

## Diseño y simulación de un control en modo deslizante para convertidores con regulación de tensión y equalización de corriente

Design and simulation of a slider mode control for converters with voltage regulation and current equalization

Projeto e simulação de um controle deslizante para conversores com regulação de tensão e equalização de corrente

**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>

### RESUMEN

Actualmente los convertidores de potencia se encuentran en muchos sistemas eléctricos ya que son utilizados principalmente para la conversión y adecuación de la energía para alimentar eléctricamente a ciertos equipos que precisan un suministro de energía controlado. Es por esto que tanto las tipologías de los convertidores, así como los tipos de control que se pueden aplicar han sido muy estudiados en los últimos años, ensayando varios convertidores tanto de control de tensión como control de corriente para las diferentes aplicaciones de acuerdo a la respuesta presentada. Mediante la aplicación de modo de control por deslizamiento se ensayan el convertidor buck con regulación de tensión y equalización de corriente en diferentes fases, encontrando de forma analítica las variables que brindan robustez al sistema  $K_p$  y  $K_i$  (constante proporcional e integral). Se utiliza el programa Simulink de Matlab para la simulación del convertidor controlado por modos deslizantes probando la respuesta del sistema a variaciones de potencia de la carga conectada, analizando el comportamiento de las principales variables.

**Palabras clave / Descriptores:** Control modo deslizante, Convertidor multifase, equalización de corriente, regulación de tensión, simulación tiempo real.

### ABSTRACT

Currently, power converters are found in many electrical systems since they are mainly used for the conversion and adaptation of energy to electrically supply certain equipment that requires a controlled energy supply. This is why both the types of converters as well as the types of control that can be applied have been extensively studied in recent years, testing various converters for both voltage control and current control for different applications according to the response. Through the application of the slip control mode, the buck converter with voltage regulation and current equalization in different phases is tested, analytically finding the variables that provide robustness to the system  $K_p$  and  $K_i$  (proportional constant and integral). The Matlab Simulink program is used for the simulation of the converter controlled by sliding modes, testing the response of the system to power variations of the connected load, analyzing the behavior of the main variables.

**Keywords:** Sliding mode control, multiphase converter, current equalization, voltage regulation, real time simulation.

### RESUMO

Atualmente, os conversores de energia são encontrados em muitos sistemas elétricos, pois são utilizados principalmente para a conversão e adaptação de energia para alimentar eletricamente determinados equipamentos que requerem um fornecimento de energia controlado. É por isso que tanto os tipos de conversores, quanto os tipos de controle que podem ser aplicados, têm sido amplamente estudados nos últimos anos, testando vários conversores tanto para controle de tensão quanto para controle de corrente para diferentes aplicações de acordo com a resposta apresentada. Através da aplicação do modo de controle de escorregamento, é testado o conversor buck com regulação de tensão e equalização de corrente em diferentes fases, encontrando analiticamente as variáveis que conferem robustez ao sistema  $K_p$  e  $K_i$  (constante proporcional e integral). O programa Matlab Simulink é utilizado para a simulação do conversor controlado por modos deslizantes, testando a resposta do sistema às variações de potência da carga conectada, analisando o comportamento das principais variáveis.

**Palavras-chave / Descritores:** Controle deslizante, conversor multifásico, equalização de corrente, regulação de tensão, simulação em tempo real.

## 1. INTRODUCCIÓN

El control en modo deslizante nace del hecho que en este modo control los estados del sistema se fuerzan a deslizarse en un subespacio de estados llamado superficie de deslizamiento. (Mantz, 2020).

El diseño de un controlador en modo de deslizamiento se debe seguir cuatro pasos según Mantz, (2020) que van desde el modelado del sistema, la definición de la superficie de control, la elección de la lógica de conmutación y finalmente establecer el control para garantizar el ciclo de trabajo.

**Modelos del sistema.** Para diseñar un sistema de control de estructura variable se parte del modelo de estados que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x)\end{aligned}$$

Donde  $x$  representa las variables de estado,  $u$  la acción de control, e  $y$  la variable a ser controlada. Al reducir  $f(x, u)$  y  $h(x)$  a una combinación lineal de las variables de  $x$  y la acción de control se tiene lo siguiente,

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}$$

**Superficie de control.** En este paso se busca determinar la superficie de control sobre la cual la variable de estado conmutarán, deslizando alrededor de la misma.

$$s(x) = 0$$

**Lógica de conmutación.** Para debe seleccionar una lógica de conmutación que garantice las trayectorias de los estados alcancen la superficie sobre la que deslizan, asegurando la permanencia y evolución sobre esta superficie. Esto se puede expresar de la siguiente manera,

$$\begin{aligned}si \quad s(x) > 0 &\rightarrow u = u^+ \rightarrow \dot{x} = f(x, u^+) = f^+ \\ si \quad s(x) < 0 &\rightarrow u = u^- \rightarrow \dot{x} = f(x, u^-) = f^-\end{aligned}$$

Determinación del control discontinuo para garantizar un rango de trabajo. Los límites  $u^-$  y  $u^+$  deben elegirse en función de las especificaciones y la región de trabajo deseada.

Se pueden identificar dos regiones en el modo de control deslizante:

- El primero se encarga de generar una trayectoria de estado que intenta alcanzar la superficie de deslizamiento.
- En esta etapa se observa el comportamiento en la cual la trayectoria de estado se encuentra conmutando en el contorno de la superficie de deslizamiento.

## 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 mostrado en la figura 1, 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 de control toma el valor de 0 cuando el interruptor está en TOFF (Casellas, et al, 2014).

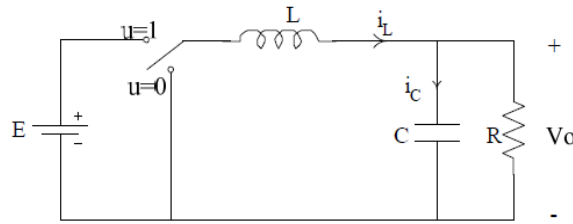


Figura.1 Esquema del Convertidor Buck

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).

## 2.2 Diseño del controlador en modo deslizante aplicado a convertidores buck en paralelo

La configuración de un convertidor reductor multifase se compone de la unión de varios convertidores Buck en las diferentes fases, estos convertidores tienen un capacitor común de salida y su conexión a la carga (Slotine, 1991).

Partiendo del esquema del convertidor Buck, para su funcionamiento en paralelo pues la configuración interna de cada convertidor es similar, como se muestra en la figura 2.

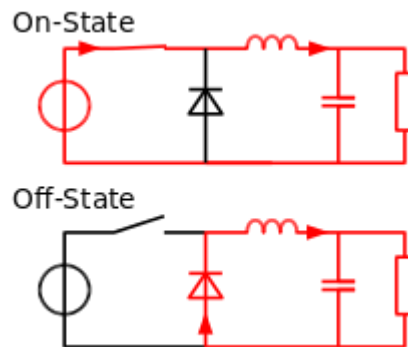


Figura 2. Estados del Convertidor Buck

Partimos de las mismas ecuaciones de estado mostradas en (1) y (2) de conducción y no conducción respectivamente.

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

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

Se realiza el análisis de tres convertidores en paralelo que se integran en el modelo para obtener una mejor regulación en el circuito.

Si derivamos (2) y reemplazamos en (1) tenemos que:

$$C \cdot \frac{d^2V_o}{dt^2} = 3 \frac{di_L}{dt} - \frac{dV_o}{dt} \frac{1}{R}$$

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

Si igualamos a cero esta expresión, se obtiene que

$$0 = \frac{3}{L}(V_{ref} - V_o) - \frac{di_L}{dt}$$

Puesto que  $\dot{S} = 0$ , se tiene que:

$$C \cdot \frac{d^2 V_o}{dt^2} + \left(\frac{1}{R} + 3 \cdot K_p\right) \frac{dV_o}{dt} + \frac{k}{L} V_o = \frac{3}{L}(V_{ref}) \quad (5)$$

Puesto que  $\dot{S} = 0$ , es decir la superficie de deslizamiento es igual a cero, se tiene que:

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

La condición para lograr robustez frente a cambios de carga es:

$$K_p \gg \frac{1}{3 * R}$$

Superficie de deslizamiento del convertidor buck.

$$\frac{V_o}{V_{ref}} = \frac{\frac{3}{L}}{Cs^2 + \left(\frac{1}{R} + 3 * K_p\right)s + \frac{3}{L}k} \quad (6)$$

$$\dot{S} = -K_p \frac{dV_o}{dt} + k_i(V_{ref} - V_o) - \frac{1}{L}[Eu^+ - V_o] > 0$$

Donde,

$$K_i = \frac{3}{L}k \quad (7)$$

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

$$K_p \gg \frac{1}{R} \rightarrow K_p \gg \frac{1}{5} \rightarrow K_p \gg 0.0667$$
$$K_p = 5$$

Y para la constante integral tomamos (7) y reemplazamos con los valores de diseño.

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

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 PROCEDIMIENTOS METODOLOGICOS

En este apartado se presentan la construcción del modelo del convertidor y el controlador por modo deslizante, con los diseños realizados se plantea el sistema para su simulación.

#### 3.1 Propuesta de un esquema Matlab-Simulink para simular el convertidor Buck conmutado con voltaje regula y eualización de corrientes.

En la figura 3 se observa la configuración del sistema propuesto, que incluye la integración en paralelo de tres convertidores para un sistema trifásico.

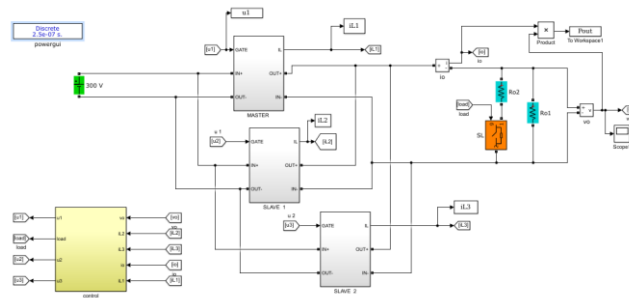


Figura 3. Esquema del sistema de convertidores buck en paralelo.

Para poder realizar el control del convertidor se propone el diseño de un control master, tal como se representa en la figura 4.

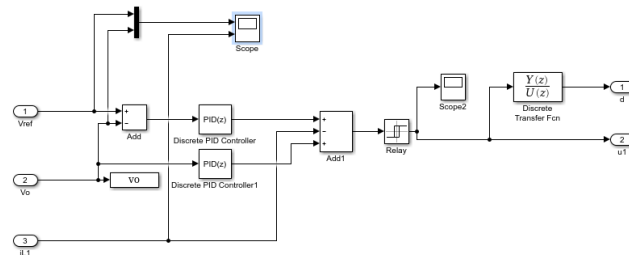


Figura 4. Diseño del control del master 1

Para la simulación de los convertidores reductores se tiene el modelo presentado en la figura 5, con lo bloques del esquema.

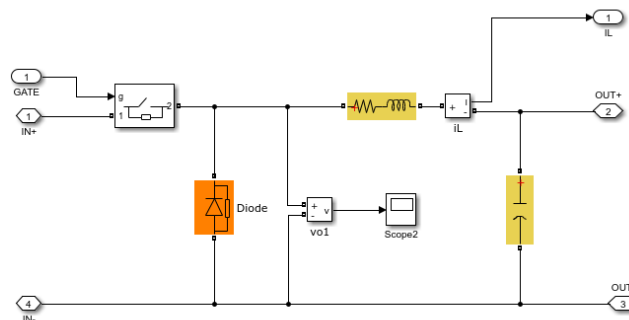


Figura 5. Esquema del convertidor buck.

Al realizar se obtienen los parámetros de corriente en el inductor ( $i_L$ ), corriente de salida ( $i_o$ ), voltaje de salida ( $V_o$ ), potencia de salida a la carga ( $P_{out}$ ) y el ciclo de trabajo  $d$ , mismo que se muestran en la sección siguiente.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Simulación y resultados

En las figuras 6 y 7 se observan el ciclo de trabajo y la corriente en los inductores de cada uno de los convertidores respectivamente.

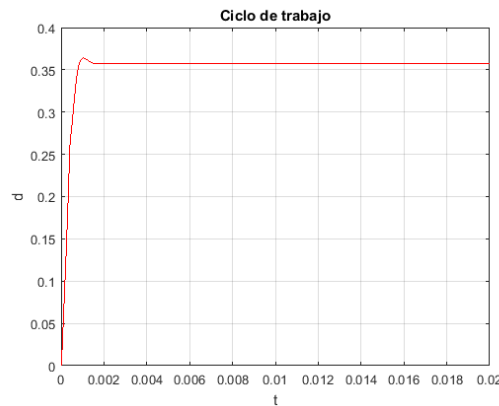


Figura 6. Ciclo de trabajo del convertidor buck en paralelo (d).

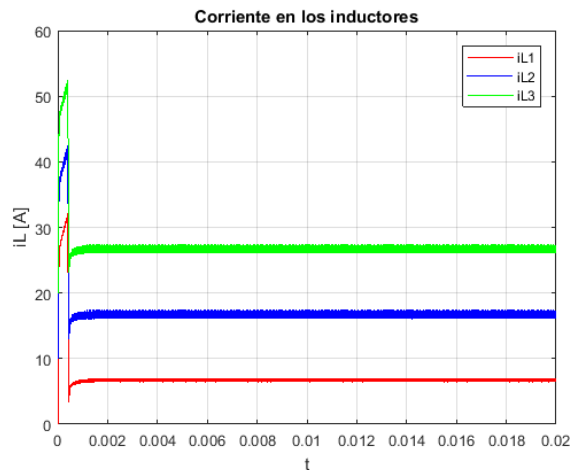


Figura 7. Corriente en el inductor de cada convertidor.

Para los parámetros de salida, como voltaje, corriente y potencia estos se representan en las figuras 8, 9 y 10, de forma análoga en todas estas gráficas se observa que antes de estabilizarse los parámetros de tensión y corriente tienen un pico antes de lograr un valor estable.

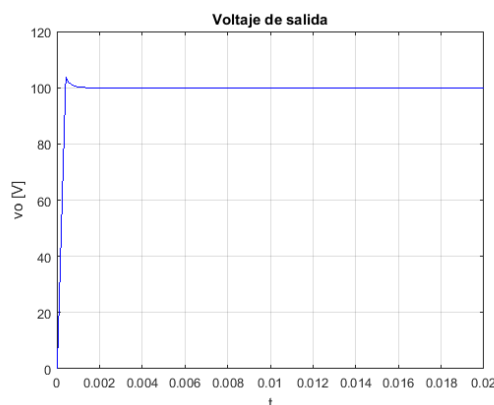


Figura 8. Voltaje de salida a la carga ( $V_o$ ).

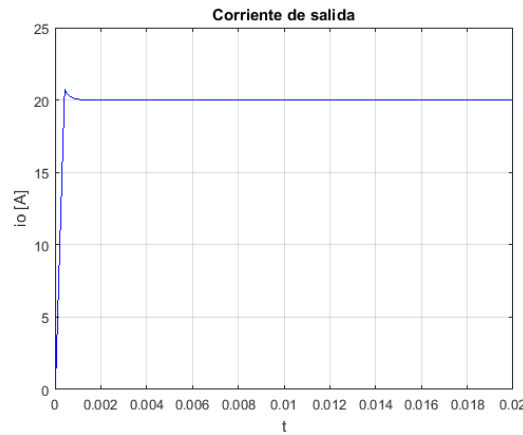


Figura 9. Corriente de salida a la carga ( $i_o$ )

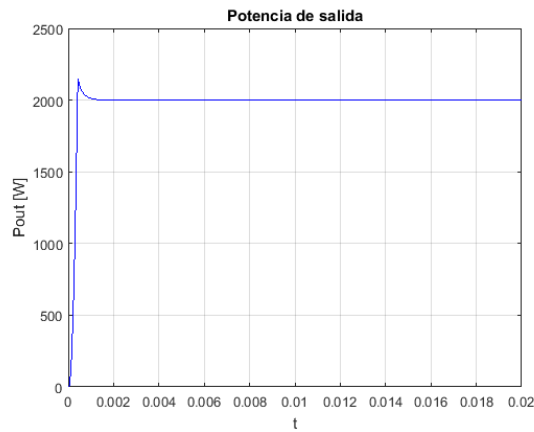


Figura 10. Potencia de salida a la carga ( $P_{out}$ ).

#### 4.2 Respuesta transitoria con carga variable

En esta sección se muestra el comportamiento de la dinámica del Sistema y la superficie de deslizamiento seleccionada cuando la carga presenta variaciones que aumenta su potencia desde 1000W a 2000W en un instante de tiempo. Se representan los parámetros de voltaje de salida  $V_o$ , corriente de salida  $i_o$ , potencia de salida  $P_{out}$ , corriente en el inductor  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L3}$ , y el ciclo de trabajo para el convertidor maestro  $d_1$ .

Tal como se explico en el apartado anterior 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.

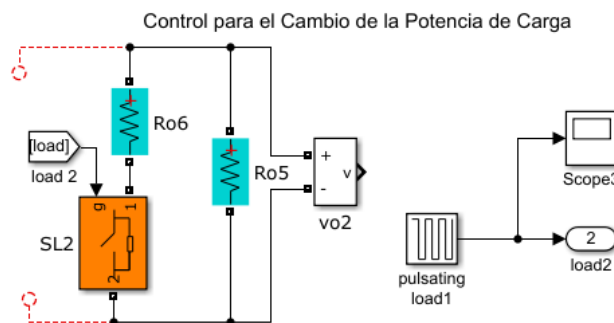


Figura 11. Esquema del control para cambio de carga.

Mediante el esquema de control se genera 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 la potencia de salida que se suministra a carga conectada al convertidor de potencia.

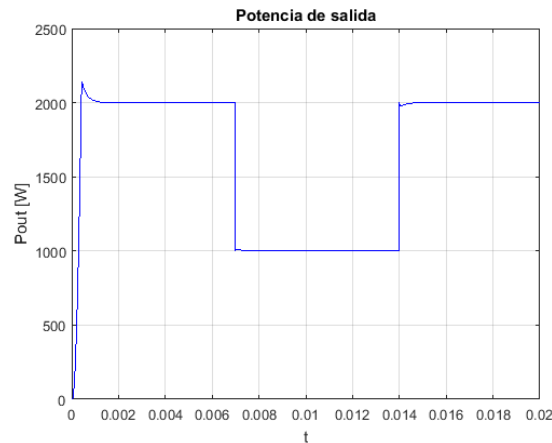


Figura. 12 Potencia de salida con variación de la carga (Pout).

En las figuras 13 y 14 se observa el cambio de potencia de la carga y como afectan los parámetros de voltaje y corriente de salida.

En el voltaje de salida en los instantes de cambio de carga se presentan variaciones de valor despreciable por lo que el mantiene constante el voltaje de salida, con respecto a la corriente se observa que en la gráfica que esta modifica su valor conforme a la potencia que requiere la carga.

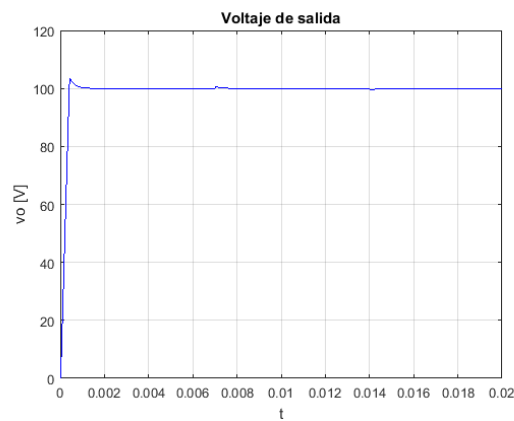


Figura 13. Voltaje de salida con variación en la carga.

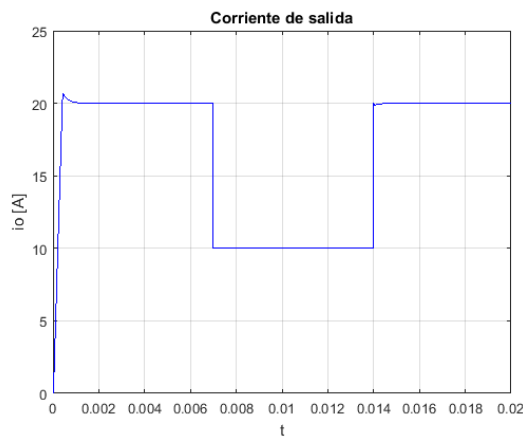


Figura 14. Corriente de salida variación de la carga (io).



En la misma línea se representa la señal del ciclo de trabajo del controlador, por medio del cual se logra mantener el voltaje de salida constante, en la figura 15 se observa el ciclo de trabajo cuando la carga presenta una variación forzando a variar la potencia entregada.

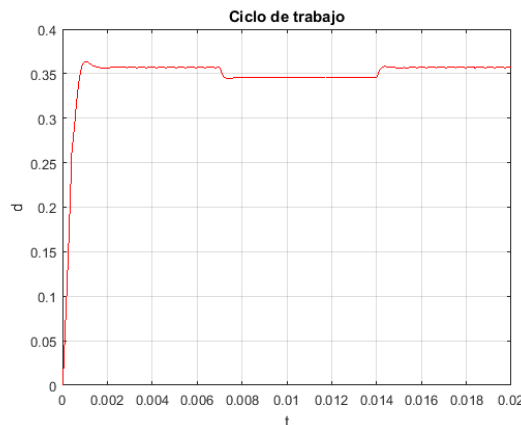


Figura 15. Ciclo de trabajo con variación en la carga.

Finalmente, en la figura 16 se observa la corriente en los inductores de salida de los convertidores conectados en paralelo que tiene una trayectoria similar, con un rizado de la señal de corriente entorno al valor promedio una que alcanzan un valor establece luego del pico de corriente de arranque que se produce en esta tipología.

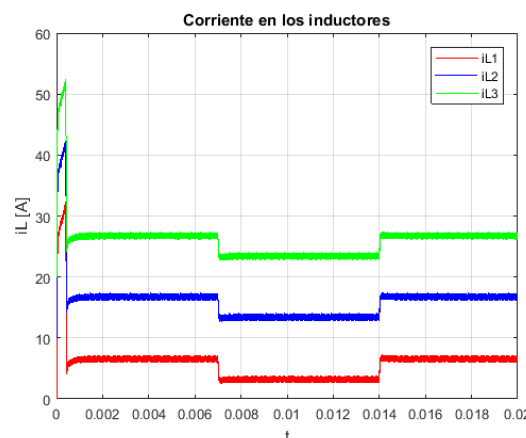


Figura 16. Corriente en los inductores de los convertidores buck en paralelo con una variación en la carga.

### 4.3 Respuesta transitoria en condición de falla

A continuación, se prueba la configuración del convertidor simulando una falla en unos de los convertidores, para analizar el comportamiento de los parámetros principales de salida y el grado de robustez del control en modo deslizante.

En la figura 17 observamos un el comportamiento del circuito funcionando en condición normal. Para poder analizar el comportamiento en condición de falla simulamos la salida de servicio de uno de los convertidores desconectándolo del circuito para estudiar la respuesta del sistema.

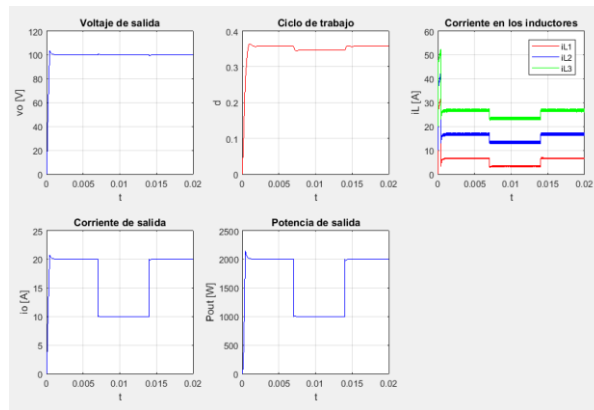


Figura 17. Comportamiento del sistema con convertidores buck en paralelo.

Tal como se observa en la figura 18, vemos las variables que permanecen constantes, solo las corrientes en los inductores de los convertidores que quedan en servicio aumentan su módulo para cubrir la corriente del convertidor en falla.

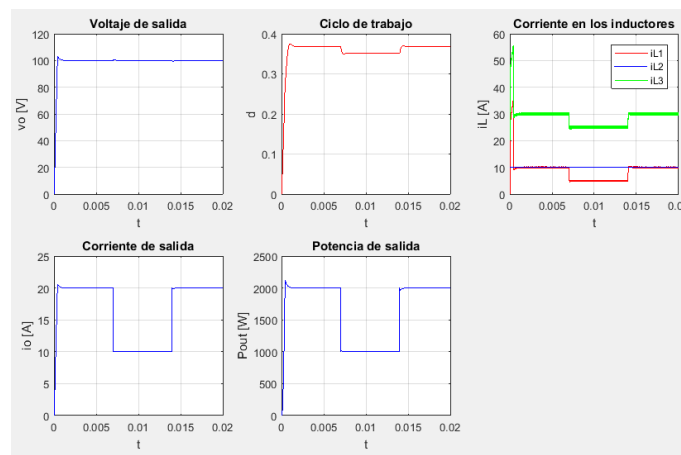


Figura 18. Comportamiento del sistema con un convertidor en falla.

Esta característica es una de las características principales que hacen que la configuración presentada y el control en modo deslizante para convertidores de tensión constante sea muy confiable puesto que en condición de falla de alguno de los dispositivos convertidores no se interrumpe el suministro de la potencia requerida por la carga conectada, tal como se observa en la figura 19.

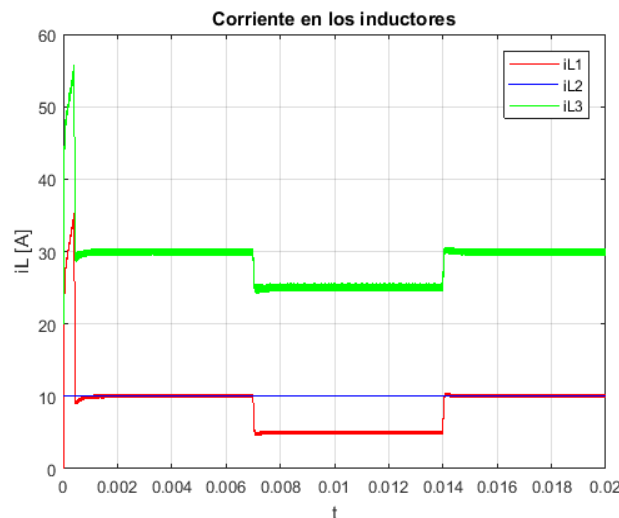


Figura 19. Corriente en los inductores del circuito cuando un convertidor falla.

#### 4.4 Modificación del ancho de histéresis en el controlador

En la figura 20 se representa la dinámica del sistema en cuanto a las corrientes en los inductores al modificar la banda de histéresis en el controlador del master y en los esclavos, establecido sus valores de  $[\text{eps} - \text{eps}]$ .

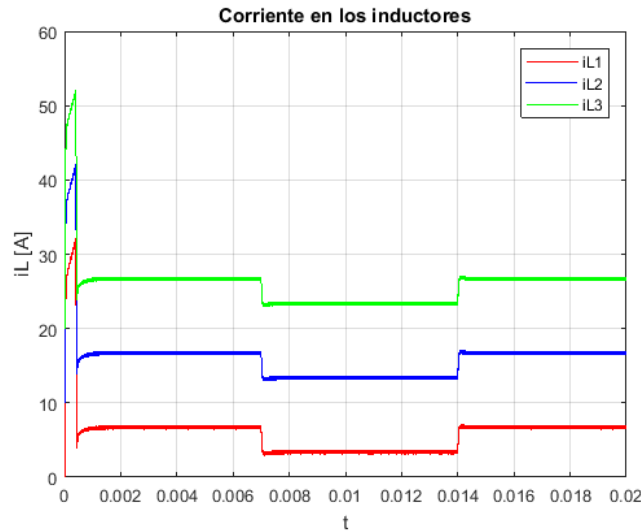


Figura 20. Corriente en los inductores del circuito con un ancho de histéresis  $[\text{eps} - \text{eps}]$

Si modificamos la banda de la histéresis en el control del esclavo 1 y esclavo 2 a valores de 0.3 y -0.3, el efecto del rizado en la corriente de los inductores se hace mucho más pronunciado, tal como se observa en la figura 21.

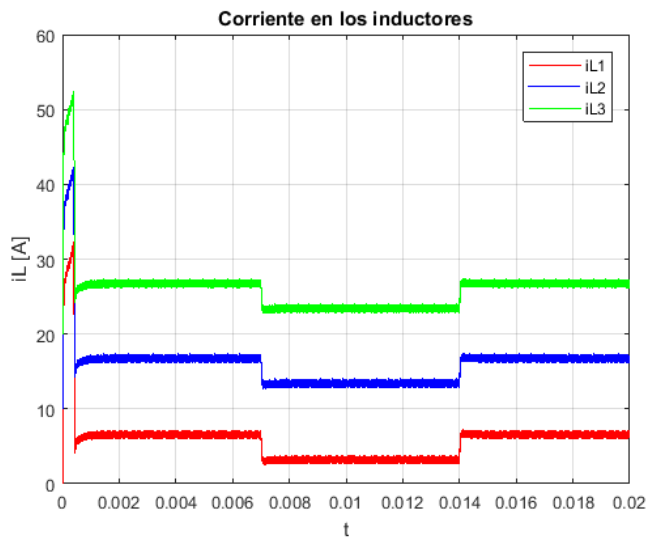


Figura 21. Corriente en los inductores del circuito con un ancho de histéresis  $[0.3 - 0.3]$  en los esclavos.

Finalmente, si cambiamos la histéresis a valores de 1 y -1, tanto en el controlador master como en los esclavos tendremos el resultado mostrado en la figura 22, concluyendo que el rizado de la corriente en el inductor depende del ancho de banda de la histéresis y de la frecuencia de conmutación.

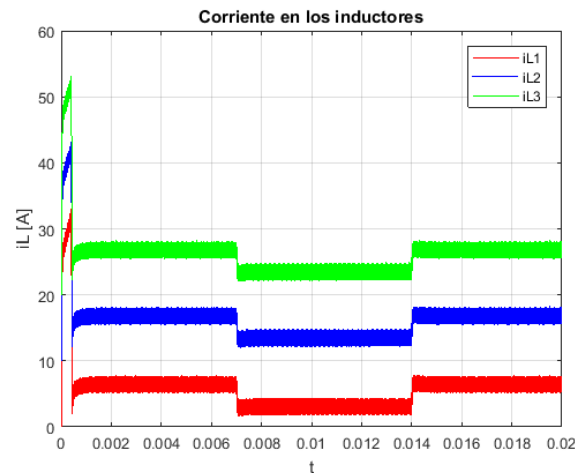


Figura 22. Corriente en los inductores del circuito con un ancho de histéresis [1 -1].

## 5. CONCLUSIÓN

Se ha realizado el diseño de un controlador en modo deslizante para un convertidor multifase, que se obtiene con una configuración de convertidores buck conectados en paralelo para un sistema multifase. Resultado del análisis de las variables de estado se estableció la superficie de deslizamiento la cual se debe alcanzar para mantener un control por modo deslizante.

Para obtener un control más robusto se le añaden constantes proporcionales e integrales  $k_p$  y  $k_i$  respectivamente para mejorar la respuesta de la dinámica del sistema frente a las variaciones de potencia experimentada por variaciones en la carga.

Los convertidores que incorporan ecualización de corriente son empleados para garantizar que las corrientes de cada uno de los convertidores buck no presenten diferencias en su salida debido a los componentes utilizados.

## 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, Elazığ, Turkey. Mar, 2011
- 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>
- J. J. Slotine and T. S. Liu, "Applied Nonlinear Control," Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.
- Mantz, Ricardo Julián (2020). Control por Modos Deslizantes, Tomo 1. Modos deslizantes de primer orden: Fundamentos y aplicaciones. Argentina, 2020. Disponible en: [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/119828/Documento\\_completo.%20Control%20por%20Modos%20deslizantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/119828/Documento_completo.%20Control%20por%20Modos%20deslizantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- R. Ramos, D. Biel, E. Fossas "Control en modo deslizante para un convertidor reductor multifase en entrelazado con ecualización de corriente. Barcelona, España. 2010
- 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
- Sanz, Ángel Borrell Controlador de histéresis de bajo Coste para convertidor buck Síncrono multifase. Junio 2012