

## Diseño y simulación de un controlador en modo deslizante para convertidores reductores

Design and simulation of a sliding mode controller for multiphase buck converter systems

Projeto e simulação de um controlador de modo deslizante para conversores buck

**Mariana Gabriela Quintero Quiñonez**

mariana.quintero.quinonez@utelvt.edu.ec

Facultad de Ingenierías de la Universidad técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas – Ecuador

<https://orcid.org/0000-0001-9308-4423>

**Karen Yanela Simisterra Quiñonez**

karen.simisterra.quinonez@utelvt.edu.ec

Facultad de Ingenierías de la Universidad técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas – Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-8590-6316>

**Carlos Iván Rueda Panchano**

ivan.rueda@utelvt.edu.ec

Facultad de Ingenierías de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas-Ecuador

<https://orcid.org/0000-0001-5067-6277>

**Marco Rodrigo Ibarra Caicedo**

marcos.ibarra.caicedo@utelvt.edu.ec

Facultad de Ingenierías de la Universidad técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas – Ecuador

<https://orcid.org/0000-0003-4658-0648>

### RESUMEN

En el presente trabajo se mostrará el principio de funcionamiento del control en modo deslizamiento aplicado a módulos de convertidores de corriente con tipología buck (reductores) para los cuales se encontrarán las ecuaciones que describen la dinámica del sistema, calculando la superficie sobre la cual deslizan. Por medio del software Matlab – Simulink se realizarán las simulaciones de los esquemas propuestos y se ensayaran con las variables que determinan la robustez  $k_p$ , y  $k_i$  (constantes proporcionales e integrales) del sistema, así como el comportamiento del sistema y respuesta del controlador frente a variaciones de la carga. Luego se presentan las gráficas del comportamiento de los parámetros principales tales como corriente, tensión y potencia de salida, ciclo de trabajo y potencia en el inductor. Para efecto de análisis se establecerán pruebas que buscan determinar la robustez del sistema variando la potencia requerida por la carga conectada al sistema, y ensayan diferentes parámetros que logran la respuesta deseada del sistema.

**Palabras clave / Descriptores:** Control modo deslizante, Convertidor buck, controladores, simulación tiempo real.

### ABSTRACT

In the present work, the operating principle of the sliding mode control applied to current converter modules with buck typology (reducers) will be shown, for which the equations that describe the dynamics of the system will be found, calculating the surface on which they slide. By means of the Matlab - Simulink software, the simulations of the proposed schemes will be carried out and they will be tested with the variables that determine the robustness  $k_p$ , and  $k_i$  (proportional and integral constants) of the system as well as the behavior of the system and the response of the controller against variations. of the load. Then the graphs of the behavior of the main parameters such as current, voltage and output power, duty cycle and power in the inductor are presented. For the purpose of analysis, tests will be established that seek to determine the robustness of the system by varying the power required by the load connected to the system, and test different parameters that achieve the desired response of the system.

**Keywords:** Slider mode control, buck converter, controllers, real time simulation.

### RESUMO

No presente trabalho, será mostrado o princípio de funcionamento do controle por modo deslizante aplicado a módulos conversores de corrente do tipo buck (redutores), para o qual serão encontradas as equações que descrevem a dinâmica do sistema, calculando a superfície sobre a qual deslizam. Por meio do software Matlab – Simulink, as simulações dos esquemas propostos serão realizadas e testadas com as variáveis que determinam a robustez  $k_p$ , e  $k_i$  (constantes proporcionais e integrais) do sistema, bem como o comportamento do sistema e a resposta do controlador contra variações de carga. Em seguida são apresentados os gráficos do comportamento dos principais parâmetros como corrente, tensão e potência de saída, ciclo de trabalho e potência no indutor. Para fins de análise, serão estabelecidos testes que buscam determinar a robustez do sistema variando a potência requerida pela carga conectada ao sistema, e testar diferentes parâmetros que atinjam a resposta desejada do sistema.

**Palavras-chave / Descritores:** Controle deslizante, conversor Buck, controladores, simulação em tempo real.

## 1. INTRODUCCIÓN

La teoría de control por modo deslizante para aplicaciones de estructuras variables se ha venido desarrollando desde los años 50 en sistemas no lineales, multi entrada-salida, sistemas discretos y en sistemas estocásticos. (Salazar & Ayala, 2013).

El principio del control en modo deslizante es buscar mediante la adecuada entrada de control que el sistema esté en la superficie  $S=0$ . El modo deslizante busca controlar el sistema mediante una lógica de conmutación de la llave semiconductor (Espinoza & Ayala, 2015).

□ Modo de alcanzabilidad: Durante el cual la trayectoria de estado se mueve hacia la superficie de conmutación y la alcanza.

□ Modo deslizante: Es el comportamiento en el que la trayectoria del estado se encuentra sobre la superficie de deslizamiento.

Al obligar a los estados del sistema que satisfagan  $S=0$ , se debe de asegurar que éste es capaz de alcanzar el estado  $S=0$  desde cualquier condición inicial y que una vez se ha alcanzado dicho estado la acción de control es también capaz de mantener al sistema en dicho estado. Estas condiciones se expresan matemáticamente como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Si } S > 0 \text{ hacer } \frac{dS}{dt} < 0 \\ \text{Si } S < 0 \text{ hacer } \frac{dS}{dt} > 0 \end{aligned}$$

Expresado de otra forma

$$S \cdot \frac{dS}{dt} < 0$$

Cuando el sistema está en un estado fuera de la superficie  $S=0$ , el movimiento del estado del sistema respecto del tiempo ( $dS/dt$ ) es en la dirección de recuperar la superficie  $S=0$ .

Si se supone, lo siguiente como ley de control:

$$\begin{aligned} \text{Si } S > 0 \text{ hacer } u = u^+ \\ \text{Si } S < 0 \text{ hacer } u = u^- \end{aligned}$$

Cuando se aplica la ley de control el estado del sistema se mueve hacia la línea de deslizamiento y una vez llega a la misma se desliza a través suyo hasta llegar al régimen permanente final. En la práctica el deslizamiento se produce alrededor de la línea de deslizamiento entre unos límites formando unas bandas de histéresis de amplitud  $\psi$ . (Ramos, 2010).

Debido a que la evolución del sistema está obligada a mantenerlo siempre alrededor de la línea de deslizamiento la respuesta del mismo depende únicamente de la línea o superficie de deslizamiento escogido y es independiente de los parámetros del sistema.

## 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Tipología del convertidor buck – reductor

La primera sección de este trabajo constituye el diseño del control de modo deslizante para un solo convertidor. En este trabajo se busca ensayar mediante simulación los procedimientos de diseño y los resultados de la simulación se comparan con el análisis teórico.

En el funcionamiento del convertidor estático, se define a la variable de control como  $u(t)$ , la misma que puede tomar 1 cuando el interruptor se encuentra en ToN y la variable se control toma el valor de 0 cuando el interruptor está en TOFF (Casellas, et al, 2014).

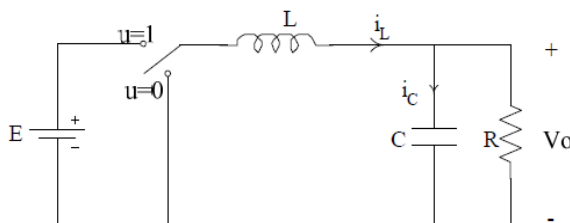


Figura.1 Esquema del Convertidor Buck

El convertidor Buck permite transformar un voltaje de entrada mayor en una tensión de salida regulada, esta transformación está condicionada por el ciclo de trabajo del convertidor (Espinoza & Ayala, 2015).

## 2.1 Diseño de un Controlador en modo deslizante para regular el voltaje de salida.

Usando los parámetros de diseño que se presentan a continuación, se va a dar respuestas a las interrogantes planteadas:

Tabla1. Parámetros de diseño del convertidor buck.

### PARAMETROS DE DISEÑO

Símbolo	Descripción	Valor
$V_{ac}$	Voltaje de entrada	300 V
$V_o$	Voltaje de salida	100 V
$P_{out}$	Potencia de salida	2000 W (Carga máxima)
C	Capacitancia	100 $\mu$ F
L	Inductancia	0.2mH

La topología de un convertidor buck es el de la figura 1, en este caso el circuito está conectado a una fuente lo que producirá un voltaje de salida cuando el interruptor se encuentre en la posición de 1, por el contrario, en la posición 0 el circuito se desconectará y el capacitor se descargará a través de la resistencia de carga, estos estados del convertidor se representan en la figura 2.

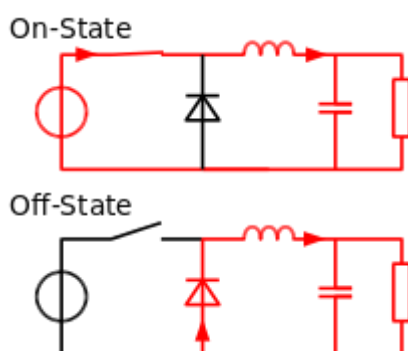


Figura 2. Estados del Convertidor Buck

Si se conocen las ecuaciones de estado mostradas en (1) y (2) de conducción y no conducción (García, 2018):

$$L \frac{di_L}{dt} = uE - V_o \quad (1)$$

$$C \frac{dV_o}{dt} = i_L - i_o \quad (2)$$

Se las puede expresar también de la siguiente manera:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{ref} - V_o)$$

$$C \frac{dV_o}{dt} = i_L - \frac{V_o}{R}$$

Si se deriva (2) y se reemplaza en (1) se obtiene que:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{ref} - V_o)$$

$$C \cdot \frac{d^2V_o}{dt^2} = \frac{di_L}{dt} - \frac{dV_o}{dt} \frac{1}{R}$$

$$C \cdot \frac{d^2V_o}{dt^2} = \frac{1}{L} (V_{ref} - V_o) - \frac{dV_o}{dt} \frac{1}{R}$$

$$C \cdot \frac{d^2V_o}{dt^2} + \frac{dV_o}{dt} \frac{1}{R} = \frac{1}{L} (V_{ref} - V_o)$$

Finalmente se obtiene la ecuación (3)

$$C \cdot \frac{d^2V_o}{dt^2} + \frac{dV_o}{dt} \frac{1}{R} + \frac{k}{L} V_o = \frac{1}{L} (V_{ref}) \quad (3)$$

Tomando la ecuación (1) y se iguala a cero, se tiene que:

$$0 = \frac{1}{L} (V_{ref} - V_o) - \frac{di_L}{dt}$$

Puesto que  $S \approx 0$ , es decir la superficie de deslizamiento es igual a cero, se tiene que:

$$\dot{S} = \frac{1}{L} (V_{ref} - V_o) - \frac{di_L}{dt}$$

Al integrar esta ecuación se obtiene la dinámica de deslizamiento ideal para el convertidor Buck, con los parámetros establecido en la tabla 1.

$$S = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t (V_{ref} - V_o) dt - i_L \quad (4)$$

$$S = K_p (V_{ref} - V_o) + \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t (V_{ref} - V_o) dt - i_L \quad (5)$$

$$C \cdot \frac{d^2V_o}{dt^2} + \left( \frac{1}{R} + K_p \right) \frac{dV_o}{dt} + \frac{k}{L} V_o = \frac{1}{L} (V_{ref}) \quad (6)$$

Con las condiciones de existencia se puede deducir la ley de control que se tiene es la siguiente:

$$S > 0 \quad \left( k_i \int_{-\infty}^t (V_{ref} - V_o) dt > i_L \right)$$

Caso a)  $S > 0, \dot{S} < 0, u = u^+$

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -K_p \frac{dV_o}{dt} + k_i (V_{ref} - V_o) - \frac{di_L}{dt} \\ \dot{S} &= -K_p \frac{dV_o}{dt} + k_i (V_{ref} - V_o) - \frac{1}{L} [E u^+ - V_o] < 0 \end{aligned}$$

Caso b)  $S < 0, \dot{S} > 0, u = u^-$

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -K_p \frac{dV_o}{dt} + k_i (V_{ref} - V_o) - \frac{di_L}{dt} \\ \dot{S} &= -K_p \frac{dV_o}{dt} + k_i (V_{ref} - V_o) - \frac{1}{L} [E u^+ - V_o] > 0 \end{aligned}$$

Si restamos estas ecuaciones para los dos casos de control, el término que nos queda finalmente es:

$$\frac{E}{L} [u^- - u^+] < 0$$

De donde deducimos que el valor de  $u^+$  y de  $u^-$  que cumplen esa condición son las siguientes:

$$\begin{aligned} u^+ = 1 \quad S > 0 \quad k_i \int_{-\infty}^t (V_{ref} - V_o) dt > i_L \\ u^- = 0 \quad S < 0 \quad k_i \int_{-\infty}^t (V_{ref} - V_o) dt < i_L \end{aligned}$$

Para lograr robustez frente a los cambios de carga, proponemos una nueva superficie deslizante cumpliendo las condiciones detalladas a continuación. La condición 1 para lograr robustez frente a cambios de carga es:

$$K_p \gg \frac{1}{R}$$

Superficie de deslizamiento del convertidor buck.

$$\frac{V_o}{V_{ref}} = \frac{\frac{1}{L}}{Cs^2 + \left(\frac{1}{R} + Kp\right)s + \frac{1}{L}k} \quad (7)$$

Donde,

$$Ki = \frac{1}{L}k \quad (8)$$

Tomando los parámetros de diseño propuestos tenemos que:

$$P = \frac{V_o^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_o^2}{P} = \frac{100^2 V}{2000 W} = 5\Omega$$

Con esto obtenemos la constante proporcional

$$K_p \gg \frac{1}{R} \rightarrow K_p \gg \frac{1}{5} \rightarrow K_p \gg 0.2$$
$$K_p = 5$$

Y para la constante integral condición 2, tomamos (8) y se reemplaza con los valores de diseño.

$$K_i = \frac{1}{L}k \rightarrow K_i = \frac{1}{0.2 * 10^{-3}} 1$$
$$K_i = 5000$$

Estos son los valores iniciales que se tomaran para simular el esquema propuesto, para establecer los valores que permitan que el sistema se comporte según los parámetros esperados.

### 3.1 Propuesta de un esquema Matlab-Simulink para simular el convertidor Buck conmutado basado en control de modo deslizante.

En la figura 3 se muestra el esquema propuesto para el convertidor Buck, realizado en Matlab-Simulink que permitirá su simulación para observar el comportamiento del Sistema.

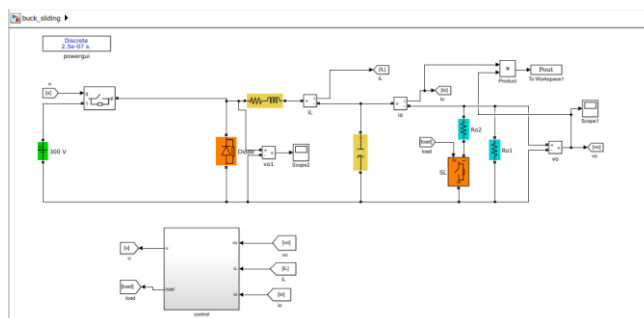


Figura 3. Esquema del convertidor Buck. Matlab-Simulink

Así también se muestra el diseño del control en modo deslizamiento para el convertidor buck encargado de mantener el sistema sobre la superficie de deslizamiento y realizar la variación de la potencia de carga en un tiempo determinado.

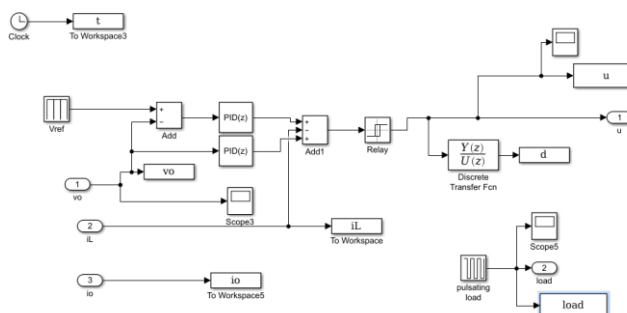


Figura 4. Esquema del controlador del convertidor Buck. Matlab-Simulink

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. Simulación y resultados

Con el modelo propuesto se simulará para validar la respuesta transitoria durante el arranque para el voltaje de inicio  $V_o$ , corriente de inicio  $i_o$ , potencia de salida  $p_{out}$ , corriente del inductor  $i_L$  y el ciclo de trabajo  $d$ .

Dentro de los parámetros de interés para el análisis del comportamiento del convertidor buck en modo deslizamiento tenemos el voltaje de salida, representado en la figura 5 en el cual podemos visualizar la estabilidad de esta variable desde una condición inicial que para efectos de este estudio es 0, observamos como en un instante muy pequeño de tiempo esta variable toma el valor de referencia que es 100 V.

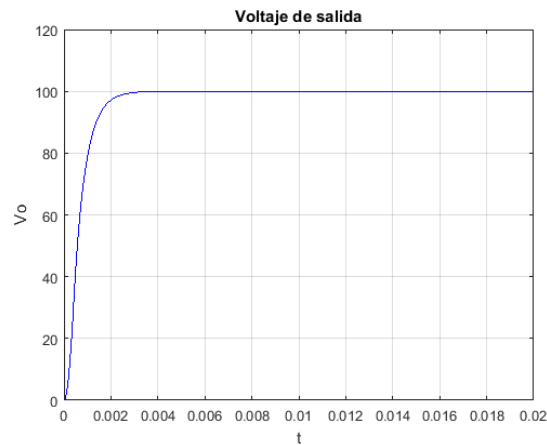


Figura 5. Voltaje de salida ( $V_o$ )

Se representa también el ciclo de trabajo para el controlador ( $d$ ).

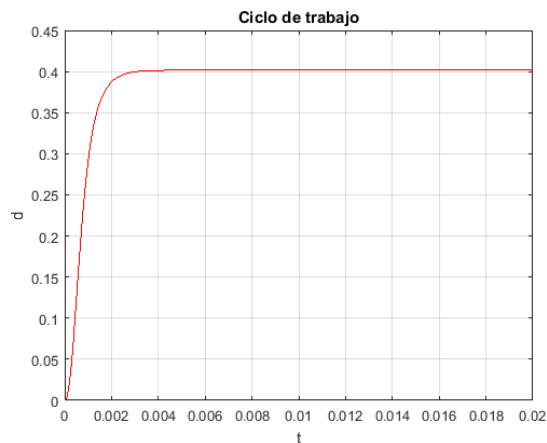


Figura 6. Ciclo de trabajo del convertidor

La corriente en el inductor en el convertidor buck que se muestra en la figura 7 es un parámetro que nos permite analizar la respuesta al cambio de ancho de banda, el ancho de la histéresis determina la amplitud de su rizado.

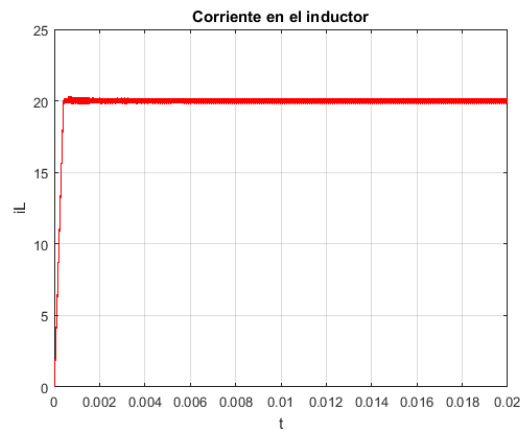


Figura 7. Corriente en el inductor ( $i_L$ )

La corriente de salida a la carga es muy estable ya que el capacitor ayuda a estabilizar esta corriente manteniéndola constante mientras no existan cambios en la carga, podemos observar su representación para este esquema en la figura 8.

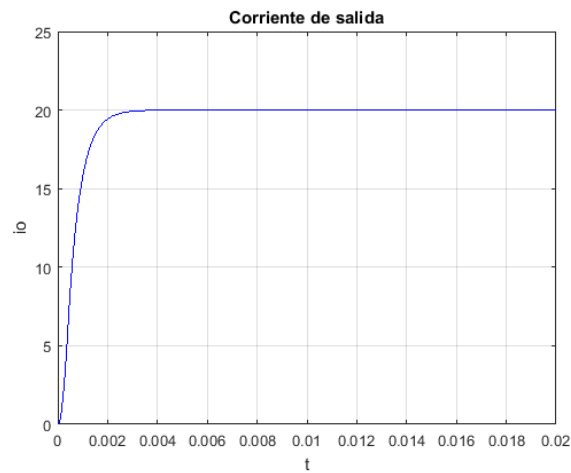


Figura 8. Corriente en la salida ( $i_O$ )

Se muestra también en la figura 9 la potencia de salida del convertidor que alimenta una carga de 2000W, manteniéndose estable.

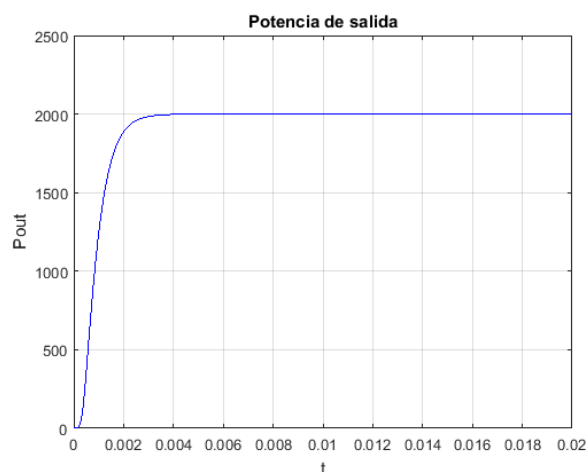


Figura 9. Potencia de salida a la carga ( $P_{out}$ )

En la figura 10 se representa también  $u$ , que es el parámetro de conmutación y toma valores entre 1 y 0, haciendo deslizar el sistema por la superficie encontrada, por lo que vemos una señal que conmuta a alta frecuencia dejando una trayectoria constante entre los valores de 0 y 1.



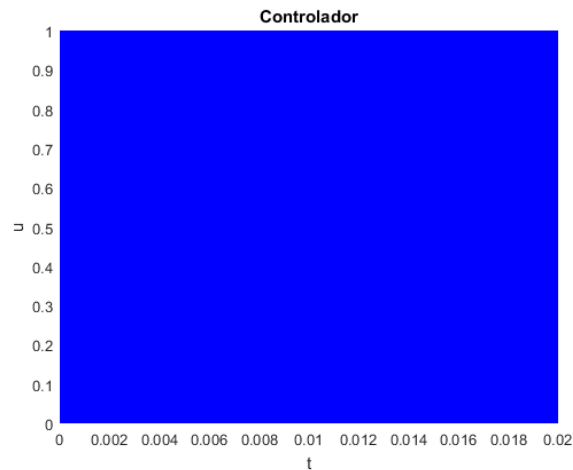


Figura 10. Representación de la señal de control  $u$

A continuación, se busca probar el controlador con carga variable para observar su comportamiento y las variaciones que experimentan los parámetros principales. Para simular un cambio en la potencia de carga, se emplea una resistencia en paralelo que modifica el valor de la potencia de carga, por medio de un controlador y una señal de pulsos que alterna permite la conexión y desconexión de la resistencia en paralelo, tal como se muestra en la figura 11.

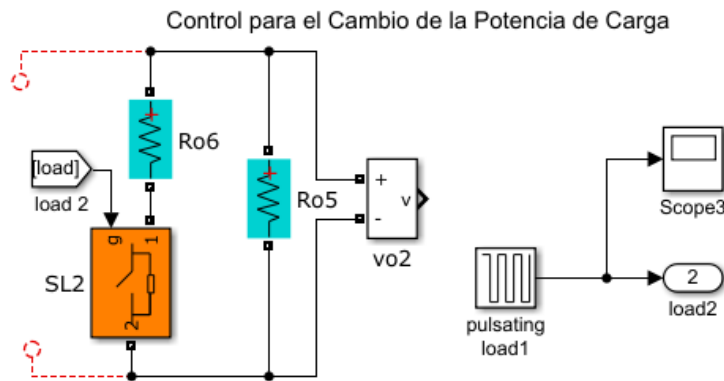


Figura 11. Esquema del control para cambio de carga.

Esta es la señal de pulsos que nos permite realizar la variación de la carga en el tiempo para una potencia de salida de 2000 W a 1000 W, en la figura 12 se observa que la potencia de salida pasa de 2000W a 1000W regresando a su valor inicial nuevamente, efecto que permite probar el controlador con variaciones de carga

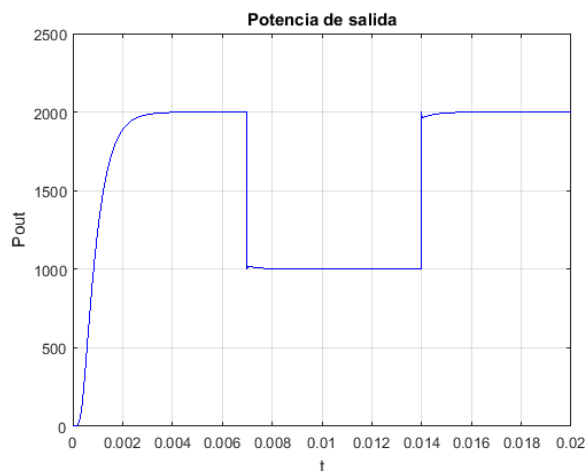


Figura 12. Potencia de salida con variación de carga ( $P_{out}$ )

En las figuras 13 y 14 se observa que, al producirse un cambio de la potencia de salida debido a la carga, los parámetros de voltaje y corriente respectivamente varían.

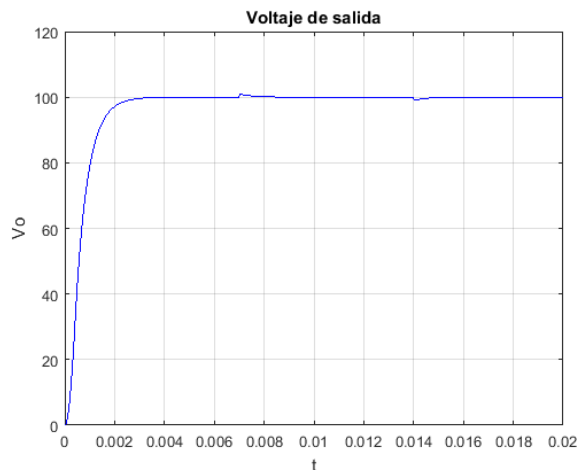


Figura. 13 Voltaje de salida con variación de carga ( $V_o$ )

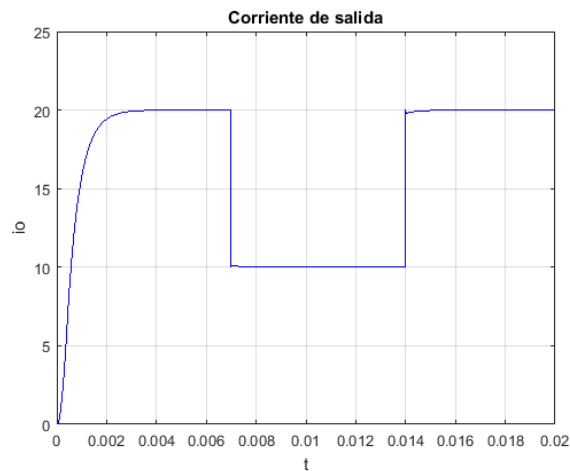


Figura 14. Corriente de salida con variación de carga ( $i_o$ )

De la misma forma los parámetros de ciclo de trabajo, y la corriente del inductor que han variado siguiendo el nivel de carga, respondiendo de forma instantánea y llegando a estabilizarse en un corto instante de tiempo. En las figuras 15 y 16 se muestra la señal de corriente en el inductor del convertidor y el ciclo de trabajo del controlador.

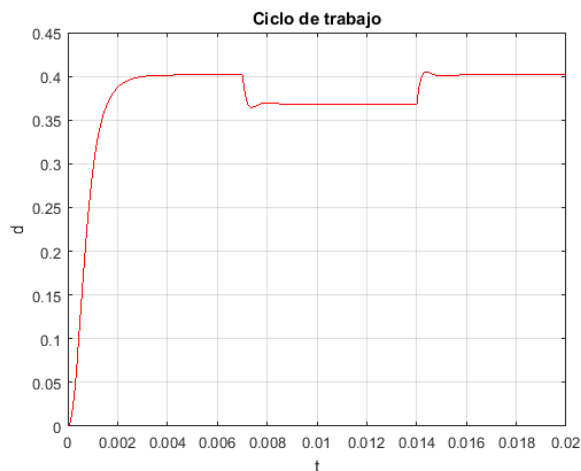


Figura 15. Ciclo de trabajo con variación de carga ( $d$ )

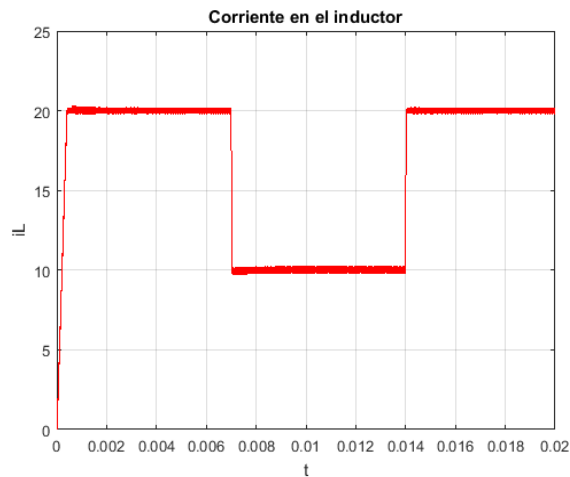


Figura 16. Corriente en el inductor con variación de carga (iL)

Como vemos los parámetros de salida no se ven afectados por los cambios de la resistencia de carga puesto que este control en modo deslizamiento es independiente de las variaciones en la carga, lo cual se logra debido a la característica de robustez del sistema diseñado que viene dado por los valores de  $K_p$  y  $K_i$  que hemos obtenido anteriormente:

$$K_p \gg \frac{1}{R}$$

### 4.2.3. Modificación del ancho de histéresis y análisis del efecto en la dinámica del sistema

Se realiza la simulación con diferentes valores para el ancho de histéresis para analizar el comportamiento del sistema al variar este parámetro. En la tabla se describen los valores de histéresis elegidos para la simulación del controlador.

Tabla 3. Valores de ancho de histéresis para prueba

Ancho de histéresis	Min	Max
	eps	eps
	10	10
	3	0
	0	0

En la figura 17 se muestra la respuesta obtenida al simular el circuito, configurando el ancho de histéresis con valor mínimo y máximo eps. Se observa las diferentes variables cuando se establece un ancho de histéresis  $2.2204e-16$  (eps en Matlab) como valor mínimo probable para simulación.

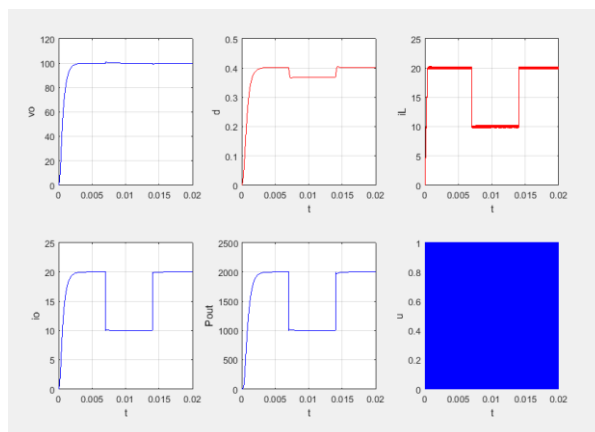


Figura 17. Respuesta de la histéresis con el número [eps, eps]

En la figura 18 se presentan las señales de salida de tensión, corriente y potencia; así como el ciclo de trabajo del controlador y la señal de conmutación con un ancho de histéresis de [10 10].

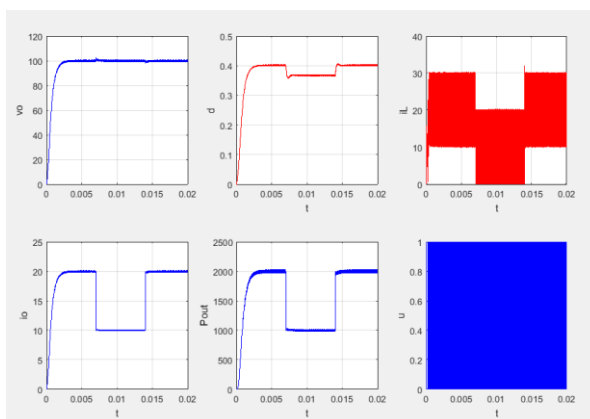


Figura 18. Respuesta del Sistema con histéresis [10, 10]

En este caso vemos que el voltaje, corriente y potencia de salida, el ciclo de trabajo no se observan variaciones se comportan según diseño, pero en la corriente del inductor se observa un mayor rizado, dicho de otra forma, claramente esta corriente está tomando valores muy alejados de la media que se requiere.

El mismo efecto descrito anteriormente sucede con un ancho de histéresis [3 0], graficado en la figura 19.

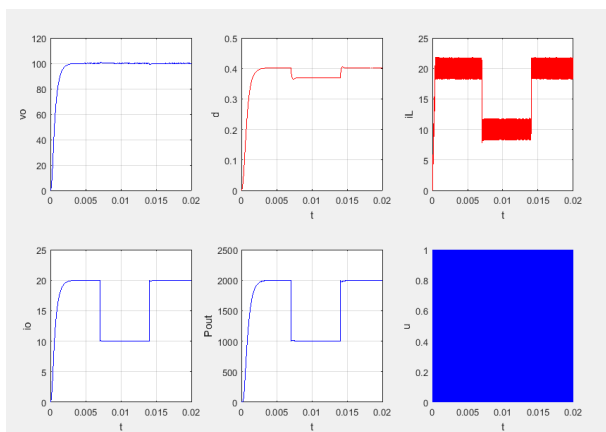


Figura19. Respuesta del sistema con histéresis [3, 0]

Si modificamos la histéresis conforme la figura 20 se observa el comportamiento, si se eliminan los límites de la banda de histéresis, se nota que las variables de salida mantienen las mismas respuestas al control pero el ciclo de trabajo depende del control u el cual al no encontrarse acotado tiene un comportamiento menos homogéneo y la frecuencia de conmutación del sistema ya no es controlada sino que queda libre, en la figura se muestra el efecto de eliminar el ancho de histéresis para el control u.

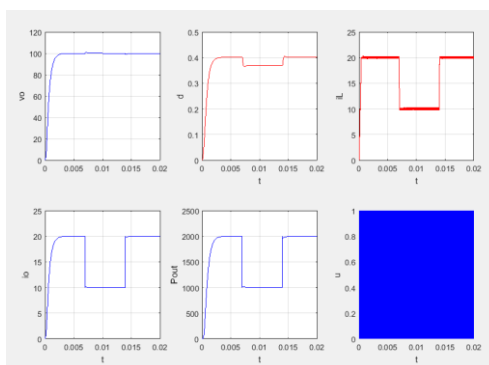


Figura 20. Respuesta del sistema con histéresis [0 0]

Del ancho de la histéresis depende el rizado de la corriente y el tiempo de conmutación del sistema, pero la dinámica media del sistema es la misma.

## 5. CONCLUSIÓN

Una de las características que hemos podido observar realizando un análisis al convertidor buck es que por su modo de control deslizante y las propiedades de robustez añadidas con las proporcionales  $K_p$  y  $K_i$  se concluye que estos sistemas presentan una respuesta que no falla ante una variación en la carga, más bien continúa suministrando la potencia requerida por la carga conectada al sistema.

Según la teoría del control en modo deslizamiento se ha podido analizar las variables de estado de un convertidor buck DC-DC para los cuales se obtuvieron sus dinámicas de sistema y las superficies sobre las cuales se conseguía que el sistema permanezca en modo deslizamiento.

El control por ancho de histéresis tiene efectos directos en la amplitud de rizado de la corriente en el inductor. Mantener el menor rizado de la corriente del inductor es decir reducir tanto como sea posible el valor del ancho de la histéresis permite tener una menor frecuencia de conmutación, lo cual queremos nos ayuda a reducir la frecuencia de carga y descarga del condensador, y por lo tanto a garantizar el periodo de vida útil de este aparato.

El programa Matlab-Simulink nos permite realizar esquemas modulares de convertidores y simular el comportamiento del sistema para analizar las respuestas obtenidas en cada parámetro, pudiendo así realizar tantos ensayos como sean necesarios para garantizar que los esquemas propuestos y los parámetros calculados tendrán el comportamiento deseado.

## REFERENCIAS

- F. Casellas, J. Esteban, F. Guinjoan, R. Piqué, H. Martínez, G. Velasco. “Simulación Mediante “Hardware In the Loop de un convertidor Buck”. Junio 2014 Disponible en <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/25122/P-IA-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García de Vicuña, Luis. (2018) “L2 Linear and Non-linear Control Design Techniques”, Universidad Politécnica de Cataluña, Sep. 2018.
- H. Guldemir. (2011). “Study of Sliding Mode Control of Dc-Dc Buck Converter”, Technical Education Faculty, University of Firat, Elazig, Turkey. Mar, 2011
- J. J. Slotine and T. S. Liu, “Applied Nonlinear Control,” Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.
- J. Espinoza, P. Ayala. “Diseño, simulación e implementación de un control por modo deslizante para un convertidor buck CD-CA”, Quito, Junio 2015 Disponible en <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8017/1/AC-EAC-ESPE-047670.pdf>
- R. Ramos, D. Biel, E. Fossas “Control en modo deslizante para un convertidor reductor multifase en entrelazado con ecualización de corriente. Barcelona, España. 2010
- Sanz, Ángel Borrell Controlador de histéresis de bajo Coste para convertidor buck Síncrono multifase. Junio 2012
- Salazar Calahorrano, Pablo (2013). Diseño e implementación de un Control por Modo Deslizante para un Convertidor Buck Boost DC/DC. Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control. ESPE. Sede Sangolquí