \quad (57)$$

2) Perturbación de variables

Suponiendo una tensión de entrada constante ($\hat{v}_i \cong 0$), las variables perturbadas son las siguientes:

$$D \rightarrow (D + \hat{d}), i_L \rightarrow (i_L + \hat{i}_L), v_C \rightarrow (v_C + \hat{v}_C) \quad (58)$$

Sustituyendo las perturbaciones en (55) resulta:

$$\frac{d(i_L + \hat{i}_L)}{dt} = (D + \hat{d}) \cdot \frac{V_i}{L} - (i_L + \hat{i}_L) \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{L \cdot (R_L + R_C)} - (v_C + \hat{v}_C) \cdot \frac{R_L}{L \cdot (R_L + R_C)} \quad (59)$$

Sustituyendo las perturbaciones en (57) queda:

$$\frac{d(v_C + \hat{v}_C)}{dt} = (i_L + \hat{i}_L) \cdot \frac{R_L}{C \cdot (R_L + R_C)} - (v_C + \hat{v}_C) \cdot \frac{1}{C \cdot (R_L + R_C)} \quad (60)$$

3) Modelo de pequeña señal

Para la obtención del modelo de pequeña señal se han desarrollado las ecuaciones de las dinámicas perturbadas, despreciando los términos de continua y los términos de segundo orden. Es decir, se han obtenido las dinámicas considerando únicamente los términos de primer orden ((61) y (62)).

$$\frac{d\hat{i}_L}{dt} = \hat{d} \cdot \frac{V_i}{L} - \hat{i}_L \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{L \cdot (R_L + R_C)} - \hat{v}_C \cdot \frac{R_L}{L \cdot (R_L + R_C)} \quad (61)$$

$$\frac{d\hat{v}_C}{dt} = \hat{i}_L \cdot \frac{R_L}{C \cdot (R_L + R_C)} - \hat{v}_C \cdot \frac{1}{C \cdot (R_L + R_C)} \quad (62)$$

4) Función de transferencia

A la hora de extraer la función de transferencia que modele el convertidor, debido al control corriente de pico que se va a implementar, el interés está en la relación existente entre la corriente (\hat{i}_L) y el ciclo de servicio (\hat{d}).

Para extraer la función de transferencia se han pasado las ecuaciones del modelo de pequeña señal al campo transformado de Laplace. De este modo (61) y (62) quedan:

$$s \cdot \hat{i}_L = \hat{d} \cdot \frac{V_i}{L} - \hat{i}_L \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{L \cdot (R_L + R_C)} - \hat{v}_C \cdot \frac{R_L}{L \cdot (R_L + R_C)} \quad (63)$$

$$s \cdot \hat{v}_C = \hat{i}_L \cdot \frac{R_L}{C \cdot (R_L + R_C)} - \hat{v}_C \cdot \frac{1}{C \cdot (R_L + R_C)} \quad (64)$$

Despejando \hat{v}_C de (64) resulta:

$$\hat{v}_C = \hat{i}_L \cdot \frac{R_L}{1 + C \cdot (R_L + R_C) \cdot s} \quad (65)$$

Sustituyendo (65) en (63) queda:

$$s \cdot \hat{i}_L = \hat{d} \cdot \frac{V_i}{L} - \hat{i}_L \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{L \cdot (R_L + R_C)} - \hat{i}_L \cdot \frac{R_L}{1 + C \cdot (R_L + R_C) \cdot s} \cdot \frac{R_L}{L \cdot (R_L + R_C)} \quad (66)$$

Desarrollando y agrupando términos, se obtiene la función de transferencia deseada:

$$\frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = V_i \cdot \frac{1 + C \cdot (R_L + R_C) \cdot s}{(R_L + R_C) \cdot L \cdot C \cdot s^2 + (R_L \cdot R_C \cdot C + L) \cdot s + R_L} \quad (67)$$

3. Funcionamiento del control

Como viene explicado en [1], pp. 439-489, el control por corriente de pico se basa en el esquema de la Figura 39.

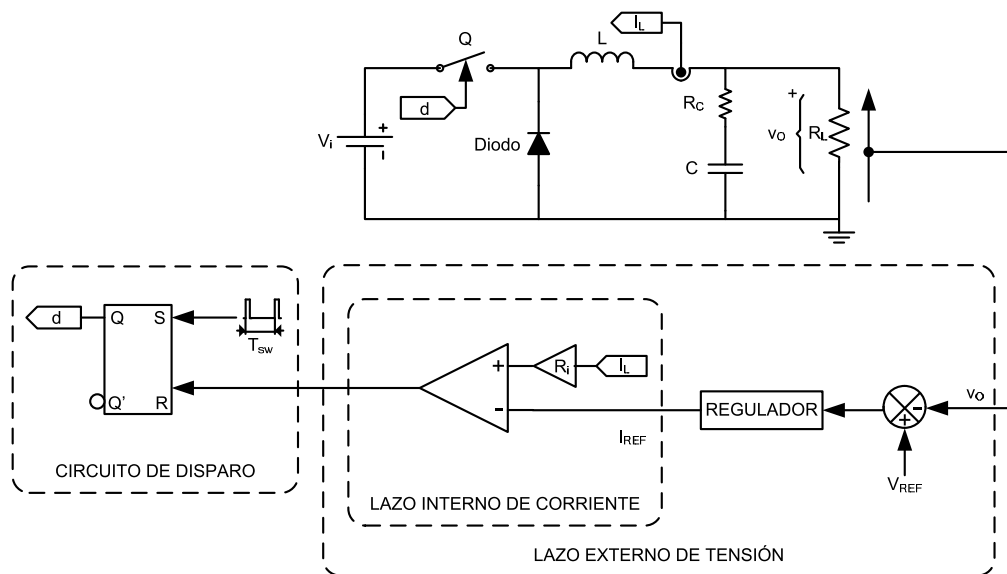


Figura 39 Diagrama del control modo corriente de pico.

Dicho control está formado por:

- **Lazo externo de tensión:** Este contiene un regulador con el que se controla la tensión de salida (V_o) a una referencia dada (V_{REF}), proporcionando una referencia para el lazo interno de corriente (I_{REF}).
- **Lazo interno de corriente:** En este se realiza la comparación entre la referencia de corriente y la corriente medida, siendo su salida activa cada vez que la corriente supere la de referencia.
- **Circuito de disparo:** Formado por un biestable RS que se activa (S) con un pulso al principio de cada periodo de conmutación (T_{sw}), conmutando el transistor a *on* e incrementando de este modo la corriente por la bobina. Cuando dicha corriente supera la de referencia, la salida del comparador resetea (R) el biestable, pasando a *off* el transistor, lo cual origina un decremento en la corriente.

Estando en conducción continua, la forma de onda de la corriente se asemeja a la mostrada en la Figura 40.

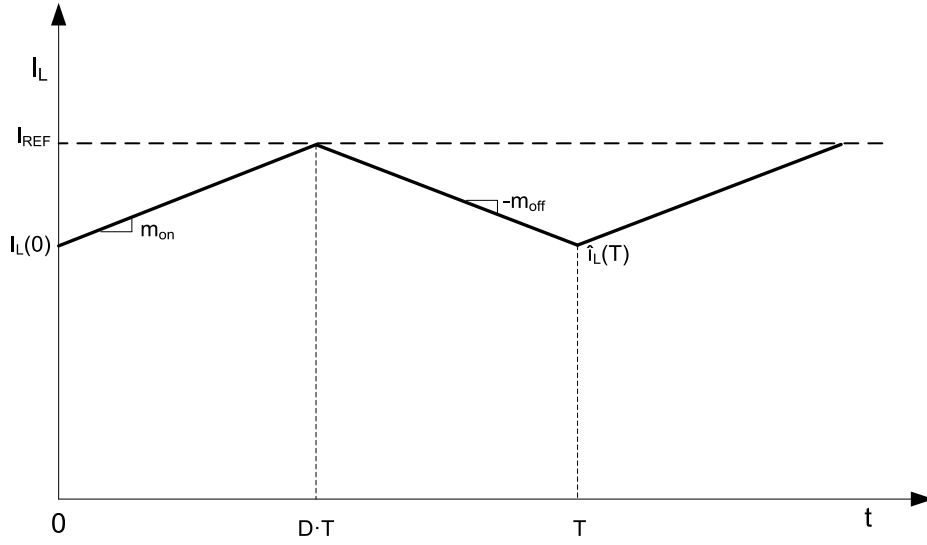


Figura 40 Forma de onda de corriente por la bobina.

Las expresiones que definen las pendientes de la corriente en ambos intervalos son:

$$m_{on} = \frac{V_i - v_o}{L} \quad (68)$$

$$m_{off} = \frac{v_o}{L} \quad (69)$$

En el primer intervalo (t_{on}) la corriente viene dada por la siguiente expresión:

$$I_L(d \cdot T) = I_{REF} = I_L(0) + m_{on} \cdot d \cdot T \quad (70)$$

En el segundo intervalo (t_{off}) la corriente viene dada por la siguiente expresión:

$$I_L(T) = I_L(d \cdot T) - m_{off} \cdot d' \cdot T \quad (71)$$

Sustituyendo (70) en (71) resulta:

$$I_L(T) = I_L(0) + m_{on} \cdot d \cdot T - m_{off} \cdot d' \cdot T \quad (72)$$

En situación de estado estacionario se da la siguiente igualdad:

$$I_L(T) = I_L(0) \quad (73)$$

Por consiguiente:

$$m_{on} \cdot D \cdot T - m_{off} \cdot D' \cdot T = 0 \quad (74)$$

Rescribiendo la ecuación se obtiene:

$$\frac{m_{off}}{m_{on}} = \frac{D}{D'} \quad (75)$$

Si se introduce una pequeña perturbación en la corriente $I_L(0)$:

$$I_L(0) = I_{L0} + \hat{i}_L(0) \quad (76)$$

La Figura 41 compara el efecto inicial de la perturbación y la forma de onda sin perturbar en estado estacionario.

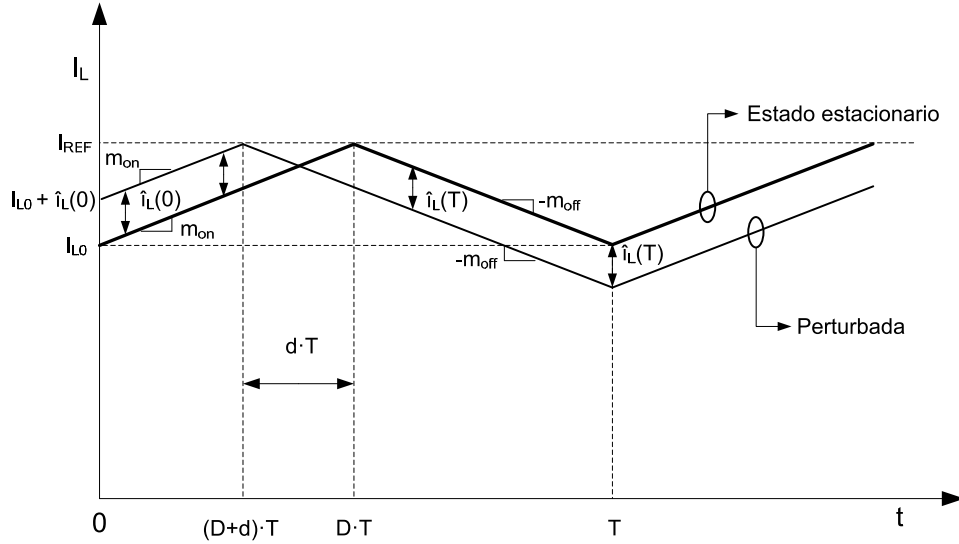


Figura 41 Efecto inicial al perturbar la corriente vs. Corriente en estado estacionario.

Los valores de las perturbaciones $\hat{i}_L(0)$ e $\hat{i}_L(T)$ se han determinado analizando el intervalo comprendido entre $(D+d)·T$ y $D·T$. La Figura 42 muestra el detalle de la Figura 41 en el intervalo citado.

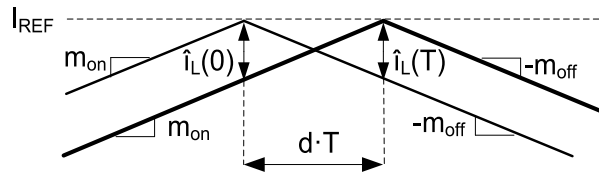


Figura 42 Detalle en el intervalo $(D+d)·T$ y $D·T$

Partiendo de la definición de pendiente de una recta entre dos puntos, se han determinado ambas perturbaciones:

$$\hat{i}_L(0) = -m_{on} \cdot \hat{d} \cdot T \quad (77)$$

$$\hat{i}_L(T) = m_{off} \cdot \hat{d} \cdot T \quad (78)$$

Al dividir (77) entre (78) y despejar $\hat{i}_L(T)$ resulta:

$$\hat{i}_L(T) = \hat{i}_L(0) \cdot \left(-\frac{m_{off}}{m_{on}} \right) = \hat{i}_L(0) \cdot \left(-\frac{D}{D'} \right) \quad (79)$$

Para el segundo periodo:

$$\hat{i}_L(2 \cdot T) = \hat{i}_L(T) \cdot \left(-\frac{D}{D'}\right) = \hat{i}_L(0) \cdot \left(-\frac{D}{D'}\right)^2 \quad (80)$$

Para el n -ésimo periodo:

$$\hat{i}_L(n \cdot T) = \hat{i}_L((n-1) \cdot T) \cdot \left(-\frac{D}{D'}\right) = \hat{i}_L(0) \cdot \left(-\frac{D}{D'}\right)^n \quad (81)$$

Analizando el módulo de la corriente

$$|\hat{i}_L(n \cdot T)| \rightarrow \begin{cases} 0, & \text{si } \left|\frac{D}{D'}\right| < 1 \text{ Estable} \\ \infty, & \text{si } \left|\frac{D}{D'}\right| > 1 \text{ Inestable} \end{cases} \quad (82)$$

De (82) se deduce que para un ciclo de servicio por debajo de 0.5, la perturbación desaparece con el paso de los periodos, asegurando la estabilidad del control. Por el contrario, para un ciclo de servicio igual o mayor a 0.5 la perturbación tiende a infinito, produciéndose inestabilidad en el control.

Para mitigar este problema y poder variar el ciclo en todo su rango ($0 < D < 1$), hay que incluir una rampa de compensación de corriente. La Figura 43 muestra el control de la Figura 39 con la rampa de compensación añadida.

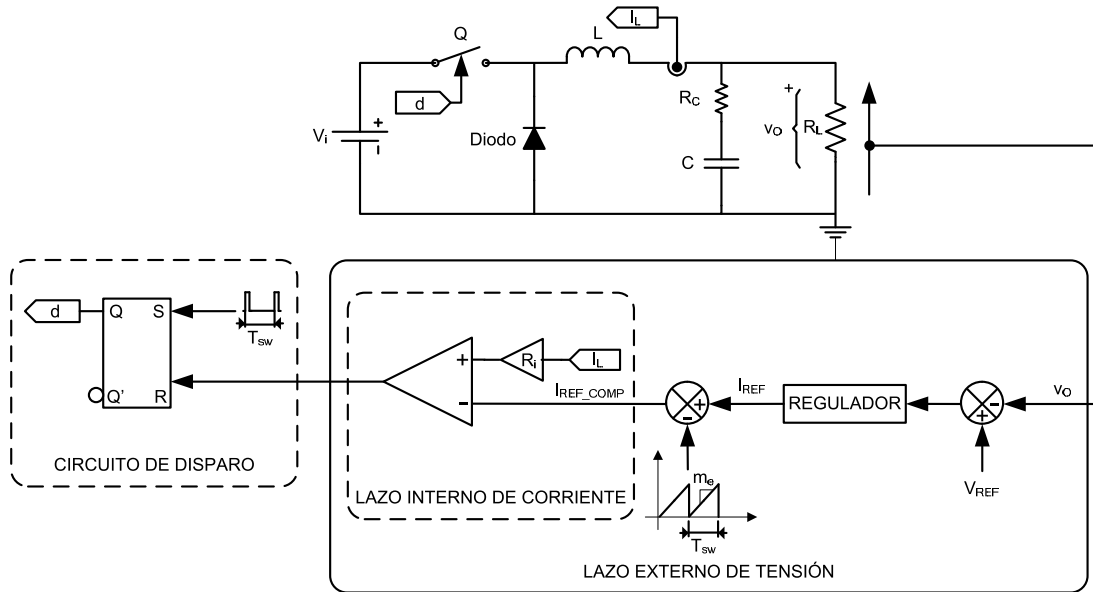


Figura 43 Diagrama del control modo corriente de pico con rampa de compensación

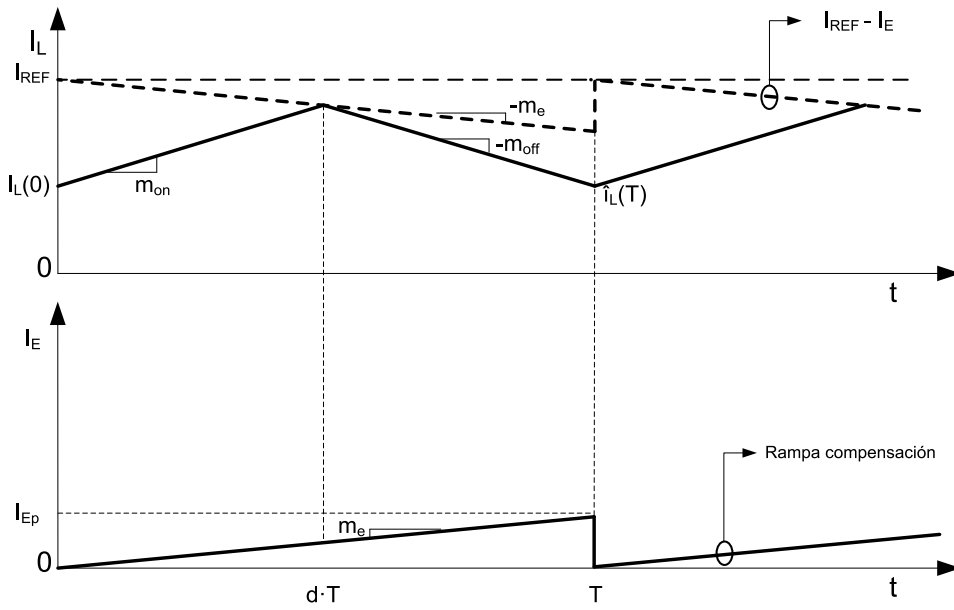


Figura 44 Forma de onda de corriente por la bobina con rampa de compensación.

El transistor conmutará a off si:

$$I_L(d \cdot T) = I_{REF} - I_E(d \cdot T) \quad (83)$$

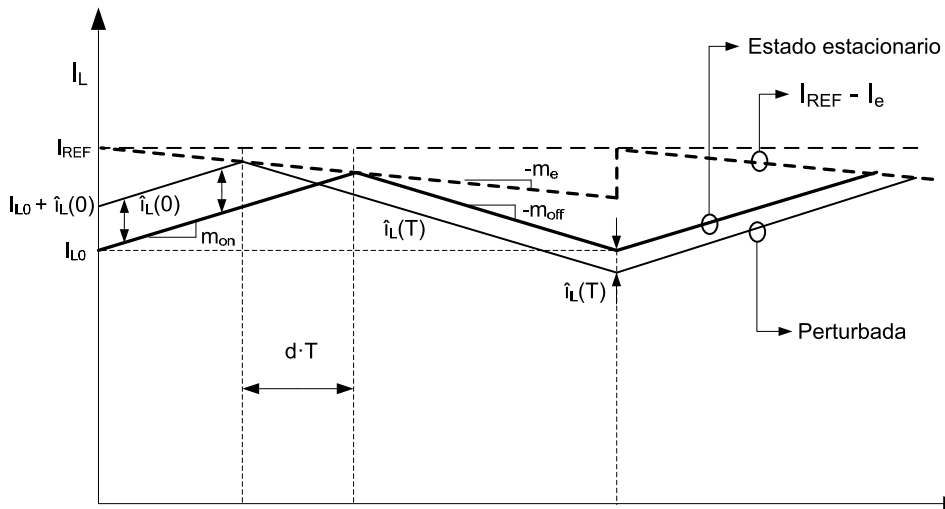


Figura 45 Efecto inicial al perturbar la corriente vs. Corriente en estado estacionario

Si del mismo modo que en la Figura 41 se introduce una pequeña perturbación en la corriente $I_L(0)$, el efecto inicial de la perturbación que se presenta se observa en la Figura 45.

Realizando un estudio de la perturbación periodo por periodo análogo al comprendido entre la (77) y (82), las perturbaciones resultan:

$$\hat{i}_L(0) = -\hat{d} \cdot T(m_{on} + m_e) \quad (84)$$

$$\hat{i}_L(T) = -\hat{d} \cdot T(m_e - m_{off}) \quad (85)$$

Para el primer periodo la corriente perturbada es:

$$\hat{i}_L(T) = \hat{i}_L(0) \cdot \left(-\frac{m_{off} - m_e}{m_{on} + m_e} \right) \quad (86)$$

Para el enésimo periodo:

$$\hat{i}_L(T) = \hat{i}_L((n-1) \cdot T) \cdot \left(-\frac{m_{off} - m_e}{m_{on} + m_e} \right) = \hat{i}_L(0) \cdot \left(-\frac{m_{off} - m_e}{m_{on} + m_e} \right)^n \quad (87)$$

Definiendo el parámetro alpha como:

$$\alpha = -\frac{m_{off} - m_e}{m_{on} + m_e} = -\frac{1 - m_e/m_{off}}{m_{on}/m_{off} + m_e/m_{off}} = \frac{1 - m_e/m_{off}}{D'/D + m_e/m_{off}} \quad (88)$$

Se deduce que:

$$|\hat{i}_L(n \cdot T)| \rightarrow \begin{cases} 0, & \text{si } |\alpha| < 1 \text{ Estable} \\ \infty, & \text{si } |\alpha| > 1 \text{ Inestable} \end{cases} \quad (89)$$

Valores que se suelen escoger de m_e son:

$$\begin{aligned} m_e &= m_{off} \\ m_e &= \frac{1}{2} \cdot m_{off} \end{aligned} \quad (90)$$

En este caso se ha escogido la primera de las opciones, siendo un punto de partida en las simulaciones del anexo 5.

4. Modelado del control

El modelo del control de corriente en pequeña señal, incluyendo la rampa de compensación, se ha extraído analizando la forma de onda de corriente por la bobina (I_L) y las formas de onda que intervienen en el control (I_{REF} e I_e), tal y como se muestra en la Figura 46.

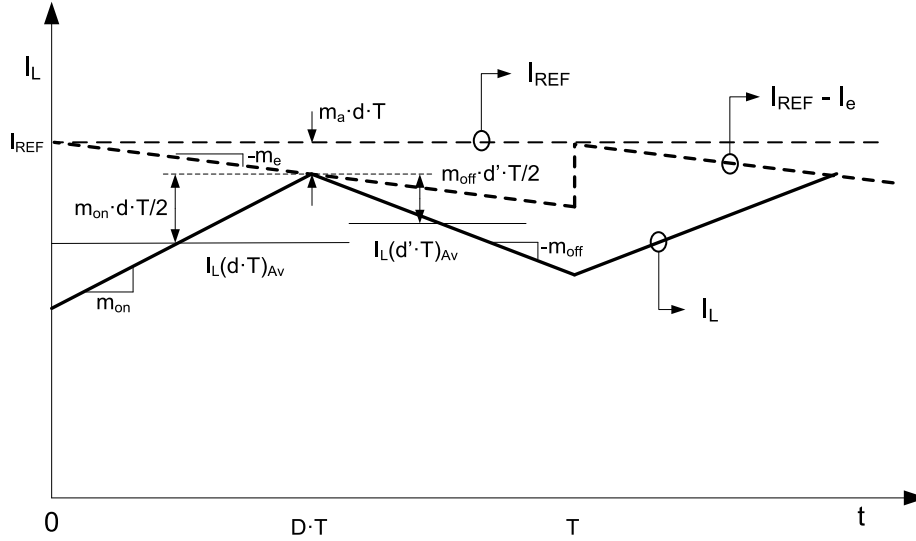


Figura 46 Forma de onda de corriente por la bobina con rampa de compensación.

De la Figura 46 se puede deducir la siguiente igualdad:

$$I_L + m_{on} \cdot \frac{D \cdot T}{2} = i_{REF} - m_e \cdot D \cdot T \quad (91)$$

Las variables perturbadas en torno a un punto de trabajo en estado estacionario son:

$$\begin{aligned} D &\rightarrow (D + \hat{d}), I_L \rightarrow (i_L + \hat{i}_L), i_{REF} \rightarrow (i_{REF} + \hat{i}_{REF}) \\ m_{on} &\rightarrow (m_{on} + \hat{m}_{on}), m_{off} \rightarrow (m_{off} + \hat{m}_{off}) \end{aligned} \quad (92)$$

De este modo (91) queda:

$$i_L + \hat{i}_L + (m_{on} + \hat{m}_{on}) \cdot \frac{(D + \hat{d}) \cdot T}{2} = i_{REF} + \hat{i}_{REF} - m_e \cdot (D + \hat{d}) \cdot T \quad (93)$$

Desarrollando, agrupando y despreciando los términos de segundo orden y de continua queda:

$$\hat{i}_L + m_{on} \cdot \frac{\hat{d} \cdot T}{2} + \hat{m}_{on} \cdot \frac{D \cdot T}{2} = \hat{i}_{REF} - m_e \cdot \hat{d} \cdot T \quad (94)$$

Llegado a este punto se puede modelar la relación entre el ciclo de servicio y la diferencia entre la referencia de corriente con rampa de compensación y la corriente medida en la bobina:

$$\hat{i}_{REF} - \hat{i}_L = m_e \cdot \hat{d} \cdot T + m_{on} \cdot \frac{\hat{d} \cdot T}{2} + \hat{m}_{on} \cdot \frac{D \cdot T}{2} \quad (95)$$

Desarrollando:

$$\left(\frac{2 \cdot (\hat{i}_{REF} - \hat{i}_L)}{m_{on}} \right) = \left(1 + \frac{2 \cdot m_e}{m_{on}} \right) \cdot \hat{d} \cdot T + \hat{m}_{on} \cdot \frac{D \cdot T}{m_{on}} \quad (96)$$

Definiendo factor n como:

$$n = \left(1 + \frac{2 \cdot m_e}{m_{on}} \right) \quad (97)$$

Sustituyendo (97) en (96) y despejando la perturbación del ciclo de servicio resulta:

$$\hat{d} = \left(\frac{2 \cdot (\hat{i}_{REF} - \hat{i}_L)}{m_{on} \cdot n \cdot T} \right) - \hat{m}_{on} \cdot \frac{D}{m_{on} \cdot n} \quad (98)$$

Conocido el valor de m_{on} :

$$m_{on} = \frac{V_i - v_o}{L} \begin{cases} \text{Desarrollando: } m_{on} = \frac{v_o \cdot (1-D)}{D \cdot L} \\ \text{Perturbando } V_i \text{ y } v_o: \hat{m}_{on} = \frac{\hat{v}_i}{L} - \frac{\hat{v}_o}{L} \end{cases} \quad (99)$$

Sustituyendo los resultados de (99) en (98) y desarrollando se obtiene la relación de la citada anteriormente con la compensación de posibles perturbaciones en V_i y v_o :

$$\hat{d} = \frac{2 \cdot D \cdot L}{v_o \cdot (1-D) \cdot T_{sw} \cdot n} \cdot (\hat{i}_{REF} - \hat{i}_L) - \frac{D^2}{v_o \cdot (1-D) \cdot n} (\hat{v}_i - \hat{v}_o) \quad (100)$$

De este modo se puede realizar un diagrama de bloques de control de corriente como el que se muestra en la Figura 47.

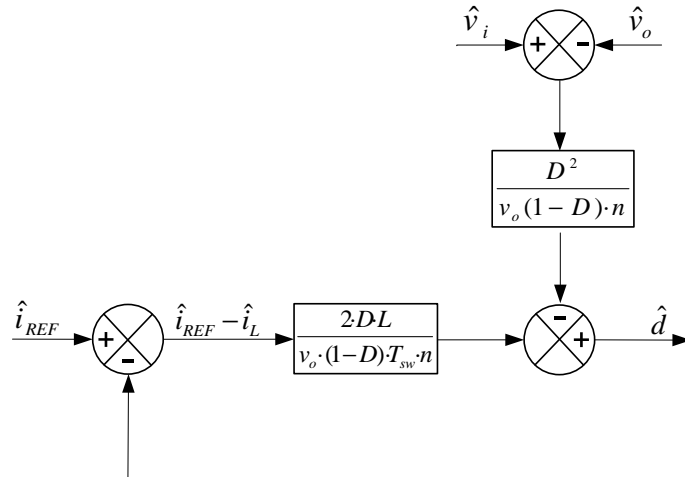


Figura 47 Diagrama de bloques resultante del control de corriente.

Una vez obtenido el anterior diagrama se ha ido construyendo modularmente el resto del control. En el anexo 2, se ha determinado la función de transferencia que relaciona el ciclo de servicio y la corriente por la bobina. Añadiendo dicha función al diagrama de la Figura 47 resulta:

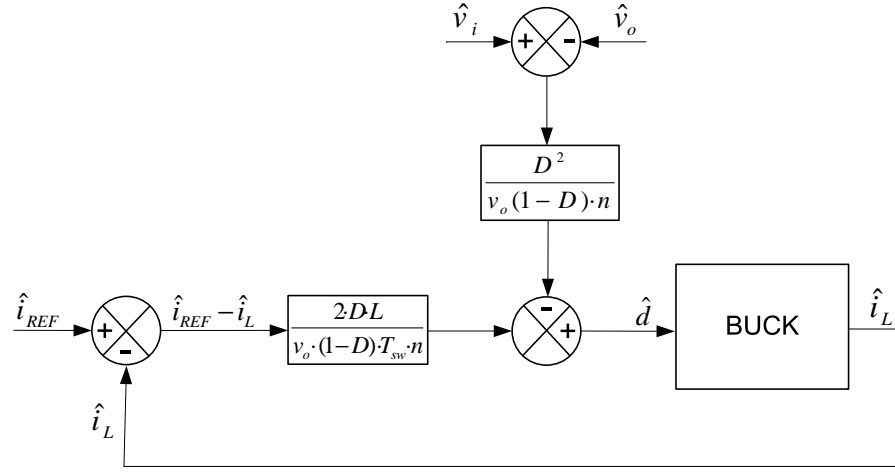


Figura 48 Diagrama de bloques control de corriente y función de transferencia del buck.

El siguiente paso es la inclusión del lazo de control de tensión. Para ello se ha determinado la tensión en la carga (101) a partir de la impedancia equivalente a la salida del convertidor y la corriente por la inductancia.

$$\hat{v}_o = \hat{i}_L \cdot Z_o(s) = \hat{i}_L \cdot \frac{(R_C \cdot C \cdot s + 1) \cdot R}{(R_C + R) \cdot C \cdot s + 1} \quad (101)$$

Se desea obtener un error de posición nulo de tensión y un margen de fase mínimo de 60 grados a la frecuencia de cruce del sistema. Como se explica en [14], el regulador a incluir en el sistema para cumplir dichas condiciones, es de tipo II-b y su expresión viene dada por:

$$H(s) = K \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1 + \frac{s}{w_z}}{1 + \frac{s}{w_p}} \quad (102)$$

La frecuencia de cruce del sistema (f_c), se ha ajustado mediante la ganancia K del regulador una década por debajo de la frecuencia de conmutación. El hecho de incluir un integrador para anular el error de posición, añade una fase de menos 90 grados a lo largo de todo el rango de frecuencias, pudiendo inestabilizar el sistema a la frecuencia de cruce. Para obtener el margen de fase deseado a dicha frecuencia y asegurar la estabilidad del sistema, se ha diseñado un PAF-PRF con el cero (w_z) y el polo (w_p) que forman el regulador tipo II-b respectivamente.

La Figura 49 muestra el diagrama de bloques que modela el comportamiento y el control por corriente de pico del convertidor buck.

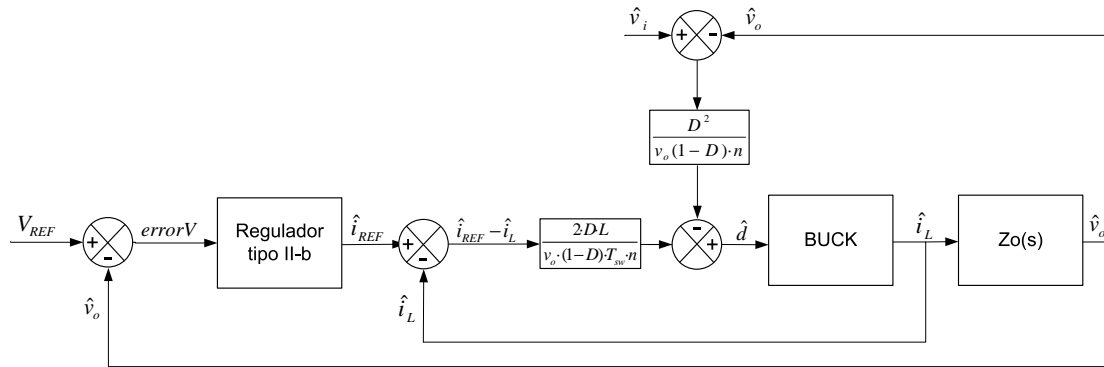


Figura 49 Diagrama de bloques del control modo pico corriente completo.

El ajuste del regulador se ha realizado mediante la herramienta Sisotool de Matlab en el anexo 5, donde se han desestimado las posibles perturbaciones en V_i , ya que esta se ha obtenido de una fuente de alimentación comercial. También se han despreciado posibles perturbaciones en v_o , ya que su rizado es despreciable frente a su valor medio, tal y como se ha determinado en el anexo 1.

5. Simulación del control en Matlab/Simulink

En este apartado de simulación se ha usado la herramienta Matlab / Simulink, para modelar la etapa de electrónica de potencia y ajustar su control. Los pasos que se han seguido para llevar a cabo la simulación son los siguientes:

- 1) Definición en Matlab de las funciones de transferencia del anexo 4 y el regulador diseñado previamente mediante Sisotool.
- 2) Determinación de la pendiente y amplitud de la rampa de compensación.
- 3) Modelo continuo del convertidor y su control mediante ecuaciones en Simulink.
- 4) Idem modelando el convertidor con la herramienta SimPowerSystems de Simulink.
- 5) Modelado del convertidor con SimPowerSystems discretizando el control del mismo.

A continuación se van a detallar los puntos citados anteriormente:

1) Funciones de transferencia en Matlab y ajuste del regulador.

El siguiente archivo .m de Matlab muestra la definición de las constantes del convertidor, las funciones de transferencia del mismo y del regulador:

```

%% Datos del convertidor
C=220e-6; %Capacidad filtro L-C
L=68e-6; %Bobina filtro L-C
RC=80e-3; %Resistencia interna del condensador
RL=5; %Carga resistiva
f=100e3; %Frecuencia de conmutación
T=1/f; %Período de conmutación
Vi=5; %Tensión de entrada
Vo=2.5; %Tensión de salida
D=Vo/Vi; %Ciclo de trabajo
Ri=2; % R shunt medida corriente

%% Control modo corriente de pico

% s como variable de Laplace
s=tf('s');

%Compensación perturbación en Vi y Vo
Fvi=D*T/(2*L);
Fvo=D*T/(2*L);

%Funciones de transferencia

%Gi=iL/d
Gi=(Vi/RL)*(1+s*C*(RL+RC))/(1+(s*((L/RL)+(C*RC)))+(s*s*(L*C*(RL+RC)/RL)));

%Impedancia equivalente de salida
Zo=(RC*s*C+1)*RL/((RC+RL)*s*C+1);

%Función de transferencia lazo interno de corriente

%Respuesta aproximada en lazo abierto a un primer orden para n=5
n=5;
%Cálculo del valor de pico de la rampa de compensación
Mon=(Vi-Vo)/L;%pendiente en estado on del transistor
Me=Mon*(n-1)/2;% Pendiente de la rampa de compensación
Arampa= Me*T;%Valor de pico de la rampa de compensación
FM = 2*L*D/(n*(1-D)*Vo*T);%Ganancia del modulador
TFi =FM*Gi/(1+Ri*FM*Gi);%Función de transferencia lazo de corriente

```

```
%Función de transferencia lazo interno corriente y lazo externo tensión

%Función de transferencia lazo abierto sin regulador
TFol = TFi*Zo;

%Regulador tipo II-b
wcz=1/7.5e-5; %frecuencia angular del cero
wcp=1/2e-6; %frecuencia angular del polo
k=282743;%Constante para ajustar la frecuencia de cruce a 1 década por
% debajo de la frecuencia de conmutación
I=1/s; %Parte integral del regulador
NumC=(1+(s/wcz)); %Numerador regulador PAF+PRF
DenC=(1+(s/wcp)); %Denominador regulador PAF+PRF
TFcp=NumC/DenC; %Función de transferencia del regulador PAF+PRF

%Función de transferencia en lazo cerrado
TFcl=k*I*Hcp*TFi*Zo; %Ganancia de lazo con regulador tipo II-b

%Representación diagrama de Bode
P = bodeoptions; % Opciones Bode
P.FreqUnits = 'Hz'; % Eje abscisas en Hz
figure(1) % Nombre figura
bode(TFcl, TFol, {1e1,1e8},P) % Bode para ver la influencia del %regulador
en el sistema.
legend('TFcl', 'TFol') % Leyenda
grid on
hold on
```

La Figura 50 muestra el diagrama de bode resultante del sistema en lazo abierto (TFol) y en lazo cerrado (TFcl).

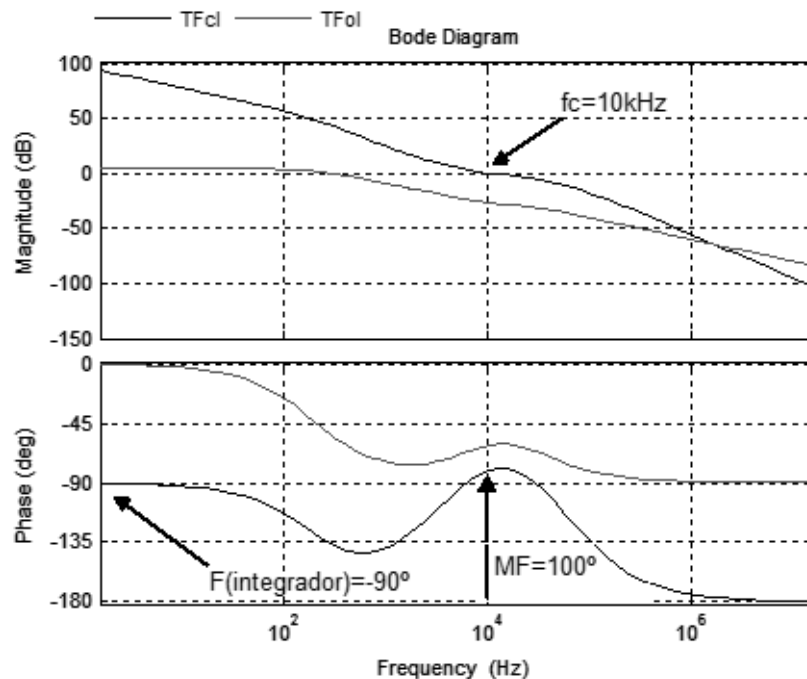


Figura 50 Diagrama de bode del sistema en lazo abierto y lazo cerrado.

Se puede apreciar que el sistema en lazo abierto por si solo es estable, pero en lazo cerrado al introducir la parte integral del regulador para anular el error de posición, añade menos 90

grados en todo el rango de frecuencias. De incluir solo la parte integral, en f_c el margen de fase sería escaso. Por este motivo se ajusta el cero y el polo del regulador, de manera que a dicha frecuencia se de un margen de fase amplio ($MF=100^\circ$), asegurando la estabilidad del sistema.

2) Elección de la pendiente y la amplitud de la rampa de compensación.

La pendiente de la rampa de compensación elegida en el anexo 3 es:

$$m_e = m_{off} = \frac{v_o}{L} \quad (103)$$

Con lo que resulta un factor n:

$$n = \left(1 + \frac{2 \cdot m_e}{m_{on}}\right) = \left(1 + \frac{2 \cdot \frac{v_o}{L}}{\frac{V_i - v_o}{L}}\right) = 3 \quad (104)$$

A continuación, se ha realizado un análisis de la función de transferencia del sistema en lazo abierto, a lo largo de la frecuencia y para varios factores n (Figura 51), de cara a elegir el valor más adecuado de la pendiente de la rampa de compensación.

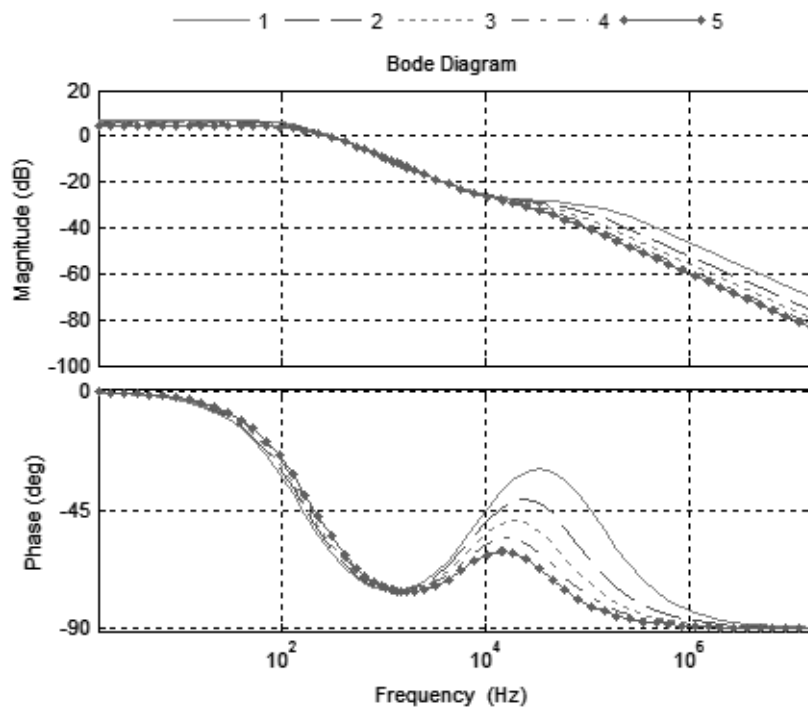


Figura 51 Diagrama de Bode del sistema en lazo abierto para distintos valores de n.

La Figura 51 muestra el diagrama de Bode del sistema en lazo abierto (TFol) para valores de n comprendidos entre uno y cinco. Analizándola para n igual a cinco, la ganancia cae con una pendiente de aproximadamente -20dB/dec, asemejándose a un sistema de primer orden, facilitando el diseño del regulador.

Para este valor de n la pendiente de la rampa de compensación resulta:

$$m_e = m_{on} \cdot \frac{n-1}{2} = \frac{V_i - v_o}{L} \cdot \frac{n-1}{2} = 73529 \frac{V}{s} \quad (105)$$

Con lo que la amplitud de la misma es:

$$A_{rampa} = m_e \cdot T_{sw} = \frac{m_e}{f_{sw}} = \frac{73529}{100^3} = 0.735V \quad (106)$$

3) Modelo continuo del convertidor y su control en Simulink

El siguiente paso es modelar el convertidor y su control, con ecuaciones continuas en el campo transformado de Laplace, en Simulink (Figura 53).

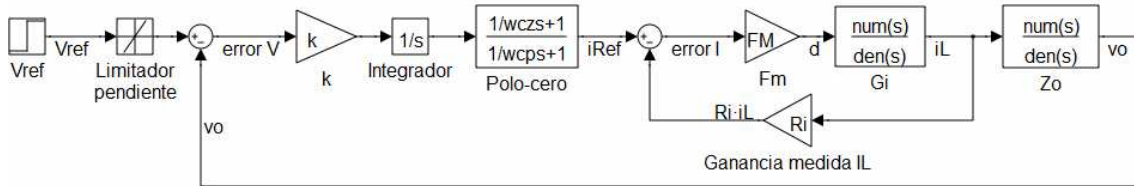


Figura 52 Diagrama de bloques modelo continuo (buck y control) en Simulink.

La Figura 53 muestra el resultado de la simulación de la respuesta del sistema controlado, ante una referencia de tensión en rampa 2.5 voltios de amplitud.

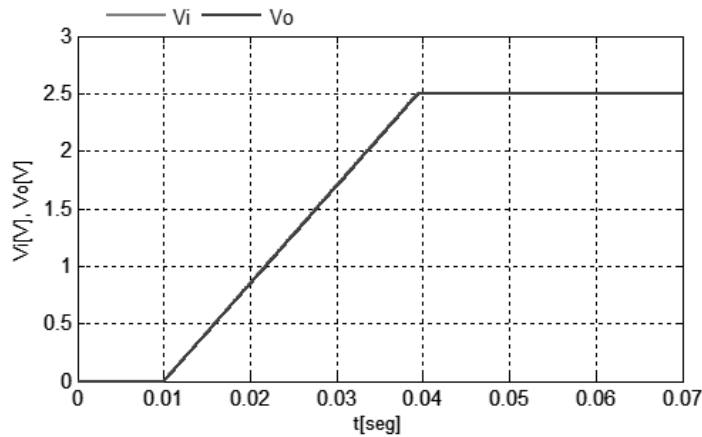


Figura 53 Respuesta del control de corriente ante referencia de tensión en rampa.

El sistema tiene una buena respuesta, siendo su error de posición nulo en régimen permanente.

4) Modelo del convertidor con SimPowerSystems y su control continuo en Simulink.

Comprobado el correcto funcionamiento del regulador, el siguiente paso es modelar el convertidor buck con bloques de la herramienta SimPowerSystems de Simulink y su correspondiente control en modo continuo. En la Figura 54 se observa la etapa de electrónica de potencia, a la que se le ha incluido un interruptor (Breaker) y una resistencia del mismo valor que la de carga, en paralelo con la misma, con el fin de imponer cambios de carga y poner a prueba la estabilidad que el regulador ha de proporcionar al control. En la parte de control, se ha limitado la pendiente de subida de la tensión de referencia, evitando de este modo sobre oscilaciones indeseadas en el inicio del control.

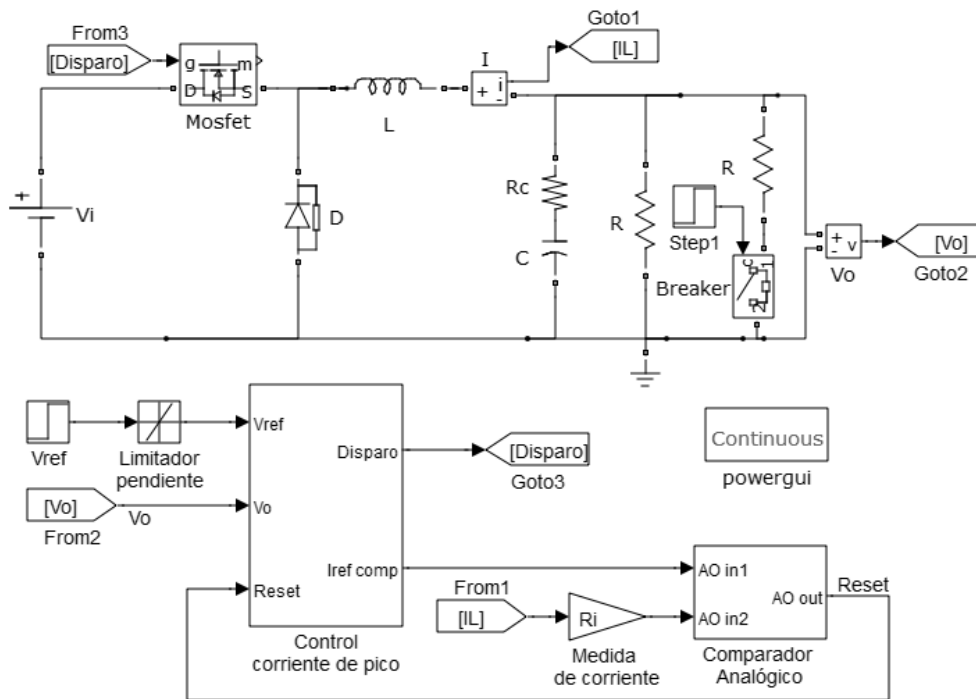


Figura 54 Convertidor buck en bloques SimpowerSystems y control continuo detallado en Simulink.

La ganancia de la medida de la corriente se ha ajustado mediante simulación, para poder ser comparada con la corriente de referencia. El valor de dicha ganancia es el doble del valor de la corriente por la bobina ($R_i=2$). El detalle del control de la Figura 54 se muestra a continuación (Figura 55 y Figura 56):

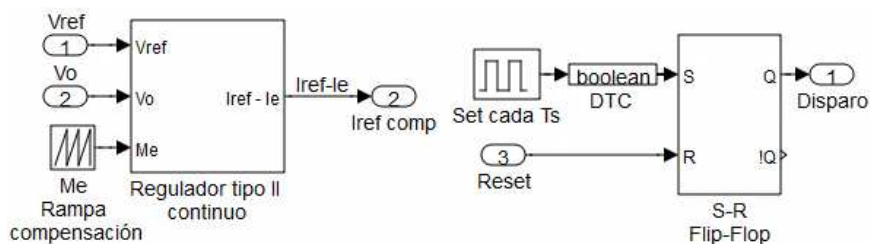


Figura 55 Control corriente de pico continuo detallado en Simulink.

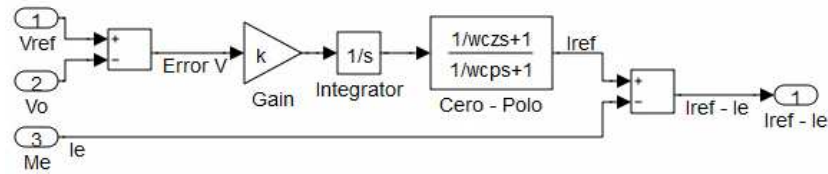


Figura 56 Regulador continuo detallado y compensación en Simulink.

La Figura 57 muestra el detalle del comparador analógico realizado en Simulink.

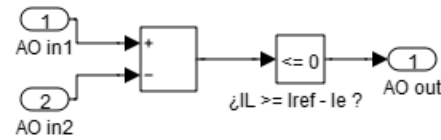


Figura 57 Comparador analógico en Simulink.

La simulación que se ha realizado para comprobar el correcto funcionamiento del control, se muestra en la Figura 58.

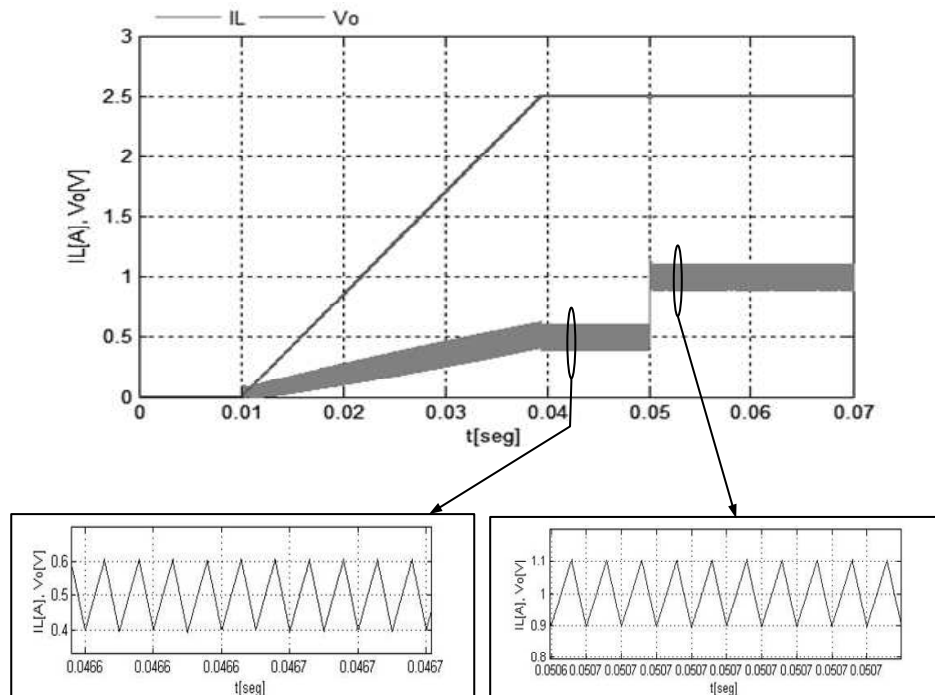


Figura 58 IL y Vo ante cambio a mitad de carga con control continuo.

Analizando la Figura 58 se observa que en $t=0.01$ segundos se ha realizado un arranque suave del convertidor, alcanzando la tensión de salida deseada en $t=0.04$ segundos. En $t=0.05$ segundos se ha realizado un cambio de carga a la mitad de su valor, ante el cual el control se comporta de manera adecuada, estableciendo la corriente (IL) sin apenas sobre oscilación y manteniendo la tensión de salida (Vo) constante.

5) Modelo del convertidor con SymPowerSystems y su control discreto en Simulink.

Siendo correcto el funcionamiento del control continuo, el regulador definido en 1) se ha discretizado mediante transformación bilineal. El siguiente código en Matlab se ha realizado para la citada discretización:

```
%Discretización del regulador
R=c2d(K*I*TFcp,T,'tustin')
```

El regulador discretizado resulta:

$$R(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}} \quad (107)$$

Los coeficientes del mismo son:

- $(b_2, b_1, b_0) = (-14.14, 2, 16.16)$
- $(a_2, a_1) = (-0.4286, -0.5714)$

La Figura 59 muestra el convertidor buck y el control discreto del mismo. Nótese que a la salida del control se ha incluido un filtro de segundo orden, para reconstruir la señal digital de la corriente de referencia compensada. Por lo demás, tanto convertidor como el comparador, al ser este último analógico, se mantienen como en el modelo continuo (Figura 54).

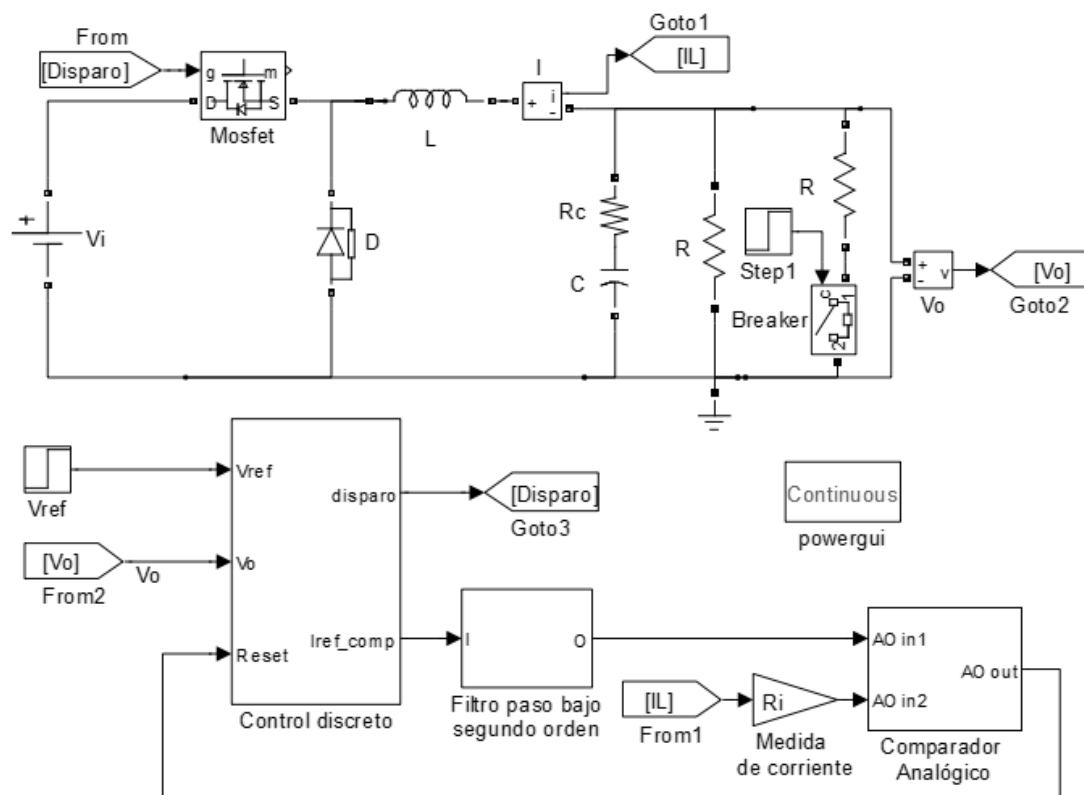


Figura 59 Convertidor buck en bloques SimpowerSystems y control discreto en Simulink.

Para modelar el filtro, se han definido en Matlab las frecuencias de corte de los filtros paso bajo de primer orden que lo forman:

```
% Filtro paso bajo de segundo orden
fc1=750e3; % Frecuencia de corte en Hz del filtro 1
wc1=2*pi*fc1; % Frecuencia de corte angular en rad/s del filtro 1
fc2=750e3; % Frecuencia de corte en Hz del filtro 2
wc2=2*pi*fc2; % Frecuencia de corte angular en rad/s del filtro 2
```

El detalle del modelado del filtro paso bajo en Simulink se muestra a continuación:

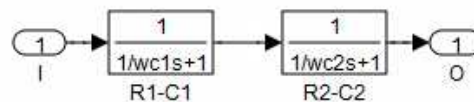


Figura 60 Filtro paso bajo en Simulink.

Dentro del bloque de control discreto (Figura 61), el regulador se ha muestreado cada T_{sw} , dado el pequeño rizado de tensión a la salida. A la referencia establecida por el regulador, se le ha restado una rampa digital de compensación, obteniendo la referencia digital de corriente compensada. La conversión digital analógica, se ha llevado a cabo mediante un conversor DA sigma delta ($\Sigma\Delta$) de segundo orden, razón por la cual el filtro paso bajo es de segundo orden.

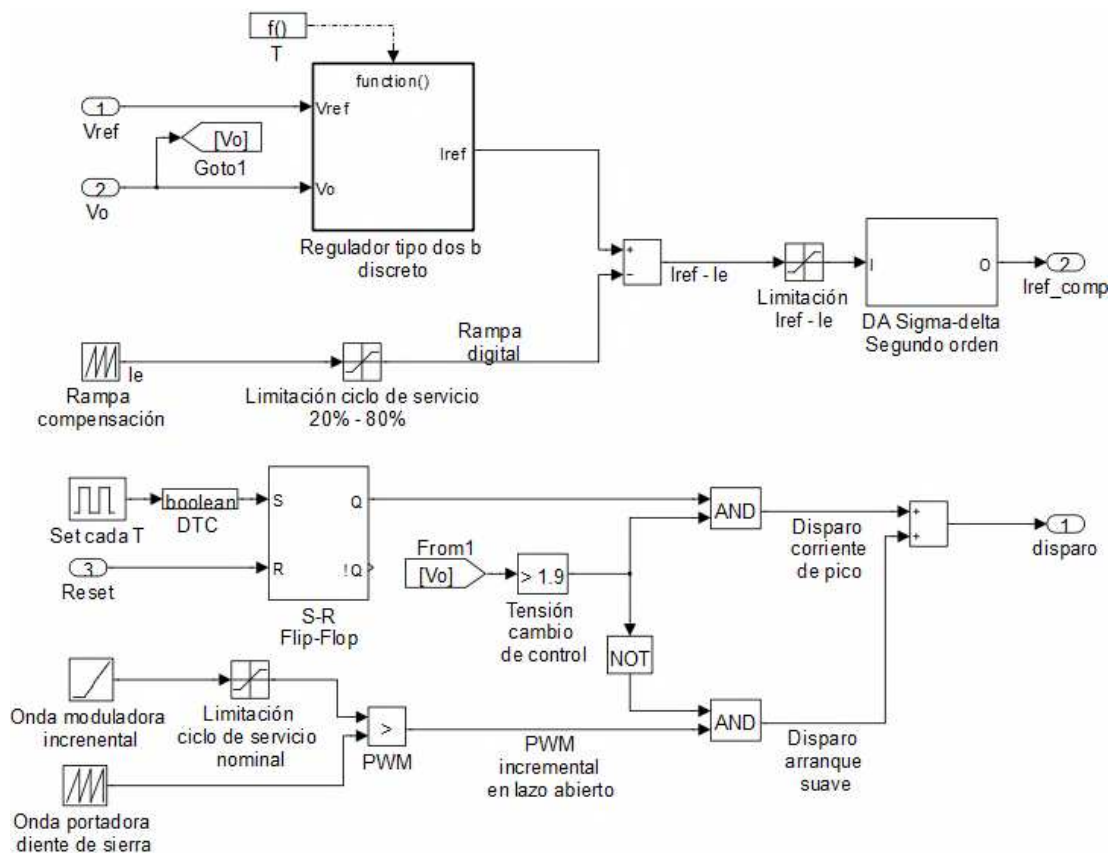


Figura 61 Modelo detallado del control discreto del convertidor.

Una problemática que ha surgido a raíz de la inclusión del $\Sigma\Delta$ en el control, es que las amplitudes de corriente en el arranque son demasiado pequeñas. Por esta razón, se ha implementado un arranque suave del convertidor mediante una modulación PWM, con un incremento progresivo del ciclo de servicio. A partir de un valor de tensión a la salida, donde la corriente adquiere una amplitud aceptable para el conversor, se ha desactivado el control PWM y se ha activado el de corriente de pico.

Otro aspecto a resaltar por la inclusión del $\Sigma\Delta$ y su posterior filtrado, es la limitación del ciclo de servicio, para dar tiempo a que la señal sea reconstruida por completo. La limitación se ha realizado recortando el valor de la amplitud de la rampa de compensación, ya que al compararse con la corriente medida, reseta el biestable que impone el ciclo de servicio en cada periodo de conmutación. Para un correcto funcionamiento del conversor se ha limitado el ciclo de servicio entre 0.2 y 0.8, es decir, se ha recortado la rampa entre un 20% y un 80% de su amplitud.

El citado conversor se ha modelado según [15] y su implementación en Simulink es:

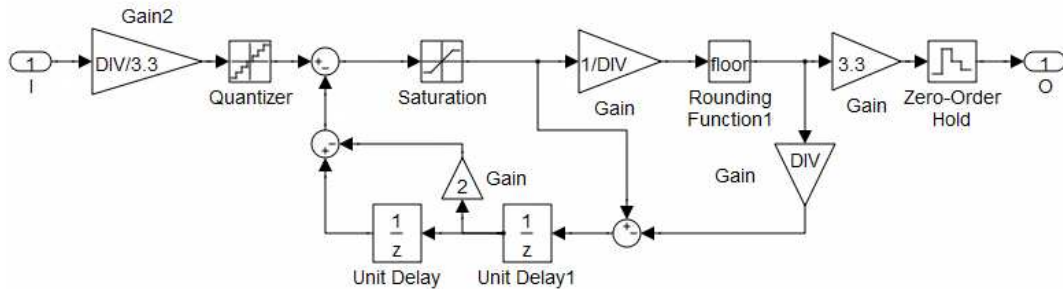


Figura 62 Modelo del conversor DA sigma-delta de segundo orden en Simulink.

La entrada al conversor se ha pasado de su valor real a entero de la siguiente manera:

$$I_{entero} = I_{real} \cdot \frac{DIV}{V_{FS}} = I_{real} \cdot \frac{2^{n-1}}{V_{FS}} \quad (108)$$

Siendo n el numero de bits del dato a convertir (9 bits) y V_{FS} la tensión de fondo de escala del conversor (3.3 voltios). Después se ha cuantizado el dato con un intervalo:

$$q = \frac{V_{FS}}{DIV} = \frac{V_{FS}}{2^{n-1}} \quad (109)$$

El dato se ha limitado entre 0 y (2^n-1) y se ha convertido a binario dividiéndolo por DIV . El bit mas significativo (MSB) del dato se ha llevado a la salida, realimentando los bits menos significativos (LSBs) con valor entero, que a través de la función de transferencia de ruido del conversor (NTF) (110) se ha suministrado a la salida del cuantizador.

$$NTF(z) = 1 - \left(1 - \frac{1}{z}\right)^2 = \frac{1}{z} \cdot \left(2 - \frac{1}{z}\right) \quad (110)$$

Siendo la frecuencia de muestreo de NTF igual a la máxima del reloj de la FPGA ($f_{CLK}=50\text{MHz}$), en la salida se obtiene una señal digital de un bit a esa frecuencia, la cual contiene la información binaria del dato. Mediante un cambio de escala a V_{FS} y un mantenedor

de orden cero muestreado a f_{CLK} , se ha reconstruido la señal y con el filtro paso bajo a la salida del control, se ha obtenido la referencia de corriente compensada a la frecuencia de conmutación.

La Figura 63 muestra el comportamiento de las señales del conversor ante una referencia compensada de 0.7 voltios de amplitud. Arriba se observa la señal cuantizada y la rampa reconstruida y filtrada, en medio se aprecia el bit más significativo a la salida y abajo se ve el ruido realimentado.

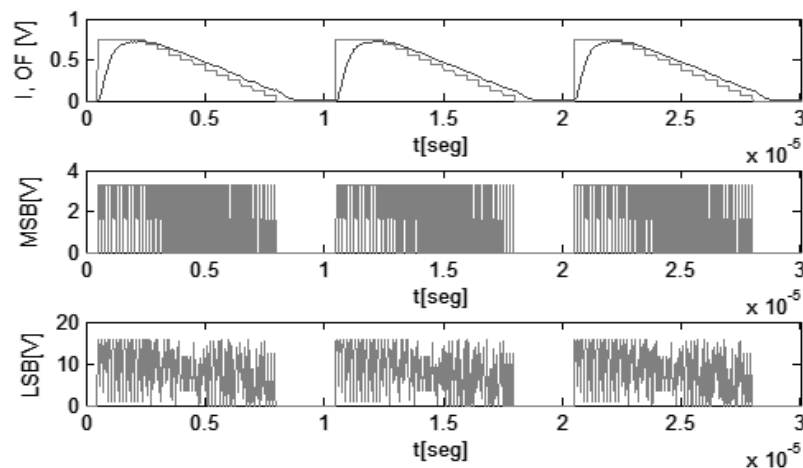


Figura 63 Señal cuantizada (I) vs salida filtrada (OF) (arriba), MSB (medio) y ruido realimentado (LSBs) (abajo).

Para su implementación se han definido una serie de parámetros en Matlab:

```
%% Configuración sigma-delta

Nbit=9; %Número de bits para realizar la conversión D/A
Maxdata=(2^Nbit)-1; %Máximo valor del bloque saturación
DIV=2^(Nbit-1); %Paso de real a entero
VFS=3.3; %Tensión de fondo de escala del conversor
q=VFS/DIV; % Intervalo de cuantización del cuantizador
Ts_q=T/20; %Sample time del cuantizador
fclk=50e6; % Frecuencia de reloj de la FPGA
Tclk=1/fclk; % Frecuencia de reloj de la FPGA
Tsd=Tclk; % Sample time del mantenedor de orden cero
```

Analizando la Figura 64 se observa el arranque suave el convertidor y al llegar la tensión de salida a 1.9 voltios, se impone el control por corriente. Actuando el control por corriente, en $t=0.05$ segundos se produce un cambio de carga a la mitad de su valor y en $t=0.06$ se vuelve a establecer el valor de carga completo.

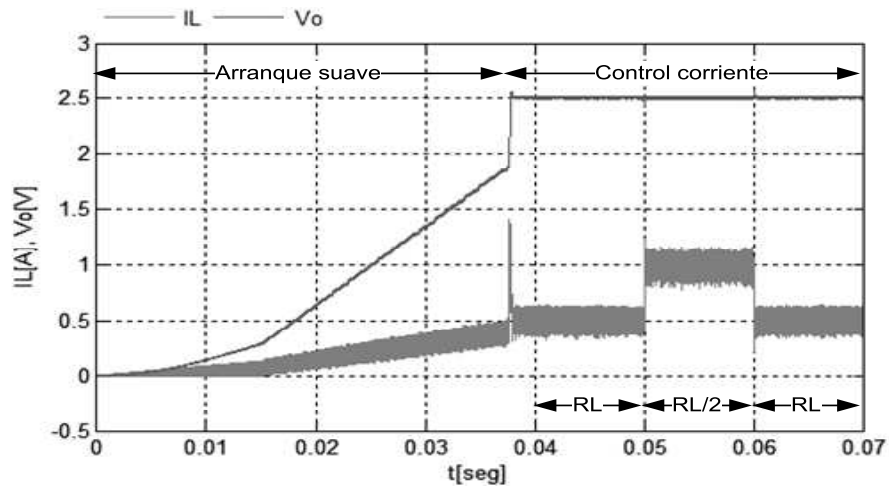


Figura 64 IL y Vo ante cambios de carga con control discreto

Dado que el regulador ha de establecer un error de posición nulo, se origina un pico de corriente de 1.34 amperios aproximadamente (Figura 65).

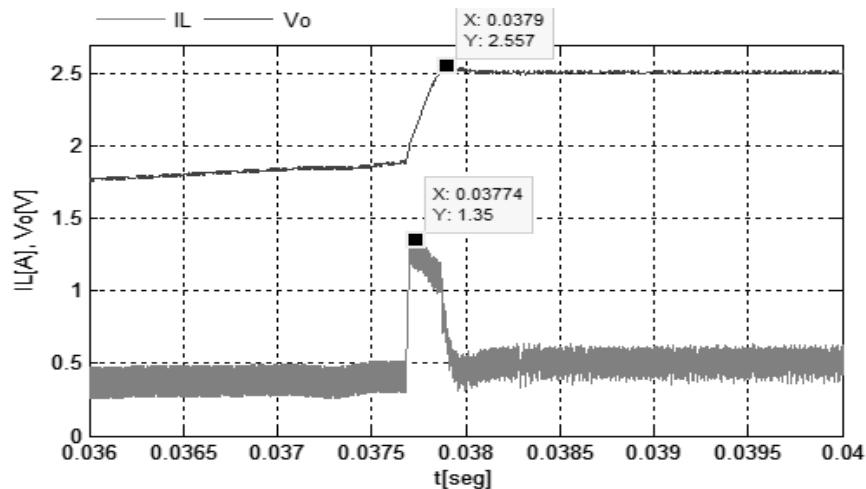


Figura 65 Detalle del cambio de control.

Analizando los cambios de carga en la Figura 66, se observa que al reducir la carga a la mitad de su valor, la corriente tiene un máximo de 1.19 amperios. Por el contrario, al establecer de nuevo la carga completa, la corriente tiene un mínimo en 0.25 amperios. El rizado de la corriente es de 0.2 amperios, independientemente de la carga impuesta.

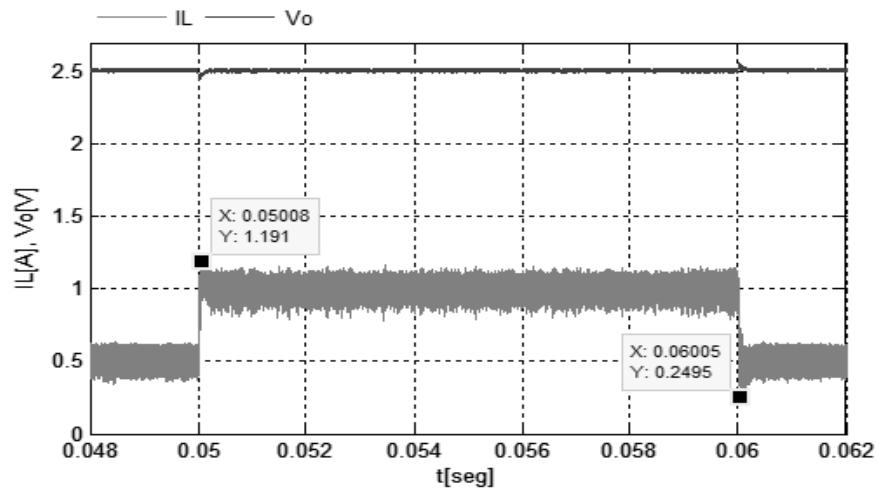


Figura 66 Detalle de los cambios de carga en el control de corriente.

La tensión en el primer cambio desciende hasta 2.44 voltios, mientras que en el segundo cambio asciende hasta 2.57 voltios, alcanzando el valor de referencia en aproximadamente 200 μ s en ambos cambios (Figura 67).

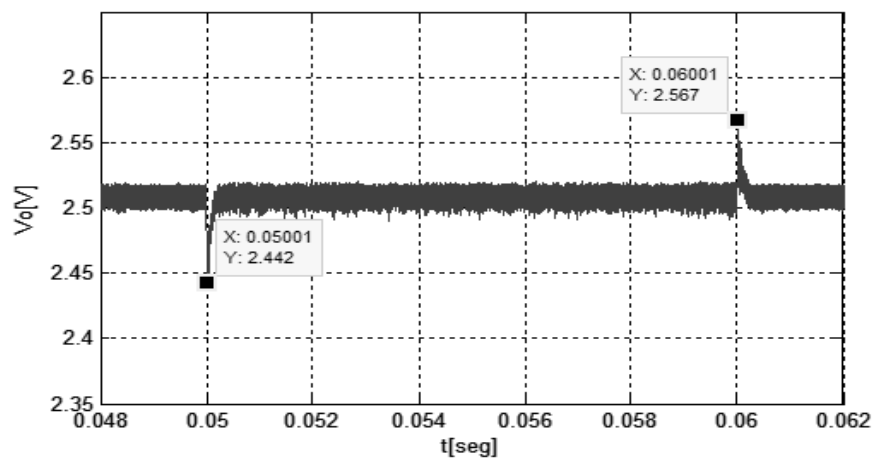


Figura 67 Detalle V_o en los cambios de carga.

6. Discretización del modelo del buck y del filtro pasivo

A continuación se desarrolla la discretización del hardware no sintetizable de la PCB en VHDL, para modelarlo a posteriori en el test bench del anexo7.

1) Discretización del modelo continuo del convertidor buck

Para implementar el modelo del convertidor no sintetizable en VHDL, se han discretizado las dinámicas extraídas en el anexo 2, mediante el algoritmo de integración numérica de Euler hacia adelante.

▪ Transistor ON, diodo OFF

$$\begin{pmatrix} i_L(k+1) \\ v_C(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{R_C R_L + R_L(R_C + R_L)}{(R_C + R_L)L} T_s & -\frac{R_L}{(R_C + R_L)L} T_s \\ \frac{R_L}{(R_C + R_L)C} T_s & 1 - \frac{1}{(R_C + R_L)C} T_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L(k) \\ v_C(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_i T_s}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (111)$$

▪ Transistor OFF, diodo ON

$$\begin{pmatrix} i_L(k+1) \\ v_C(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{R_C R_L + R_L(R_C + R_L)}{(R_C + R_L)L} T_s & -\frac{R_L}{(R_C + R_L)L} T_s \\ \frac{R_L}{(R_C + R_L)C} T_s & 1 - \frac{1}{(R_C + R_L)C} T_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L(k) \\ v_C(k) \end{pmatrix} \quad (112)$$

2) Discretización del modelo continuo del filtro paso bajo pasivo de segundo orden

La Figura 68 muestra el circuito paso bajo de segundo orden

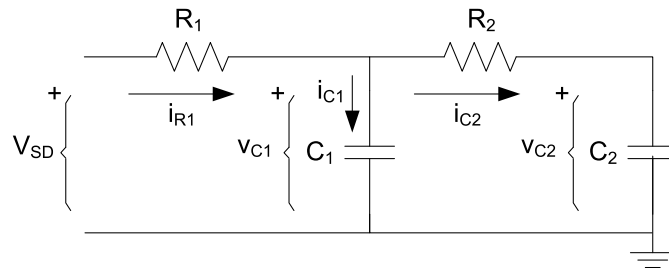


Figura 68 Circuito paso bajo de segundo orden.

Analizando la etapa por nudos resulta:

$$i_{R1} = \frac{V_{SD} - v_{C1}}{R_1} \quad (113)$$

$$i_{C2} = C_2 \cdot \frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{v_{C1} - v_{C2}}{R_2} \quad (114)$$

$$i_{C1} = C_1 \cdot \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{R1} - i_{C2} \quad (115)$$

Sustituyendo (113) y (114) en (115) resulta:

$$C_1 \cdot \frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{V_{SD} - v_{C1}}{R_1} - \frac{v_{C1} - v_{C2}}{R_2} \quad (116)$$

Agrupando términos y despejando, la dinámica del condensador C_1 queda:

$$\frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{V_{SD} \cdot R_2 - v_{C1}(R_1 + R_2) + v_{C2} \cdot R_1}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_2} \quad (117)$$

La dinámica del condensador C_2 se ha despejado de (112):

$$\frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{(v_{C1} - v_{C2})}{C_2 \cdot R_2} \quad (118)$$

Al igual que en el convertidor buck se han discretizado ambas dinámicas:

$$\begin{pmatrix} v_{C1}(k+1) \\ v_{C2}(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{(R_1 + R_2)}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_2} T_s & \frac{1}{C_1 \cdot R_2} T_s \\ \frac{1}{C_2 \cdot R_2} T_s & 1 - \frac{1}{C_2 \cdot R_2} T_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{C1}(k) \\ v_{C2}(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{C_1 \cdot R_1} T_s \\ 0 \end{pmatrix} \cdot V_{SD}(k) \quad (119)$$

En ambas k es el instante de integración actual y T_s es el periodo de integración.

7. Código VHDL del control y del hardware del buck

1) Código sintetizable del control

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_ARITH.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.ALL;

---- Uncomment the following library declaration if instantiating
---- any Xilinx primitives in this code.
--library UNISIM;
--use UNISIM.VComponents.all;

entity CONTROL is
Port ( CLK : in  STD_LOGIC;
      RST : in  STD_LOGIC;
      G1 : out STD_LOGIC;
      G2 : out STD_LOGIC;
      G3 : in  STD_LOGIC;
      RST_BIESTABLE: in STD_LOGIC;
      SDATA : in std_logic;
      DP : out STD_LOGIC;
      SSEG : out STD_LOGIC_VECTOR (6 downto 0);
      ASEL : out STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0);
      ASEL_3 : out STD_LOGIC;
      SCLK : out std_logic;
      nCS : out std_logic;
      LD1 : out std_logic;
      INT: in STD_LOGIC;
      CTRL_ON:in std_logic;
      RAMPA_SD: out std_logic);
end CONTROL;

architecture Behavioral of CONTROL is

=====
--DEFINICION SEÑALES CONTROL ADC
=====

signal Contador_DivFrecuencia_Tmp, Contador_DivFrecuencia_Siguiente: std_logic_vector(0 downto 0);
signal Cuenta_Control_SEG_Tmp, Cuenta_Control_SEG_Siguiente:std_logic_vector(15 downto 0);
signal ASEL_Tmp, ASEL_Siguiente: std_logic_vector (2 downto 0);
signal Digito_BCD: std_logic_vector (3 downto 0);
signal DA, DA_Siguiente: std_logic_vector(7 downto 0);
signal DO: STD_LOGIC_VECTOR (11 downto 0);
signal Estado_Recepcion, Estado_Recepcion_Siguiente: std_logic_vector (3 downto 0);
constant ESPERA_INICIO : std_logic_vector(3 downto 0):= "0011";
constant PULSO_ALTO : std_logic_vector(3 downto 0):= "0110";
constant PULSO_BAJO : std_logic_vector(3 downto 0):= "0100";
constant FIN_RECEPCION : std_logic_vector(3 downto 0):= "1011";
attribute fsm_extract : string;
attribute fsm_extract of Estado_Recepcion : signal is "no";
signal Contador_Bits, Contador_Bits_Siguiente: std_logic_vector (4 downto 0);
signal Valor_ADC, Valor_ADC_Siguiente: std_logic_vector(11 downto 0);

=====
--DEFINICIÓN DE SEÑALES Y CONSTANTES DEL CONTROL
=====

--Referencia de tensión
=====
constant VREF: std_logic_vector (7 downto 0):=conv_std_logic_vector(194,8);

```

--Señales Soft Start

signal d_lim: std_logic_vector(8 downto 0);
signal d, d_Siguiente: std_logic_vector(8 downto 0);
signal G1_S: std_logic;

--Constantes y señales de la gestión temporal del control

constant N1: std_logic_vector(8 downto 0):= conv_std_logic_vector(389,9);
constant N2: std_logic_vector(8 downto 0):= conv_std_logic_vector(489,9);
signal CNT_TS_SIG, CNT_TS : std_logic_vector (8 downto 0);
signal ACT_CRT, ACT_ADC, ACT_CRT_V : std_logic;
signal Flanco_ACT_CRT, Flanco_ACT_CRT_Siguiente : std_logic;
signal CNT_Ciclos_CRT_Siguiente, CNT_Ciclos_CRT : std_logic_vector (2 downto 0);

--Señales rampa digital de compensación

signal IREF : std_logic_vector(8 downto 0);
signal IREF_COMP : std_logic_vector(8 downto 0);
signal IREF_COMP_S : signed(9 downto 0);
signal RAMPA_COMP : std_logic_vector(6 downto 0);
signal RAMPA_C: std_logic_vector(6 downto 0);

--Señales regulador de corriente

constant b0_s: signed(17 downto 0):=conv_signed(87327,18);
constant b1_s: signed(17 downto 0):=conv_signed(10813,18);
constant b2_s: signed(17 downto 0):=conv_signed(-76431,18);
constant a1_s: signed(17 downto 0):=conv_signed(-74895,18);
constant a2_s: signed(17 downto 0):=conv_signed(-56177,18);
signal e0_s, e1_s, e2_s, e0_Sig_s, e1_Sig_s, e2_Sig_s: signed(8 downto 0);
signal d_Siguiente_s, d_s, d1_s, d2_s, d1_Sig_s, d2_Sig_s : signed(19 downto 0);
signal ACC_s, ACC_Siguiente_s: signed(40 downto 0);

--Señales conversor sigma delta 2º orden

signal r0,r1,r3: std_logic_vector (8 downto 0);
signal r2: std_logic_vector (10 downto 0);
signal r4: signed (10 downto 0);
signal Sum_r:signed(11 downto 0);
signal Sum_r_lim: std_logic_vector(9 downto 0);

--Señales biestable RS

signal SET_BIESTABLE: std_logic;
signal Q: std_logic;
signal Q_SIG: std_logic;
signal EOC :std_logic;
type states is (S0,S1,S2,S3);
signal p_state,n_state: states;

begin

--CONTROL DEL CONVERTIDOR

-- Control PWM incremental


```

=====
--PROCESO: Soft Start
=====
--Secuencial
=====
process(CLK,RST)
begin
    if (RST = '1') then
        d <= (others =>'0');
    elsif (CLK' event and CLK = '1') then
        d <= d_Siguiente;
    end if;
end process;

=====
--Combinacional
=====
process(EOC, d,CTRL_ON)
begin
    if (CTRL_ON = '0') then
        d_Siguiente <=(others =>'0');
    elsif ((EOC='1') and (d < 499) and (CTRL_ON = '1')) then
        d_Siguiente <=d+1;
    else
        d_Siguiente<=d ;
    end if;
end process;

=====
--PROCESO: Periodo de conmutación Tsw
=====
--Secuencial
=====
process(CLK,RST)
begin
    if (RST = '1') then
        CNT_TS <= (others =>'0');
    elsif (CLK' event and CLK = '1') then
        CNT_TS <= CNT_TS_SIG;
    end if;
end process;

=====
----Combinacional
=====
process(CNT_TS)
begin
    if(CNT_TS < 499) then
        CNT_TS_SIG <=CNT_TS+1 ;
        EOC<='0';
    else
        CNT_TS_SIG <=(others =>'0');
        EOC<='1';
    end if;
end process;

=====
----Modulación PWM
=====
G1_S <= '1' when (CNT_TS<=('0'& d(8 downto 1))) else '0';

```

```
-----
-----
-- Control modo corriente de pico
-----
-----
-----
--Gestión temporal del control
-----
-----
---Detector de tiempos para implementar el control.
-----
-----
ACT_ADC <= '1' when (CNT_TS = N1) else '0';
ACT_CRT <= '1' when (CNT_TS = N2 ) else '0';
Flanco_ACT_CRT_Siguiente <= ACT_CRT;

-----
-----
--Secuencial
-----
-----
process(CLK,RST)
begin
    if (RST = '1') then
        CNT_Ciclos_CRT <= (others =>'0');
        Flanco_ACT_CRT <= '0';
    elsif (CLK' event and CLK = '1') then
        CNT_Ciclos_CRT <= CNT_Ciclos_CRT_Siguiente;
        Flanco_ACT_CRT <= Flanco_ACT_CRT_Siguiente;
    end if;
end process;

-----
-----
--Combinacional
-----
-----
process(CNT_Ciclos_CRT,Flanco_ACT_CRT_Siguiente,Flanco_ACT_CRT)
begin
    if ((Flanco_ACT_CRT='0') and (Flanco_ACT_CRT_Siguiente='1')) then
        CNT_Ciclos_CRT_Siguiente <="001";

    else
        if ((CNT_Ciclos_CRT > 0) and (CNT_Ciclos_CRT < 7)) then
            CNT_Ciclos_CRT_Siguiente <=CNT_Ciclos_CRT +1;
        else
            CNT_Ciclos_CRT_Siguiente <=(others =>'0');
        end if;
    end if;
end process;

-----
-----
--PROCESO: Máquina de estados para el control de la comunicación
-----
-----
--Proceso SECUENCIAL
-----
-----
process(CLK,RST)
begin
    if (RST = '1') then
        Estado_Recepcion <= ESPERA_INICIO;
        Contador_DivFrecuencia_Tmp <="0";
        Contador_Bits <="00000";
        Valor_ADC <="000000000000";
        DA <="00000000";
        ASEL_3 <='1';
    elsif (CLK' event and CLK = '1') then
        Estado_Recepcion <=Estado_Recepcion_Siguiente;
        Contador_DivFrecuencia_Tmp <=Contador_DivFrecuencia_Siguiente;
        Contador_Bits <=Contador_Bits_Siguiente;
        Valor_ADC <=Valor_ADC_Siguiente;
        DA <=DA_Siguiente;
        ASEL_3 <='1';
    end if;
end process;
```

```

=====
--Proceso COMBINACIONAL
=====
process(Estado_Recepcion,Contador_DivFrecuencia_Tmp,Contador_Bits,ACT_ADC,Valor_ADC,DA,SDATA)
begin
    case Estado_Recepcion is
        when ESPERA_INICIO =>
            Contador_DivFrecuencia_Siguiente <="0";
            Contador_Bits_Siguiente <="00000";

            Valor_ADC_Siguiente <=Valor_ADC;
            DA_Siguiente <=DA;

        --Condición cambio de estado
        if (ACT_ADC = '1') then
            Estado_Recepcion_Siguiente <=PULSO_ALTO;
        else
            Estado_Recepcion_Siguiente <= Estado_Recepcion;
        end if;

        when PULSO_ALTO =>
            Contador_DivFrecuencia_Siguiente <=Contador_DivFrecuencia_Tmp +1;
            Contador_Bits_Siguiente <=Contador_Bits;
            DA_Siguiente <=DA;

        --Condición cambio de estado
        if (Contador_DivFrecuencia_Tmp >="1") then
            Estado_Recepcion_Siguiente <=PULSO_BAJO;
            Valor_ADC_Siguiente <=Valor_ADC;
        else
            Estado_Recepcion_Siguiente <= Estado_Recepcion;
            Valor_ADC_Siguiente <=Valor_ADC(10 downto 0)&SDATA;
        end if;

        when PULSO_BAJO =>
            Contador_DivFrecuencia_Siguiente <=Contador_DivFrecuencia_Tmp +1;
            Contador_Bits_Siguiente <=Contador_Bits+1;
            Valor_ADC_Siguiente <=Valor_ADC;
            DA_Siguiente <=DA;

        --Condición cambio de estado
        if ((Contador_DivFrecuencia_Tmp >="1") and (Contador_Bits >=15)) then
            Estado_Recepcion_Siguiente <=FIN_RECEPCION;
            Contador_Bits_Siguiente <="00000";
        elsif (Contador_DivFrecuencia_Tmp ="1") then
            Estado_Recepcion_Siguiente <= PULSO_ALTO;
            Contador_Bits_Siguiente <=Contador_Bits+1;
        else
            Estado_Recepcion_Siguiente <= Estado_Recepcion;
            Contador_Bits_Siguiente <=Contador_Bits;
        end if;

        when others =>
            Contador_DivFrecuencia_Siguiente <=Contador_DivFrecuencia_Tmp +1;
            Contador_Bits_Siguiente <=Contador_Bits + 1;
            Valor_ADC_Siguiente <=Valor_ADC;
            DA_Siguiente <=Valor_ADC(11 downto 4);

        --Condición cambio de estado
        if (Contador_Bits >=2) then
            Estado_Recepcion_Siguiente <=ESPERA_INICIO;
        else
            Estado_Recepcion_Siguiente <= Estado_Recepcion;
        end if;

    end case;
end process;

nCS <=Estado_Recepcion(0);
SCLK <=Estado_Recepcion(1);

```

```
-----
--PROCESO: Conversión de BINARIO a BCD
-----
--Proceso COMBINACIONAL
-----
process (DA)
begin
    case DA is
        when "00000000" => DO <= "000000000000";
        when "00000001" => DO <= "000000000001";
        when "00000010" => DO <= "000000000011";
        when "00000011" => DO <= "000000000100";
        .
        .
        .
        when "11111101" => DO <= "001100100110";
        when "11111110" => DO <= "001100100111";
        when others => DO <= "001100110000";
    end case;
end process;

-----
--PROCESO: Activación de los displays de 7 segmentos
-----
--Proceso SECUENCIAL
-----
process (CLK,RST)
begin
    if (RST = '1') then
        Cuenta_Control_SEG_Tmp <=(others =>'0');
        ASEL_Tmp <="001";
    elsif (CLK 'event and CLK = '1') then
        Cuenta_Control_SEG_Tmp<= Cuenta_Control_SEG_Siguiente;
        ASEL_Tmp <=ASEL_Siguiente;
    end if;
end process;

-----
--Proceso COMBINACIONAL
-----
process (Cuenta_Control_SEG_Tmp,ASEL_Tmp,Digito_BCD,DO)
begin
    Cuenta_Control_SEG_Siguiente <= Cuenta_Control_SEG_Tmp + 1;

    if (Cuenta_Control_SEG_Tmp = "111111111111111") then
        ASEL_Siguiente <= ASEL_Tmp(1 downto 0) & ASEL_Tmp(2);
    else
        ASEL_Siguiente <= ASEL_Tmp;
    end if;

    case ASEL_Tmp is
        when "001" =>
            Digito_BCD <= DO (3 downto 0);
            DP<='1';
        when "010" =>
            Digito_BCD <= DO (7 downto 4);
            DP<='1';
        when others =>
            Digito_BCD <= DO (11 downto 8);
            DP<='0';
    end case;

    CASE Digito_BCD IS
        WHEN "0000" => SSEG <= not "1111110";
        WHEN "0001" => SSEG <= not "0110000";
        WHEN "0010" => SSEG <= not "1101101";
    end case;
end process;
-----
```

```

        WHEN "0011" => SSEG <= not "1111001";
        WHEN "0100" => SSEG <= not "0110011";
        WHEN "0101" => SSEG <= not "1011011";
        WHEN "0110" => SSEG <= not "1011111";
        WHEN "0111" => SSEG <= not "1110000";
        WHEN "1000" => SSEG <= not "1111111";
        WHEN OTHERS => SSEG <= not "1111011";

    END CASE;
end process;
--Asignación de SALIDAS
    ASEL <= not ASEL_Tmp;

=====
--PROCESO: Cambio de control
=====

ACT_CRT_V <= '1' when (DA< 150) else '0';

=====
-- Regulador tipo II-b
=====
--PROCESO: Operaciones celda MAC
=====
--Secuencial
=====
process(CLK, RST)
begin
    if (RST = '1') then
        ACC_s <= (others => '0');
        e0_s<= (others => '0');
        e1_s<= (others => '0');
        e2_s<= (others => '0');
        d_s<= (others => '0');
        d1_s<= (others => '0');
        d2_s<= (others => '0');
    elsif (CLK' event and CLK = '1') then
        ACC_s<= ACC_Siguiente_s;
        e0_s<= e0_Sig_s;
        e1_s<= e1_Sig_s;
        e2_s<=e2_Sig_s;
        d_s<= d_Siguiente_s;
        d1_s<=d1_Sig_s;
        d2_s<=d2_Sig_s;
    end if;
end process;

-----
--Combinacional
-----
process( CNT_Ciclos_CRT,ACC_s,e0_s,e1_s,e2_s,d_s,d1_s,d2_s,DA, p_state)
variable Sum_e: signed(26 downto 0):=(others => '0');
begin
    case CNT_Ciclos_CRT is
        when "001" =>
            ACC_Siguiente_s <= (others => '0');
            e0_Sig_s <= signed('0' & VREF) - signed('0' & DA );
            e1_Sig_s <= e0_s;
            e2_Sig_s <= e1_s;
            d_Siguiente_s <= d_s;
            d1_Sig_s <= d_s;
            d2_Sig_s <= d1_s;

        when "010" =>
            Sum_e:=b0_s * e0_s;
            ACC_Siguiente_s <= (Sum_e & "00000000000000") + ACC_s;
            e0_Sig_s <= e0_s;

```

```
        e1_Sig_s <= e1_s;
        e2_Sig_s <= e2_s;
        d_Siguiente_s <= d_s;
        d1_Sig_s <= d1_s;
        d2_Sig_s <= d2_s;

    when "011" =>
        Sum_e:=b1_s * e1_s;
        ACC_Siguiente_s <= (Sum_e & "00000000000000") + ACC_s;
        e0_Sig_s <= e0_s;
        e1_Sig_s <= e1_s;
        e2_Sig_s <= e2_s;
        d_Siguiente_s <= d_s;
        d1_Sig_s <= d1_s;
        d2_Sig_s <= d2_s;

    when "100" =>
        Sum_e:=b2_s * e2_s;
        ACC_Siguiente_s <= (Sum_e & "00000000000000") + ACC_s;
        e0_Sig_s <= e0_s;
        e1_Sig_s <= e1_s;
        e2_Sig_s <= e2_s;
        d_Siguiente_s <= d_s;
        d1_Sig_s <= d1_s;
        d2_Sig_s <= d2_s;

    when "101" =>
        ACC_Siguiente_s<= (-a1_s) * d1_s + ACC_s;
        e0_Sig_s <= e0_s;
        e1_Sig_s <= e1_s;
        e2_Sig_s <= e2_s;
        d_Siguiente_s <= d_s;
        d1_Sig_s <= d1_s;
        d2_Sig_s <= d2_s;

    when "110" =>
        ACC_Siguiente_s <= (-a2_s) * d2_s + ACC_s;
        e0_Sig_s <= e0_s;
        e1_Sig_s<= e1_s;
        e2_Sig_s <= e2_s;
        d_Siguiente_s <= d_s;
        d1_Sig_s <= d1_s;
        d2_Sig_s <= d2_s;

    when "111" =>
        ACC_Siguiente_s <= ACC_s;
        e0_Sig_s<= e0_s;
        e1_Sig_s <= e1_s;
        e2_Sig_s <= e2_s;
        d_Siguiente_s <= ACC_s( 36 downto 17);
        d1_Sig_s <= d1_s;
        d2_Sig_s <= d2_s;

    when others =>
        ACC_Siguiente_s <=(others => '0');
        e0_Sig_s <= e0_s;
        e1_Sig_s <= e1_s;
        e2_Sig_s <= e2_s;
        d_Siguiente_s <= d_s;
        d1_Sig_s <= d1_s;
        d2_Sig_s <= d2_s;

end case;

if (p_state=S0)      then
    e1_Sig_s <=(others => '0');
    e2_Sig_s <=(others => '0');
end if;
end process;
```



```

=====
--Corriente de referencia calculada por el regulador
=====
IREF<= conv_std_logic_vector(d_s(17 downto 9),9);

=====
-- Rampa digital de compensación
=====
RAMPA_COMP <= CNT_TS(8 downto 2);

=====
--PROCESO: Limitación de la rampa de compensación
=====
process(RAMPA_COMP)
begin
    if (RAMPA_COMP < 24) then
        RAMPA_C <= conv_std_logic_vector(24,7);
    elsif (RAMPA_COMP > 96) then
        RAMPA_C <= conv_std_logic_vector(96,7);
    else
        RAMPA_C <= RAMPA_COMP;
    end if;
end process;

=====
--Corriente de referencia compensada limitada
=====
IREF_COMP_S<=signed('0'&IREF) when (p_state=S3) else (signed('0'&IREF)-signed('0'&RAMPA_C));

=====
--PROCESO: Limitación de la referencia comensada
=====
process(IREF_COMP_S)
begin
    if (IREF_COMP_S)>460 then
        IREF_COMP <= conv_std_logic_vector(464,9);
    elsif (IREF_COMP_S)< 49 then
        IREF_COMP <= conv_std_logic_vector(50,9);
    else
        IREF_COMP <= std_logic_vector(IREF_COMP_S(8 downto 0)) ;
    end if;
end process;

=====
--Conversor DA
=====
=====
--PROCESO: Sigma-Delta 2ºorden
=====
-----Secuencial
=====

process(CLK, RST)
begin
    if (RST = '1') then
        r1<= (others => '0');
        r3<= (others => '0');
    elsif (CLK' event and CLK = '1') then
        r1<= r0;
        r3<= r1;
    end if;
end process;

```

```
-----
---Operaciones sigma delta
-----
r0<=Sum_r_lim(8 downto 0);
r2<= ('0'&r1&'0');
r4 <= signed(r2)- signed('0'&r3);
Sum_r <= signed("000"&(IREF_COMP)) + r4;

-----
---Limitación Sum_r
-----
process (Sum_r)
begin
    if (Sum_r > 1023) then
        Sum_r_lim <= conv_std_logic_vector(1023,10);
    elsif (Sum_r < 0) then
        Sum_r_lim <= (others => '0');
    else
        Sum_r_lim <= std_logic_vector (Sum_r(9 downto 0));
    end if;
end process;

-----
---MSB a la salida del converor
-----
RAMPA_SD <=(Sum_r_lim(9));

-----
---PROCESO: Biestable RS
-----
--- Activación del biestable
-----
SET_BIESTABLE <= '1' when ( 499 <= CNT_TS) else '0';

-----
---Secuencial
-----
process(CLK,RST)
begin
    if (RST = '1') then
        p_state <=S0;
        Q <='0';
    elsif (CLK' event and CLK = '1') then
        p_state <=n_state;
        Q <=Q_SIG;
    end if;
end process;

-----
---Combinacional
-----
process(RST_BIESTABLE,SET_BIESTABLE,Q)
begin
    if (SET_BIESTABLE= '1') then
        Q_SIG <= '1' ;
    elsif (RST_BIESTABLE = '1') then
        Q_SIG <= '0' ;
    else
        Q_SIG <= Q ;
    end if;
end process;
```

```
=====
-- Asignación de señal de disparo
=====
process(p_state, G1_S,Q,ACT_CRT_V,EOC,CNT_TS,CTRL_ON)
begin
    n_state<=p_state;
    LD1<='1';
    if (CTRL_ON = '1') then
        case p_state is

            when S0 =>
                G1 <=G1_S;
                LD1<='0';
                if (ACT_CRT_V='0') and(EOC='1') then
                    n_state <= S1;
                end if;

            when S1 =>
                G1 <='1';
                if (CNT_TS>100) then
                    n_state <= S2;
                end if;

            when S2 =>
                G1 <=Q;
                if (CNT_TS>400) then
                    n_state <= S3;
                end if;

            when S3 =>
                G1 <= '0' ;
                if (EOC='1') then
                    n_state <= S1;
                end if;

        end case;
    else
        G1 <= '0';
        n_state <= S0;
    end if;
end process;

=====
-- Cambio de carga
=====
--G3<=INT;

end Behavioral;
```

2) Test bench

El código que se muestra a continuación modela el test bench, con el que se va a comprobar el correcto funcionamiento del control sobre la parte hardware del convertidor. En este se incluye:

- **Modelado del convertidor** mediante el método de Euler hacia adelante.
- **Señal del reloj CLK de la FPGA** a una frecuencia 50 MHz.
- **Señal de Reset (RST) del sistema.**
- **Modelo del filtro paso bajo de segundo orden** mediante el método de Euler hacia adelante.
- **Comparador analógico.**
- **Conversor DA de 9 bits.**

```
LIBRARY ieee;
USE ieee.std_logic_1164.ALL;
USE ieee.std_logic_unsigned.all;
USE ieee.std_logic_arith.ALL;

ENTITY Top IS
END Top;

ARCHITECTURE behavior OF Top IS

    -- Component Declaration for the Unit Under Test (UUT)

    COMPONENT CONTROL
    PORT(
        CLK : in  STD_LOGIC;
        RST : in  STD_LOGIC;
        G1 : out STD_LOGIC;
        G2 : out STD_LOGIC;
        G3 : in  STD_LOGIC;
        RST_BIESTABLE: in STD_LOGIC;
        SDATA : in std_logic;
        DP : out STD_LOGIC;
        SSEG : out STD_LOGIC_VECTOR (6 downto 0);
        ASEL : out STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0);
        ASEL_3 : out STD_LOGIC;
        SCLK : out std_logic;
        nCS : out std_logic;
        LD1 : out std_logic;
        INT: in STD_LOGIC;
        CTRL_ON:in std_logic;
        RAMPA_SD: out std_logic
    );
    END COMPONENT;

    --Inputs
    signal CLK : std_logic := '0';
    signal RST : std_logic := '0';
    signal SDATA : std_logic:= '0';
    signal RST_BIESTABLE : std_logic := '0';
    signal LD1: std_logic:= '0';
    signal INT: std_logic:= '0';
    signal CTRL_ON: std_logic:= '0';

    --Outputs
```

```

signal RAMPA_SD : std_logic:= '0';
signal G1 : std_logic:= '0';
signal G2 : std_logic:= '0';
signal G3 : std_logic:= '0';
signal DP : STD_LOGIC:= '0';
signal SSEG : STD_LOGIC_VECTOR (6 downto 0):= (others => '0');
signal ASEL : STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0):= (others => '0');
signal ASEL_3 : STD_LOGIC:= '0';
signal SCLK : std_logic:= '0';
signal nCS :std_logic:= '0';
signal DATA : std_logic_vector (11 downto 0);

```

```

-----
--Constantes y señales del modelo BUCK--
-----

```

```

constant Vi: real:= 5.0;    --Vdc--
constant L: real:= 68.0e-6; --Bobina filtro--
constant C: real:= 220.0e-6; --Condensador filtro--
constant RL: real:= 98.0e-3; --Resistencia interna de la bobina--
constant RC: real:= 80.0e-3; --Resistencia interna del condensador--
constant R0: real:= 5.0;    --Carga resistiva--
constant dt: real:= 20.0e-9; -- Paso de cálculo ecuaciones en diferencias--
constant VF: real:= 0.9; ;   -- Tensión diodo en conducción--
constant Ts: time:= integer(dt*1.0e9)* 1 ns; --Paso de cálculo--
signal VC: real:= 0.0;      -- Tensión condensador--
signal VL: real:= 0.0;      -- Tensión bobina--
signal IL: real:= 0.0;      -- Corriente bobina--
signal RiL: real:= 0.0;     -- Corriente bobina--
signal V0: real:= 0.0;      -- Tensión carga--
signal HV0: real:= 0.0;     -- Acomodación para conversor ADC--
constant VFS: real:= 3.3;   -- Tensión fondo de escala del conversor ADC--
constant VLSB: real:= VFS/(2.0**9); -- Tensión del bit menos significativo del conversor ADC--
constant R1: real:= 1.0e3; ; -- Resistencia del primer filtro paso bajo--
constant R2: real:= 10.0e3; ; -- Resistencia del segundo filtro paso bajo--
constant C1: real:= 1200.0e-12; -- Capacidad del primer filtro paso bajo--
constant C2: real:= 120.0e-12; ; -- Capacidad del segundo filtro paso bajo--
signal VC1:real:=0.0;      -- Tensión del C1--
signal VC2:real:=0.0; ;    -- Tensión del C2--
signal VSD: real:=0.0; ;   -- Tensión de salida del sigma delta--
signal V0_int: integer:=0; Tensión de salida del convertidor en entero --

```

```

-----
--Modelo VHDL conversor DA 9 bits
-----

```

```

procedure write_serial(signal DATA: in std_logic_vector(11 downto 0);
signal nCS, SCLK: in std_logic; signal SDATA: out std_logic) is
begin
    SDATA <= 'Z';
    wait until nCS'event and nCS='0';
    for i in 2 downto 0 loop
        wait until SCLK'event and SCLK='0';
        SDATA <= '0';
    end loop;
    for i in 11 downto 0 loop
        wait until SCLK'event and SCLK='0';
        SDATA <= DATA(i);
    end loop;
    wait until SCLK'event and SCLK='0';
    SDATA <= 'Z';
end write_serial;

```

```
BEGIN

-- Instantiate the Unit Under Test (UUT)

uut: CONTROL PORT MAP (
    CLK => CLK,
    RST => RST,
    SDATA => SDATA,
    RST_BIESTABLE => RST_BIESTABLE,
    RAMPA_SD => RAMPA_SD,
    G1 => G1,
    G2 => G2,
    G3 => G3,
    DP => DP,
    SSEG => SSEG,
    ASEL => ASEL,
    ASEL_3 => ASEL_3,
    SCLK => SCLK,
    nCS => nCS
);

write_serial(DATA, nCS, SCLK, SDATA);

=====
--Modelo VHDL convertidor BUCK mediante método Euler hacia adelante
=====
process
variable Rprima,IL_aux, VC_aux: real;
begin
wait for Ts;

    if (G3='1') then Rprima:=0.5*R0;
    else Rprima:=R0;
    end if;

    if (G1='1') then
        IL_aux := (1.0 - dt*RC*Rprima/(L*(RC+Rprima))) *IL -(dt*Rprima/(L*(RC+Rprima))) *VC +
dt*VI/L;
    else
        IL_aux := (1.0 - dt*RC*Rprima/(L*(RC+Rprima))) *IL -dt*Rprima/(L*(RC+Rprima))*VC- dt*VF/L;

    end if;

    if (IL_aux < 0.0) then
        IL_aux := 0.0;
    end if;

    VC_aux := (dt*Rprima/(C*(RC+Rprima))) *IL + (1.0 - dt/(C*(RC+Rprima))) *VC;
    V0<=VC_aux + (RC*Rprima)/(RC+Rprima)*IL_aux - RC/(RC+Rprima)*VC_aux;
    IL <= IL_aux;
    VC <= VC_aux;
    HV0<=V0;
    RiIL <= 2.0*IL_aux;
end process;

=====
--Tensión de entrada al conversor DA(12 bits)
=====
V0_int<=integer(V0*((2.0**12) - 1.0)/VFSM1LSB);
DATA<= conv_std_logic_vector(V0_int, 12);
```

```
--=====
--PROCESO: CLK FPGA 50MHz
--=====

process
begin
    CLK<='0', '1' after 10 ns;
    wait for 20 ns;
end process;

--=====
--Reset
--=====
RST<='1', '0' after 100 ns;

--=====
--Cambio de carga
--=====
G3 <='0', '1' after 7 ms;

--=====
--PROCESO: Filtro paso bajo de segundo orden
--=====
process(RAMPA_SD)
begin
    if RAMPA_SD ='1' then
        VSD<= 3.3;
    else
        VSD<= 0.0;
    end if;
end process;

process
variable VC1_aux, VC2_aux: real;
begin
    wait for Ts;
    VC1_aux := (1.0 - dt*(R2+R1)/(R1*R2*C1))*VC1 +(dt/(R2*C1))*VC2 + dt*(VSD)/(R1*C1);
    VC2_aux := (dt/(R2*C2))*VC1 + (1.0 -dt/(R2*C2))*VC2;
    VC1<=VC1_aux;
    VC2<=VC2_aux;
end process;

--=====
-- PROCESO: Comparador analógico
--=====
process(VC2,RiIL)
begin
    if (VC2 <= RiIL) then
        RST_BIESTABLE <= '1';
    else
        RST_BIESTABLE <= '0';
    end if;
end process;

END;
```

8. Diseño de la PCB del convertidor

En este anexo se va a mostrar las tareas llevadas a cabo para la obtención de la tarjeta electrónica del convertidor (PCB). Para ello se han de realizar dos grandes procesos:.

- **Proceso de diseño** el cual a su vez requiere:
 - Diseño del esquema electrónico.
 - Routeado de la PCB.
- **Proceso de fabricación** el cual a su vez conlleva:
 - Fresado.
 - Soldadura.
 - Comprobación.

I. PROCESO DE DISEÑO

1) Diseño del esquema electrónico

Una vez concretadas las necesidades de la tarjeta electrónica, se pasa a la elaboración del esquema electrónico con todos los componentes que dispondrá la tarjeta final, las conexiones entre unos circuitos integrados y otros, etc. El software elegido para ello es Eagle de carácter libre.

La Figura 69 muestra el esquema con los siguientes elementos:

- **Convertidor buck** formado por los siguientes componentes:
 - JP1: Conector mediante el cual se incluirá la tensión de entrada (VIN) al convertidor.
 - C2: Condensador de filtrado de la tensión de entrada.
 - Q1 y Q2: Transistores MOSFET de los que sólo se ha usado Q1 (canal P). Q2 (canal N) se ha incluido por si se quisiera realizar un control síncrono del convertidor.
 - D1: Diodo para la libre circulación de corriente en el estado off de Q1.
 - D2: Diodo de recuperación rápida para el paso a off del Q1.
 - L1: Bobina del filtro LC del convertidor.
 - C2: Condensador del filtro LC del convertidor.
 - R8: Resistencia de carga del convertidor.
- **Driver de disparo**(IC1 A/B)

Usado para amplificar las señales de disparo procedentes de la tarjeta Spartan Nexys 2 (G1 y G2) y poder conmutar los transistores MOSFET. A las dos entradas del mismo, se han llevado sendas señales de disparo, limitando la corriente mediante R9 y R10 respectivamente. También se han incluido a las entradas dos resistencias de pull-down (R2 y R4) y a su salida dos resistencias (R3 y R5) para limitar la corriente de disparo por puerta.

Medida de corriente

Para efectuar la medida de corriente, se ha usado una resistencia de shunt (R1) de bajo valor y un amplificador (IC2), que juntos amplifiquen dicha corriente al doble de su valor (VI).

Cambio de carga

Para establecer un cambio de carga, se ha añadido un transistor (Q3) MOSFET canal N a masa, con una resistencia (R7) en serie de igual valor a la de la carga, en paralelo con la misma. En este caso, dadas las características eléctricas del transistor, no es necesaria la inclusión de un driver de disparo, siendo suficiente la señal procedente de la FPGA (G3), limitando la corriente a través de R11. La resistencia R6 se ha incluido entre puerta y emisor para asegurar el corte del transistor.

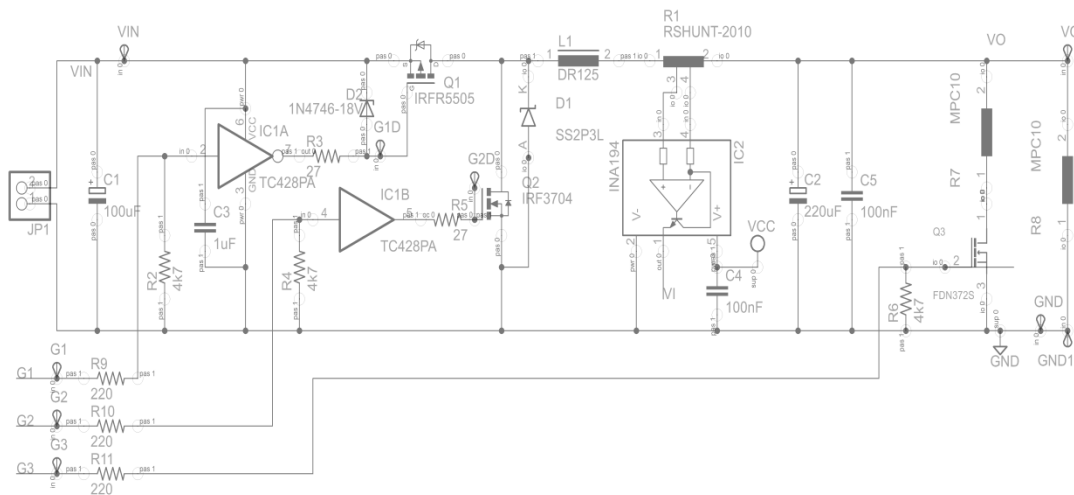


Figura 69 Esquema del convertidor, driver de disparo, medida de corriente y cambio de carga en Eagle.

La Figura 70 muestra el esquema de la fuente de alimentación para los circuitos integrados, con un regulador lineal que asegura una tensión de alimentación de +3.3 V.

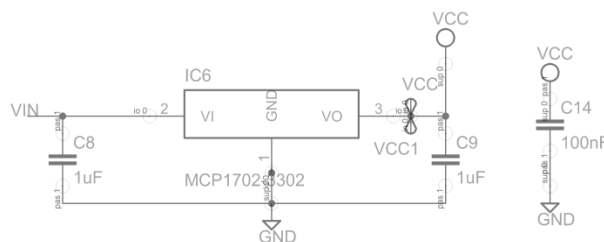


Figura 70 Alimentación de la tarjeta electrónica.

La Figura 71 muestra lo siguiente:

▪ Medida de la tensión de salida (V_O)

Para realizar la medida de la tensión de salida, se ha utilizado un filtro activo Sallen Key paso bajo diseñado al igual que en [19]. Este está formado por R12, R14, C6, C7 e IC3. La salida de dicho filtro (VOF) se ha conectado a la entrada del convertor AD (IC4) y su salida se han conectado a tres de los pines de salida del conector JP2, el cual irá al conector PMOD de la tarjeta Spartan Nexys 2.

▪ Filtro paso bajo de segundo orden

Este filtro paso bajo (R15-C11 y R13-C10), se ha diseñado en función de las frecuencias de corte extraídas de simulaciones realizadas en el anexo 5, con el fin de reconstruir la señal de referencia de corriente compensada digital (VE), procedente de uno de los pines del conector PMOD.

A la hora de su implementación real, se ha tenido en cuenta la adaptación de impedancias entre ambos filtros, para lo que R13 ha de ser mucho mayor que R15 (10 veces mayor en este caso). Por otro lado, la capacidad C11 no puede ser equiparable a las capacidades de los pines de salida de la FPGA.

▪ Comparador analógico

Este tiene como entradas la corriente medida en la bobina ($IN+=VI$) y la corriente de referencia filtrada ($IN-=VEF$), generando a su salida la señal de reset del biestable (RESET). Dicha salida se ha conectado a uno de los pines del PMOD, para controlar el biestable diseñado en VHDL en la FPGA

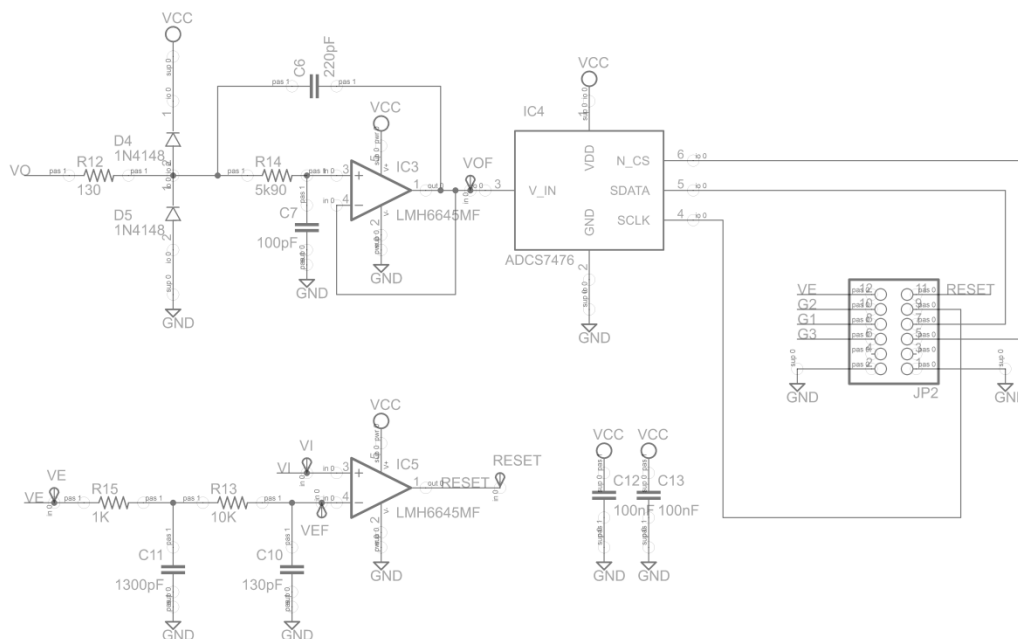


Figura 71 Etapa de acomodación de señales del convertidor y el PMOD de la tarjeta Spartan Nexys 2.

La Figura 72 muestra el esquemático de la PCB diseñada al completo.

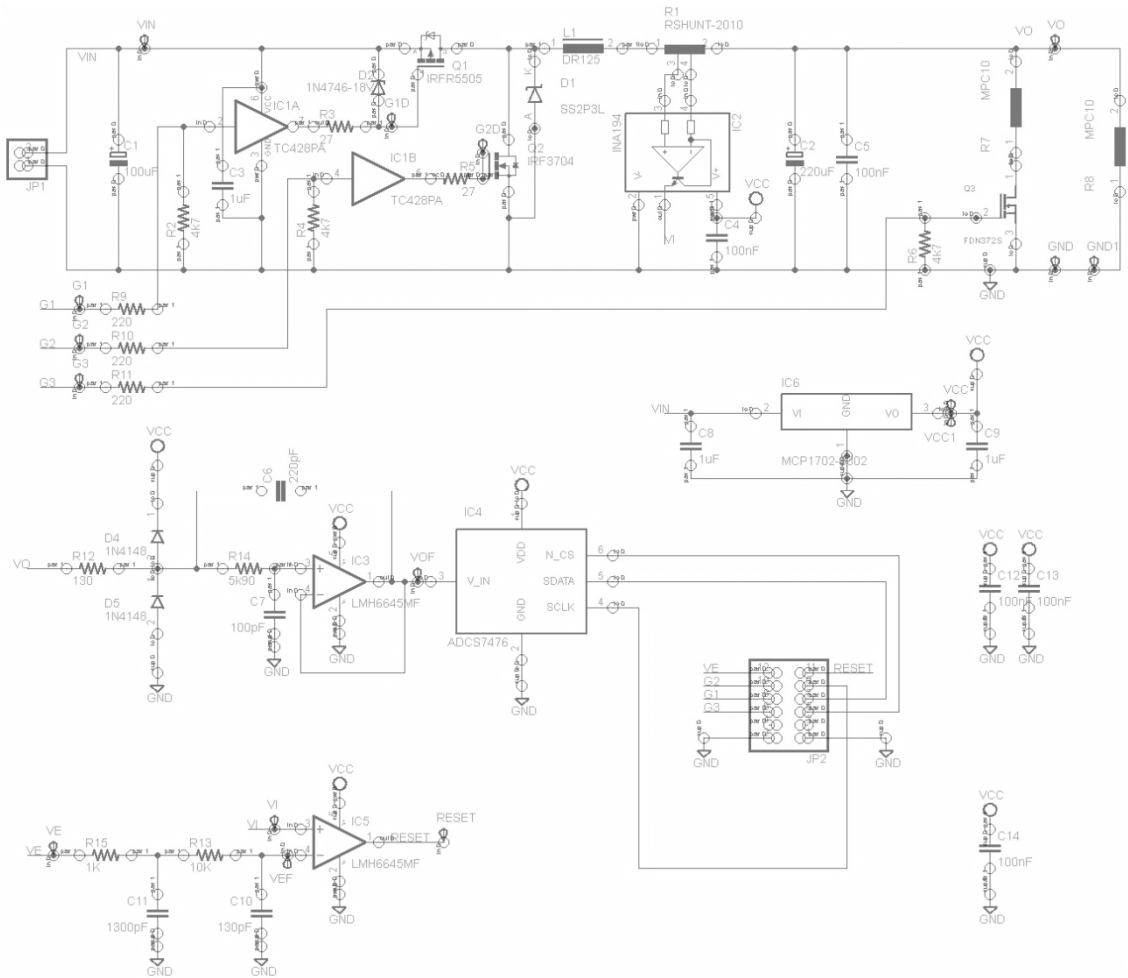


Figura 72 Esquemático completo de la PCB diseñada.

2) Diseño del ruteado

El diseño de las pistas se ha realizado en base a una serie de normas de ruteado y atendiendo a la compatibilidad electromagnética EMC.

Para apantallar las señales y que la referencia de tensión llegue a todos los puntos necesarios por el camino más corto, se ha trazado un plano de masa, conectado a la referencia GND del sistema, eliminando las zonas muertas de cobre.

Se han utilizado componentes SMD para reducir el tamaño de la placa, reducir las inductancias parásitas y reducir el coste.

Así mismo, es necesario aplicar una serie de normativas de ruteado, entre las que destacan:

- El ancho de pistas, diferenciando entre las pistas de alimentación y las de señales de control u otras.
- Longitud de pistas, buscando siempre la optimización con la menor longitud posible.

- Separación entre componentes, para evitar cortocircuitos indeseados, o solapamientos;
- Dimensiones específicos de vías, pads, etc.
- Colocación de condensadores de desacoplo en todos los circuitos integrados para asegurar la correcta alimentación de los mismos.

Se ha buscado también optimizar las dimensiones de la placa, para reducir el coste de la misma, colocando sendos planos de masa tanto en la cara *top* como en la *bottom*. Esto conlleva un menor gasto de brocas en el fresado, y ayuda a su vez a apantallar todas las pistas, a reducir la impedancia de GND para facilitar un retorno de las señales lo más corto posible.

3) Conectores

Los conectores que unen la tarjeta con el resto de dispositivos exteriores, son los siguientes:

- JP1: Alimentación del convertidor a 5 voltios.
- JP2: Conector para unir la PCB diseñada con el conector PMOD de la tarjeta NExys 2.

Además, se han añadido una serie de anillas para tener mayor accesibilidad de las señales. En el esquemático vienen denominadas bajo los siguiente identificadores: VIN, G1, G2, G3, G1D, G2D, VO, GND, GND1, VCC, VCC1, VOF, VI y RESET.

II. PROCESO DE FABRICACIÓN

Para la fabricación material de la tarjeta se ha utilizado una máquina de prototipado, capaz de realizar el fresado y taladrado de las placas de cobre utilizadas para la creación de PCBs.

A partir del documento de tipo PCB, se generan unos archivos llamados Gerber, que contienen la información física de la tarjeta (tamaño, pistas de cobre, taladros, tamaño de cada taladro, etc).

A continuación, se procede a la soldadura con estaño de los componentes. Ésta se realiza manualmente, evitando siempre la soldadura fría. Se consiguen con ello uniones fiables y definitivas, que permiten sujetar los componentes, soportan golpes y vibraciones, garantizando la circulación de la corriente eléctrica.

Finalmente, una vez que la tarjeta se encuentra con todos los componentes colocados, se procede a la comprobación funcional de la tarjeta. Primero se comprueba que no existan cortocircuitos entre pistas. Después, con la ayuda de los equipos de medida, se comprueba que cada etapa electrónica que se encuentra en la tarjeta opere de forma correcta.

En la etapa de verificación se ha comprobado modularmente el correcto funcionamiento del prototipo. Las comprobaciones se enumeran a continuación:

- **Funcionamiento del convertidor en lazo abierto y el control del conversor D/A.**

Para ello se ha realizado un código en VHDL que conmute el transistor Q1 con un ciclo de servicio 0.5 y en el mismo se ha incluido el control del conversor DA, visualizando el resultado en el display BCD 7 segmentos que la tarjeta NEXYS 2 contiene.

- **Funcionamiento del filtro paso bajo de segundo orden y del comparador analógico.**

Para realizar esta comprobación, se ha realizado un código en VHDL, en el que se ha establecido una referencia constante de la corriente compensada en lazo abierto, equiparable a la corriente medida con ciclo de servicio 0.5, verificando de este modo el correcto funcionamiento del filtro paso bajo y del comparador.

III. PLANOS

A continuación, se muestran los planos obtenidos para la realización de la tarjeta electrónica.

1) Serigrafía

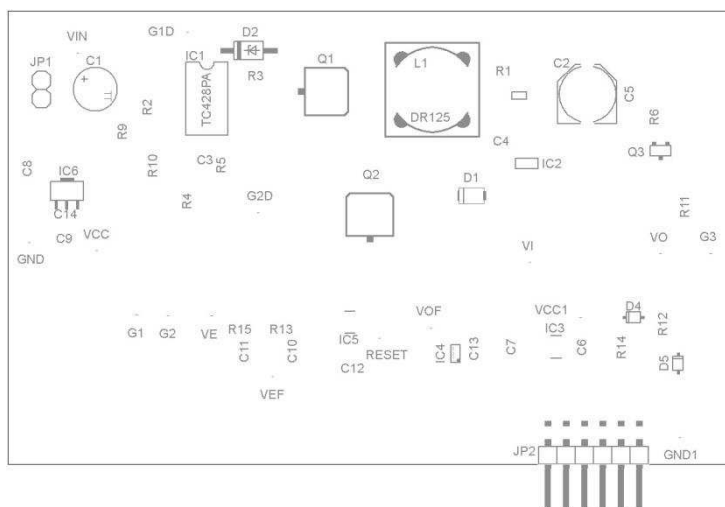


Figura 73 Plano de serigrafía.

2) Ruteado

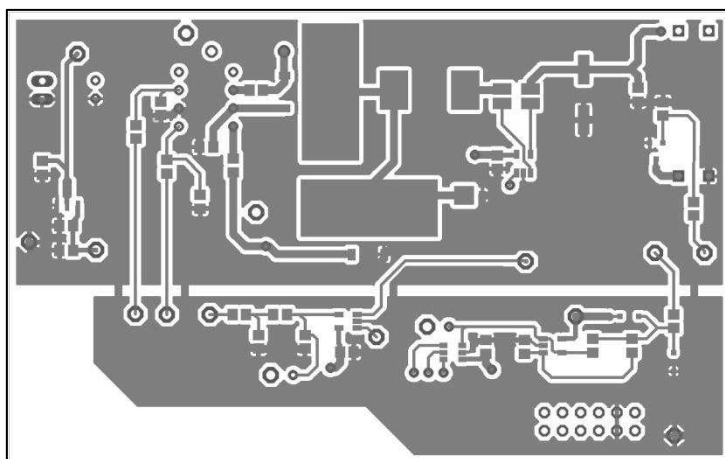


Figura 74 Plano de ruteado (Cara Top).

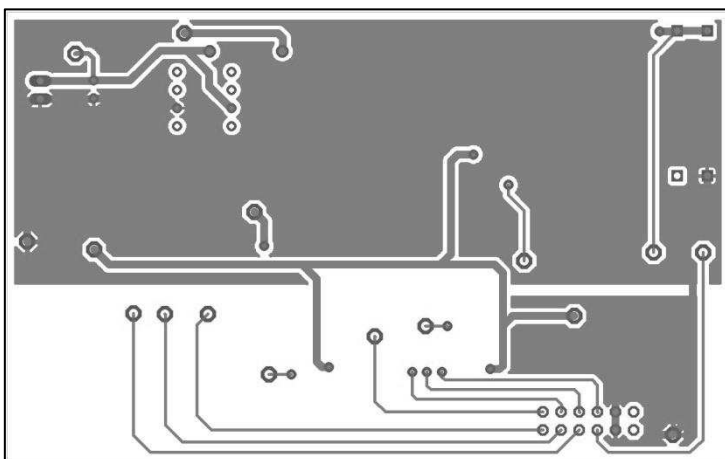


Figura 75 Plano de ruteado (Cara Bottom).

3) Taladrado

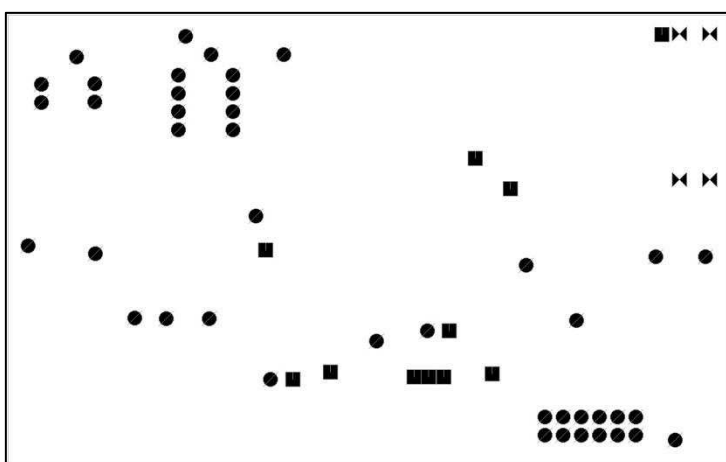


Figura 76 Plano de taladrado.

4) Listado de materiales (BOM)

Fabricante	Modelo	Descripción	Símbolo
AVX	08051A121JAT2A	CAPACITOR, MLCC, 0805, 120 pF	C10
AVX	08051C122KAT2A	CAPACITOR, MLCC, 0805, 1200 pF	C11
EPCOS	B82477P4683M000	INDUCTOR, 68UH, 2.35A, 20%	L1
FAIRCHILD SEMICONDUCTOR	FDN372S	MOSFET, N, SMD, SSOT	Q3
FISCHER ELEKTRONIK	FK 244 08 D PAK	HEAT SINK, FOR D-PAK, 31.5°C/W	---
INTERNATIONAL RECTIFIER	IRFR5505PBF	MOSFET, P, -55V, -18A, D-PAK	Q1
INTERNATIONAL RECTIFIER	IRFR024NPBF	MOSFET, N, 55V, 16A, D-PAK	Q2
KEMET	C0805C104J5RACTU	CAP, CERAMIC, 100 nF X7R, 0805	C4, C5, C12, C13 y C14
KEMET	C0805C101K5GACTU	CAP, CERAMIC, 100 pF MULTILAYER	C7
LKV SERIES	LKV20R039	R SHUNT, 2010 CASE, R039	R1
MICROCHIP	TC428CPA	DRIVER, MOSFET DUAL	IC1
MICROCHIP	MCP1702T-3302E/MB	LDO REG, 250MA, 3.3V, SOT-89	IC6
MOLEX KK	STRAIGHT HEADER, 6373 SERIES	2.54MM,HEADER,KK,VERT,SN,FRICTN LOCK,2W	JP1
MULTICOMP	MC 0.1W 0805 1% 130R	RESISTOR, 0805 130R	R12
MULTICOMP	MC 0.1W 0805 1% 27R	RESISTOR, 0805 27R	R3 y R5
MULTICOMP	MC 0.1W 0805 1% 220R	RESISTOR, 0805 220R	R9, R10 y R11
MULTICOMP	MCSR08X103 JTL	RESISTOR, 0805,10KR	R13
MULTICOMP	MC 0.1W 0805 5% 1K	RESISTOR, THCK FILM,1K, 0805	R15
NATIONAL SEMICONDUCTOR	ADCS7476AIMF	12BIT ADC 1MSPS, 7476, SOT236	IC4
NATIONAL SEMICONDUCTOR	LMH6645MF	OP AMP, SINGLE 80MHZ RRIO	IC3 e IC5
PANASONIC	EEEF1V221AP	CAPACITOR, F CASE, 220UF, 35V	C2
TAIYO YUDEN	UMK212F105ZG-T	CAPACITOR MLCC 1μF	C3, C8 y C9
TEXAS INSTRUMENTS	INA194AIDBVT	CURRENT SHUNT MONIT., SOT235	IC2
TYCO ELECTRONICS	MPC1085R0J	RESISTOR, 10 WATT, 5R0 5%	R7 y R8
TYCO ELECTRONICS	826953-6	HEADER, RIGHT ANGLE, 2X6WAY	JP2
VISHAY	SS2P3L	DIODE, SCHOTTKY, 2A, 30V	D1
VISHAY DRALORIC	CRCW08054K70FKEA	RESISTOR, 0805, 4K7, 1%	R2,R4 y R6
VISHAY DRALORIC	CRCW08055K90FKEA	THICK FILM CHIP RESISTOR 5K9	R14
VISHAY SEMICONDUCTOR	1N4746A-TR	DIODE, ZENER, 18V, 1.3W	D2
VISHAY SEMICONDUCTOR	1N4148WS-V-GS08	DIODE, SWITCHING, SOD323	D4 y D5

Tabla 7 Listado de materiales utilizados en la PCB diseñada.

Bibliografía

- [1] R. W. Erickson, Fundamentals of Power Electronics, 2 ed., Colorado: Kluwer academic publishers, 2001.
- [2] A. Oliva, S. S. Ang, G. E. Bortolotto, «Digital Control of a Voltage-Mode Synchronous Buck Converter,» de *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 1, 2006, pp. 157-163.
- [3] R. Vázquez Millán, «Control digital de un convertidor Buck mediante realimentación lineal del estado,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2013.
- [4] A. Barrado, A. Lázaro, «Problema 6.46,» de *Problemas de electrónica de potencia*, Prentice Hall, 2007.
- [5] L. H. Dixon, «Average current-mode control of switching power supplies,» Unitrode Power Supply Design Seminar Handbook,, 1990.
- [6] E. E. Carbajal Gutiérrez, J. A. Morales Saldaña, J. Leyva Ramos, «Average current mode control for a quadratic buck converter,» San Luis Potosí, 2005.
- [7] G. Zhou, J. Xu, M. He, J. Wang, «Analysis of Digital Average Current Control of Buck Converter with Single-edge Modulation,» Southwest Jiaotong University, Sichuan, 2008.
- [8] R. D. Lorenz, D. B. Lawson, «Performance of Feedforward Current Regulators for Field-Oriented Induction machine Controllers,» de *IEEE Transactions on Industry Applications* Vol. IA-23, 1987, pp. 597-602..
- [9] C.-H. Tsai, C.-H. Yang, J.-H. Shiau, B.-T. Yeh, «Digitally Controlled Switching Converter With Automatic Multimode Switching,» Tainan, 2014.
- [10] R. B. Ridley, «A New Continuous Time Model for Current-Mode Control with Constant Frequency, Constant On-Time and Constant Off-Time, in CCM and DCM,» *IEEE Transactions on power electronics*, Blacksburg, 1990.
- [11] M. K. Kazimierczuk y N. Kondrath, «Control-to-Output and Duty Ratio-to-Inductor Current Transfer Functions of Peak Current-Mode Controlled DC-DC PWM Buck Converter in CCM,» *IEEE Transactions on power electronics*, Dayton, 2010.
- [12] S. Kasat, «Analisys, desing and modeling of DC-DC converters using Simulink,» Indore, 2004.
- [13] C. Xiao-fei, Z. Xue-cheng, C. Jun, Y. Kai , L. Shuang-xi, «System Modeling and Stability Design for Peak Current-mode Buck Power Converter,» Wuhan, 2010.

- [14] M. Hallworth, S. Ali, «Microcontroller-Based Peak Current Mode Control Using Digital Slope Compensation,» Reading, 2012.
- [15] S. R. Norsworthy, R. Schreier, G. C. Temes, «Chapter 10 Architectures for Delta-Sigma DACs,» de *Delta-Sigma Data Converters. Theory, Design and Simulation*, IEEE press, pp. 314-315.
- [16] L. A. Barragán et al., «Comparing simulation alternatives of FPGA-based controllers for switching converters,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2007.
- [17] J. I. Artigas, L. A. Barragan, «Apuntes de la asignatura C.D.I.G.E.E.P. (M.I.E),» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2013.
- [18] B. Jhohnston et al., «Designing with the TL5001 PWM Controller,» Texas Instrument, 2000.
- [19] A. Sanz, J. I. Artigas, E. Laloja, «Apuntes de filtros activos de la asignatura SEAVAN (M.I.E.),» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2013.