

# DISEÑO DE CONVERTIDORES DC-DC TIPO BUCK TÍPICOS Y CONTROLADO PARA UN MEJOR ENTENDIMIENTO EN CUANTO A SU FUNCIONAMIENTO.

Jhon Alexander Díaz Acevedo  
Estudiante De IX Semestre  
Universidad de Cundinamarca  
Facultad de Ingeniería Electrónica  
jade7700@gmail.com

*Resumen: En el presente documento se presenta el desarrollo de una serie de ejercicios que ayudaran a quienes están empezando a trabajar con convertidores reductores, el proceso se divido en tres partes escanciales que ayudaran a dar un entendimiento claro del funcionamiento de estos dispositivos, la primera se basa en el diseño de un convertidor que cumpla con unas determinadas especificaciones de diseño, la segunda parte es muy similar a la primera pero ya siendo convertidor controlado lo cual implica el diseño de una etapa de control, y para finalizar se tomara en cuenta un planteamiento en donde se realizaran unas pequeñas variaciones en las cuales se podrá estudiar el funcionamiento en modo continuo y discontinuo.*

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los temas importantes en el área de potencia son las fuentes de alimentación conmutadas y una de sus configuraciones básicas es el convertidor reductor Buck, sin embargo el análisis y diseño de estos circuitos muchas veces cuando se esta empezando resulta complicado, sin embargo si se realiza un análisis detallado y se explica de manera clara, analizar y diseñar estos circuitos se convierte en algo muy elemental y fácil de realizar. Otro punto clave en el diseño es saber elegir los elementos adecuados para cuando se valla a implementar ya que se deben tener en cuenta las corrientes y tensiones nominales que deben soportar los dispositivos, si no se presta atención a esto dentro del diseño al momento de la implementación ocurrirán daños muy graves.

Uno de los criterios más importantes en las aplicaciones de los convertidores es la etapa de control ya que esta garantiza el valor deseado de voltaje a la salida sin importar las perturbaciones (cambios de la potencia en la carga, cambios en el voltaje de entrada), gracias a esta etapa es que se conoce a estos dispositivos como convertidores regulados o controlados, por otro lado hay que tener en cuenta el modo de funcionamiento, es decir modo continuo y discontinuo ya que de esto depende la linealidad o no linealidad del sistema y de esto depende la etapa de control a implementar, por consiguiente lo mas adecuado es tratar de trabajar en el modo continuo (para el caso del convertidor Buck ya que es lineal) porque se puede trabajar con un control convencional, si se llegase a presentar el otro caso se tendría que

diseñar una estrategia de control mas complicada como lo es el control difuso, control predictivo, por redes neuronales, en fin procesos de control de mayor complejidad.

## II. DISEÑO DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA TIPICO

Para el diseño de este convertidor se tendrá en cuenta el siguiente planteamiento: Diseñar un conversor de potencia de manera que la tensión de salida sea de 28V cuando la entrada sea de 48V. La carga consume una potencia de 28.8W y la corriente de la bobina es permanente. El rizado de la tensión de salida no deberá superar el 0.5%. Especifique la frecuencia de conmutación de trabajo, el valor de cada uno de los elementos (C y L), los valores de tensiones e intensidades nominales que deben soportar los componentes electrónicos del circuito, las características que debe tener la bobina (tipo de núcleo, dimensiones del núcleo, calibre del alambre, numero de vueltas, etc). Emplee la herramienta SIMPOWER de Matlab para realizar la simulación del sistema y corroborar que el diseño cumple con las especificaciones.

### A) Diseño del convertidor

Para empezar se definirá una frecuencia de conmutación de 20KHz ya que esta frecuencia no tiene que ser ni muy baja ni muy elevada, con el fin de

que el sistema trabaje rápido pero que no se tengan muchas pérdidas en la potencia que afecten la eficiencia, ya que a mayor frecuencia de conmutación los transistores presentan una menor eficiencia.

Ahora se utilizan las ecuaciones generales para el diseño de este tipo de convertidores [1], las cuales se presentan a continuación:

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (1)$$

$$R = \frac{V_o^2}{P_{carga}} \quad (2)$$

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (3)$$

$$L = L_{\min} \cdot 1.25 \quad (4)$$

$$C = \frac{1-D}{8Lf^2 \frac{\Delta V_o}{V_o}} \quad (5)$$

$$I_{L\min} = V_o \left( \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right) \quad (6)$$

$$I_{L\max} = V_o \left( \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right) \quad (7)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (8)$$

De esta manera se prosigue al cálculo del diseño ideal haciendo uso de estas ecuaciones.

$$D = \frac{28V}{48V} = 0.583 \quad (9)$$

$$R = \frac{(28V)^2}{28.8W} = 27.2\Omega \quad (10)$$

$$L_{\min} = \frac{(1-0.583)27.2\Omega}{2 \cdot 20KHz} = 283.5\mu H \quad (11)$$

$$L = 283.5\mu H \cdot 1.25 = 354.37\mu H \quad (12)$$

$$C = \frac{1-0.583}{8 \cdot 354.37\mu H \cdot 20KHz^2 \cdot 0.005} = 73.54\mu F \quad (13)$$

De esta manera se tiene el diseño básico del convertidor sin embargo falta determinar el valor de la corriente mínima de la inductancia para determinar si esta en régimen permanente, así mismo la corriente máxima del mismo y la corriente de salida para realizar los respectivos análisis y corroboración de los resultados con MatLab. Los valores se hallan mediante (6), (7) y (8).

$$I_{L\min} = 28 \left( \frac{1}{27.2} - \frac{(1-0.583)}{2 \cdot 354.37\mu H \cdot 20KHz} \right) \quad (14)$$

$$I_{L\min} = 0.2A$$

$$I_{L\max} = 28 \left( \frac{1}{27.2} + \frac{(1-0.583)}{2 \cdot 354.37\mu H \cdot 20KHz} \right) \quad (15)$$

$$I_{L\max} = 1.85A$$

$$I_o = \frac{28V}{27.2\Omega} = 1.02A \quad (16)$$

Como se puede ver en (14) la corriente mínima es superior a cero por consiguiente su funcionamiento es en modo continuo ya que la corriente en la bobina es permanente. De esta manera se tienen los valores de corrientes y tensiones necesarios para su respectiva comprobación en MatLab posteriormente.

El siguiente paso para el diseño es determinar los valores nominales de cada uno de los elementos con el fin de identificar que valores de tensión y corriente deben soportar.

*NOTA: Por cuestiones prácticas no se realizaron las gráficas resultantes de los análisis matemático las cuales son esenciales para determinar algunos de los valores nominales, sin embargo de los resultados que se obtienen en MatLab se pueden determinar las funciones.*

Primero se determinara la corriente de la inductancia de la siguiente manera:  
Para hallar el valor eficaz o rms se pueden utilizar dos métodos, el primero es por medio de la integral como se ve a continuación:

$$I_{Lrms} = \sqrt{\frac{1}{50\mu s} \left[ \int_0^{29.15\mu s} (56896.5t + 0.2)^2 dt + \int_{19.15\mu s}^{50\mu s} (-78571.4t + 4.128)^2 dt \right]} \quad (17)$$

$$= 1.125A$$

También se puede hallar fácilmente haciendo uso de los valores que ya se poseen, sin embargo cabe resaltar que este método únicamente funciona cuando la señal es un triángulo como lo es este caso.

$$I_{Lrms} = \sqrt{I_L^2 + \left( \frac{\Delta I_L / 2}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (18)$$

En donde  $I_L = I_o$  y  $\Delta I_L$  esta das por:

$$\Delta I_L = \frac{(V_s - V_o)D}{fL} \quad (19)$$

Remplazando (8) y (19) en (18) se tiene:

$$I_{Lrms} = \sqrt{1.02^2 + \left( \frac{1.645/2}{\sqrt{3}} \right)^2} = 1.125A \quad (20)$$

Como se puede ver el resultado de (17) y (20) es el mismo por consiguiente el planteamiento es valido, de acuerdo a esto se prosigue a hallar los valores de voltaje así:

$$V_{Lrms} = \sqrt{\frac{1}{50\mu s} \left[ \int_0^{29.15\mu s} 20^2 dt + \int_{19.15\mu s}^{50\mu s} -28^2 dt \right]} \quad (21)$$

$$= 23.667V$$

Sin embargo la tensión de la bobina cuando el interruptor esta abierto es  $V_o=28V$  por consiguiente este es el voltaje que debe soportar.

Para el caso del capacitor el voltaje que debe soportar este elemento es el voltaje de salida es decir 28V y la corriente esta dada por:

$$I_{Crms} = \frac{I_{Cpico}}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

En donde:

$$I_{Cpico} = \frac{\Delta I_L}{2} \quad (23)$$

Por consiguiente remplazando (23) y (19) en (23)

$$I_{Crms} = \frac{0.822}{\sqrt{3}} = 0.475 \quad (24)$$

Por ultimo el voltaje que deben soportar el transistor y el diodo es el voltaje de entrada, es decir 48V, y la corriente de cada elemento esta dada por:

$$I_{Qrms} = \sqrt{\frac{1}{50\mu s} \int_0^{29.15\mu s} (56896.5t + 0.2)^2 dt} \quad (25)$$

$$= 0.86A$$

$$I_{Drms} = \sqrt{\frac{1}{50\mu s} \int_{29.15\mu s}^{50\mu s} (-78571.4t + 4.128)^2 dt} \quad (26)$$

$$= 0.72A$$

De esta manera concluye el diseño como tal del este convertidor típico tipo Buck, sin embargo uno de los criterios mas importantes es el diseño de la bobina ya que esta la tiene que crear el diseñador debido a que lo mas probable es que no se consiga comercialmente debido a sus características, por consiguiente a continuación se describe el procedimiento para calcular una bobina toroide que son las que se utilizan en este tipo de aplicaciones.

La ecuación general para determinar el número de vueltas de una bobina tipo toroide esta dada por:

$$N = \sqrt{\frac{L}{0.0002 \cdot \mu_r \cdot h \cdot \ln \left( \frac{d_{ext}}{d_{int}} \right)}} \quad (27)$$

En donde se debe tener en cuenta lo expresado en la siguiente figura:

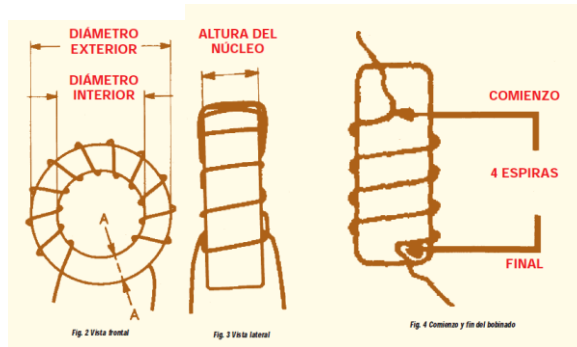


Figura 1. Dimensiones de una bobina tipo toroide

De esta manera se tomaron los siguientes valores:

Datos	abreviatura	valor
Permeabilidad Relativa (ferrita)	ur	10
Altura	h(mm)	5
Diámetro Exterior	dext(mm)	21
Diámetro Interior	dint	12
inductancia	L (uH)	354,37

Tabla 1. Datos de los elementos utilizados para el cálculo del número de vueltas.

Haciendo uso de la ecuación (27) y de la tabla 1 se obtuvo que el número de vueltas para esta bobina es de 251.64 vueltas es decir  $N=252$ .

Para dar por finalizado el diseño del convertidor y proseguir con la comprobación en MatLab se debe determinar el calibre del alambre ya que de este depende la corriente que pueda soportar la bobina que es la se halla en (17) o (20). Para ello se debe determinar la sección del núcleo y dependiendo de esto se observa en la tabla general de características para el cálculo de transformadores el calibre del alambre como se muestra a continuación:

$$S = \frac{I_{Lrms}}{D} \quad (28)$$

En donde D es un valor que puede variar entre 2.5 y 3 A/mm<sup>2</sup> de acuerdo a esto se tiene que la sección del núcleo es:

$$S = \frac{1.2A}{2.5A/mm^2} = 0.48 \quad (29)$$

Se tomó 1.2 para que la bobina soportara un poco más de la corriente requerida, de esta manera observando la tabla de características del diseño de transformadores (se puede buscar en internet) se obtuvo que se debe utilizar un alambre de calibre **AWG20**.

#### B) Simulación en MatLab

Primero que todo hay que definir el bloque o conexiones de bloques que va a simular el convertidor tipo BUCK para así realizar las respectivas pruebas que serán comparadas con los resultados obtenidos matemáticamente, el diagrama de conexiones se puede observar en el anexo A, figura 2.

Una vez implementada la simulación se prosigue primero que todo a comprobar si la salida de convertidos está suministrando el voltaje calculado, que en este caso es  $V_o=28V$ , aunque en la figura 2 está el resultado en el “display”, a continuación se muestra la señal de salida para poder observar su comportamiento.

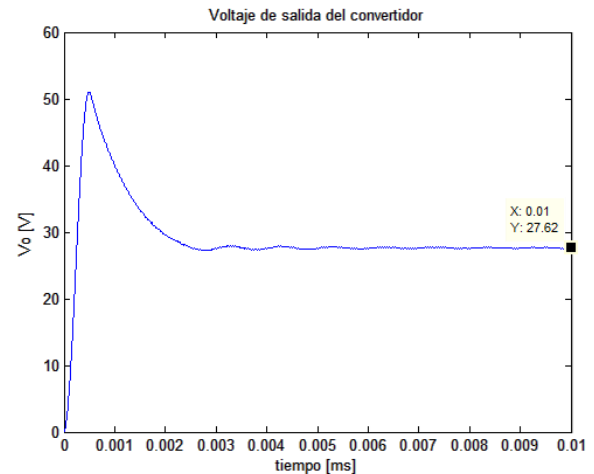


Figura 3. Señal de salida del convertidor

Como se puede observar en la figura anterior, la salida del convertidor es de 27.62V lo cual es muy aproximado a lo calculado, esto indica que por el momento el planteamiento matemático fue el correcto, sin embargo todavía falta evaluar varias cosas, una de ellas es el rizado del voltaje, lo cual es una de las cosas que solo se puede saber con la simulación, a continuación en la figura 3 se muestra un segmento de la señal de voltaje con la cual se determinará el rizado

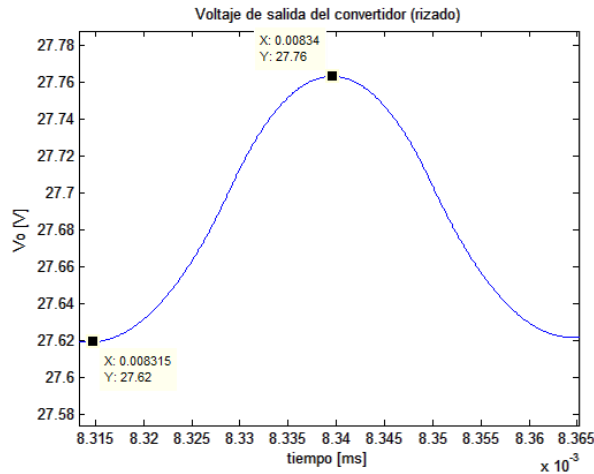


Figura 4. Segmento de la señal de voltaje

Como se puede ver en la figura  $V_{max} = 27.76$  y  $V_{min} = 27.62$  lo cual indica que el rizado es de  $27.76 - 27.6 = 0.14$  y el 0.5% de 28 es 0.14, lo cual indica que el rizado es el indicado. Hasta aquí todo va bien, la última prueba es de las señales de voltaje y corriente de los elementos de las cuales se realizaron los cálculos matemáticos anteriormente, si el convertidor quedó bien diseñado, las gráficas que se obtienen de MatLab tienen que ser iguales (o bueno muy aproximadas). En la figura 5 (ver anexo B) se muestran las señales obtenidas por medio del “escopo” así como se ve en la figura 2. En la figura 5 se puede observar que los resultados obtenidos mediante la simulación son exactamente los mismos que los realizados mediante los cálculos matemáticos. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede afirmar que el diseño del convertidor tipo BUCK es el correcto o que se ha diseñado bien el convertidor.

### III. DISEÑO DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA CONTROLADO

#### A) Diseño del convertidor

El desarrollo de esta parte es muy similar al anterior solo que hay que tener en cuenta ciertas consideraciones, sin embargo el análisis matemático es el mismo, lo único que se agrega es la etapa de control así como se muestra en el anexo C, figura 6. Teniendo claro lo anterior para este caso se tiene el siguiente planteamiento:

Diseñe un convertidor reductor en modo continuo que mantenga un voltaje de salida regulado de 20V con un nivel de tensión de rizado no mayor al 0.5% cuando la tensión de entrada es de  $55V \pm 10\%$  y la carga varía entre 75 y 125W asuma una frecuencia de conmutación de 20KHz. Especifique el valor de los

niveles de tensión y corrientes que debe soportar cada uno de los elementos, las características de la bobina. Simule el circuito obtenido en SIMPOWER de Matlab. Y Diseñe y simule una estrategia de Control que garantice regulación de voltaje ante variaciones de la tensión de entrada y la carga.

Para realizar los cálculos de la primera parte de diseño al igual que el caso anterior se utilizan las ecuaciones de (1) a (8), sin embargo se debe garantizar que para cualquier cambio en los valores, es decir entre  $\pm 10\%$  del voltaje de entrada y la variación de potencia a la salida, de acuerdo a las variedades de ejercicios realizados, se puede llegar a una manera sencilla de calcular los elementos sin tener que realizar 4 cálculos y de acuerdo a esos determinar cual es la inductancia que me garantice el funcionamiento en corriente permanente. De acuerdo a lo anterior, para garantizar que el sistema trabaje en modo continuo o corriente permanente se trabaja con  $55V + 10\%$  y la potencia mínima, de esta manera se tienen los siguientes valores:

$$D = 0.33 \quad (30)$$

$$R = 5.3\Omega \quad (31)$$

$$L = 110.9\mu H \quad (32)$$

$$C = 377.59\mu F \quad (33)$$

$$I_{Lmin} = 0.75A \quad (34)$$

$$I_{Lmax} = 6.79A \quad (35)$$

$$I_o = 3.77A \quad (36)$$

Ahora se prosigue a calcular los valores nominales al igual que en el caso anterior de la siguiente manera:

- para la inductancia

$$I_L = 3.77A \quad (37)$$

$$I_{Lrms} = 4.15A \quad (38)$$

$$V_L = 0V \quad (39)$$

Y el voltaje RMS por medio de la integral da 29.9184V, sin embargo cuando el interruptor

(transistor) esta cerrado la tensión en L es 40.5V por consiguiente este es el voltaje que debe soportar.

- para el capacitor

El voltaje que debe soportar es  $V_o=20V$  y la corriente esta dada por:

$$I_{Crms} = 1.74A \quad (40)$$

- para el diodo y el transistor

El voltaje que debe soportar tanto el diodo como el transistor es de  $V_s=60.5V$  y la corriente es la siguiente:

$$I_{Qrms} = \sqrt{\frac{1}{50\mu s} \int_0^{19.96\mu s} (302605.21t + 0.75)^2 dt} \quad (41)$$

$$= 2.624A$$

$$I_{Drms} = \sqrt{\frac{1}{50\mu s} \int_{19.96\mu s}^{50\mu s} (-201065.24t + 10.8)^2 dt} \quad (42)$$

$$= 3.2173A$$

De esta manera se puede proseguir al calculo de la bobina al igual que se hizo en el apartado anterior, para este caso se tomaran los mismo valores lo único que cambia es la inductancia, de esta manera se tiene que el numero de vueltas es  $N=141$ , y el calibre del alambre es **AWG14**. De esta manera concluiría el diseño del convertidor, el siguiente paso es el diseño del controlador.

### B) Diseño del controlador

Generalmente en el diseño de estas etapas se puede utilizar la función de transferencia general de un convertidor tipo Buck [3] que esta dada por:

$$G(s) = \frac{1/LC}{s^2 + 1/RC s + 1/LC} \quad (43)$$

Sin embargo al comparar la señal de salida ante un escalón de la misma magnitud del voltaje de entrada del convertidor, su respuesta era muy diferente a la obtenida mediante el convertidor, por consiguiente no se trabajo con dicha función de transferencia y se empezó a trabajar directamente con el circuito.

Al empezar a trabajar con el circuito uno de los sistemas mas utilizados son los controladores PI, sin embargo debido a la naturaleza del sistema la acción proporcional ocasionaba grandes sobre picos casi del 100% un error en estado estacionario aunque muy pequeño pero se estabilizaba mucho mas rápido esto se puede observar en la figura 7, por consiguiente se decidió utilizar un controlador netamente proporcional debido a que un sobre pico de esta magnitud dañaría cualquier actuador, de esta manera la ganancia proporcional fue de 20 que es el mismo valor deseado del sistema o SetPoint esto de acuerdo a [2] en el cual utiliza este criterio, pero puede ser ajustada para ajustar la respuesta del sistema.

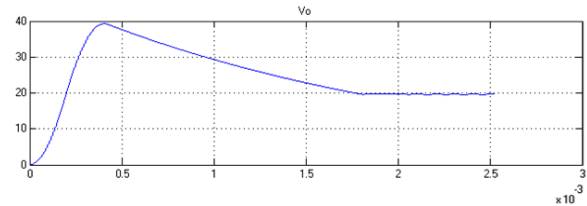


Figura 7. Salida del convertidor haciendo uso de un controlador PI.

### C) Simulación en MatLab

Al igual que en la primera parte se realizara el análisis en lazo abierto, pero para este ejercicio también hay que realizar las pruebas que determinan que el convertidor opera en modo continuo ante los cambios de voltaje de entrada y la potencia de salida. El diagrama es el mismo que se utilizo en la primera parte (figura 2). A continuación se muestra la señal de salida del voltaje.

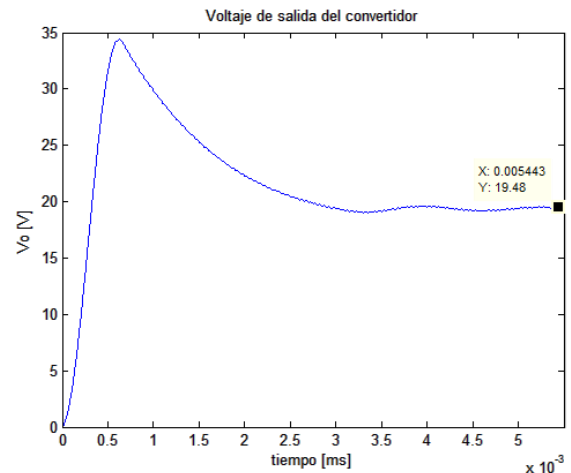


Figura 8. Señal de salida del convertidor

Como se puede observar la salida es de 19.48 V lo cual es muy aproximado a los 20V ahora se proseguirá a determinar el rizado de esta señal.

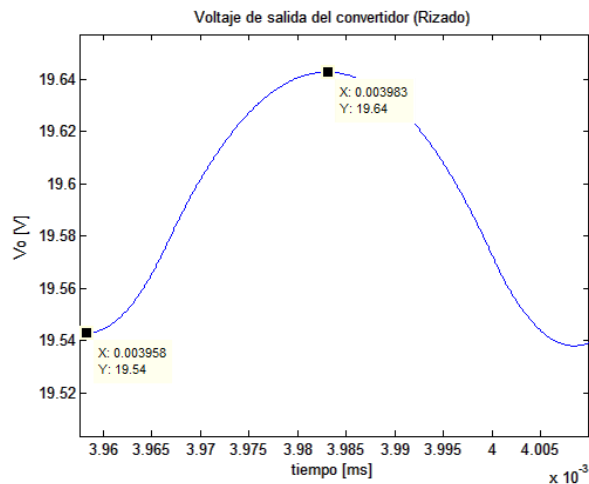


Figura 9. Segmento de la señal de voltaje

En la figura 8 se observa un segmento de la señal del voltaje la cual tiene los siguientes valores:  $V_{max} = 19.64V$   $V_{min} = 19.54V$  por consiguiente el rizado es de  $19.64V - 19.54V = 0.1V$  lo cual concuerda con el rizado que se especifico en los cálculos ya que  $20V \cdot 0.005 = 0.1V$ . Ahora se prosigue observar las señales de salida de los elementos, al igual que en la primera parte los resultados de la simulación son los mismos que los obtenidos matemáticamente (ver figura 10, Anexo D), por consiguiente hasta aquí el diseño se realizó correctamente, sin embargo falta saber si el sistema funciona de forma continua ante los cambios del voltaje de entrada y la potencia a la salida.

Las graficas anteriores se tomaron con un voltaje de entrada de  $60.5V$  y una resistencia de  $5.3\Omega$  ( $75W$ ), para saber si el convertidor opera en modo continuo ante los cambios que especificaba el ejercicio, se aran las siguientes pruebas:

- Se dejara el mismo voltaje y se aumentara la potencia al máximo ( $125W$ ) ( $R = 3.2\Omega$ ) con ello se observara la corriente en la capacitancia ya que con ella se puede identificar si el sistema esta actuando en modo continuo o discontinuo, también se observara la salida que tiene que ser de  $20V$  y la corriente de salida para observar como se comporta ante este cambio.

Como se puede observar en la figura 11, ante un aumento de potencia el sistema tiende a aumentar la corriente debido a que la carga le exige mas, este es un comportamiento muy tipo en la fuente controladas (agregando la etapa de control el voltaje de salida tiene que ser el estipulado sin emportar la carga), ya que estas a medida que se le exige mas corriente estas la brindan, todo lo contrario a las fuentes normales (las de transformadores inductivos AC) ya que estas solo

soportan por decirlo así una determinada corriente y si se les exige mas el voltaje se cae o la fuente entra en corto.

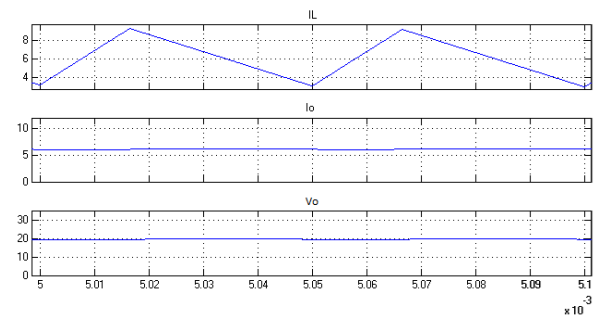


Figura 11. Comportamiento del sistema con  $V_s$  max y  $P_{max}$

- Para la siguiente prueba se disminuirá el voltaje al mínimo  $49.5V$  y se dejara la misma potencia (la máxima)

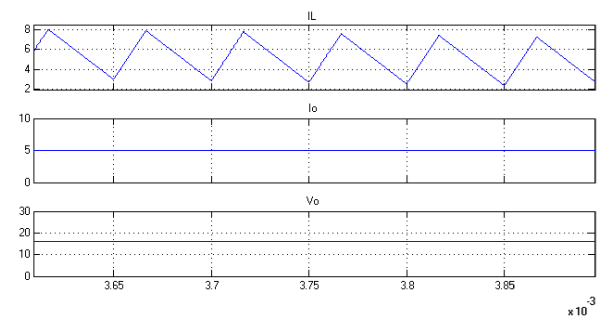


Figura 12. Comportamiento del sistema con  $V_s$  min y  $P_{max}$

Como se puede ver en este caso la corriente disminuyo ya que se disminuyo el voltaje a la entrada por consiguiente no se podía entregar tanta corriente, además el voltaje a la salida también disminuyo, sin embargo el sistema sigue trabajando en modo continuo, el problema de la caída de tensión a la salida se soluciona mas adelante cuando se agregue el controlador.

- La ultima prueba que se realizara en esta parte es la de dejar el voltaje mínimo de  $49.5V$  y disminuir la potencia.

Como se puede ver en la figura 12, en este caso ocurrió exactamente lo mismo que en el anterior, lo cual quiere decir que el convertidor no es muy eficiente cuando trabaja con el voltaje mínimo, sin embargo se comprobó lo que se quería saber, que el sistema funcionaba en modo continuo ante estas variaciones.

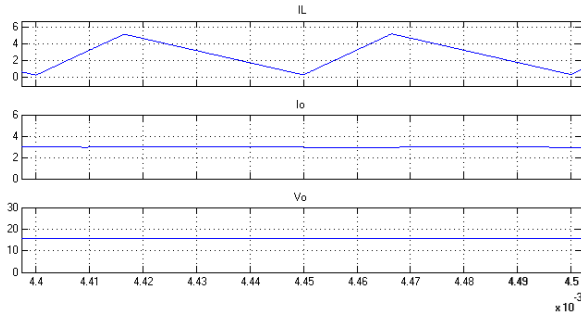


Figura 13. Comportamiento del sistema con Vs min y Pmin

Ahora se mostrara que es lo que hace de estos convertidores tan buenos, al agregarles una etapa de control estos convertidores se vuelven muy eficientes, en la figura 6 se muestra el sistema en lazo cerrado con el controlador.

Como ya se menciona, el controlador utilizado es netamente integrativo con un valor de “20” mediante este control se logro estabilizar el voltaje de salida para que fuera exactamente 20V, a continuación se muestra cual fue el resultado ante el peor caso (con Vs min y P min).

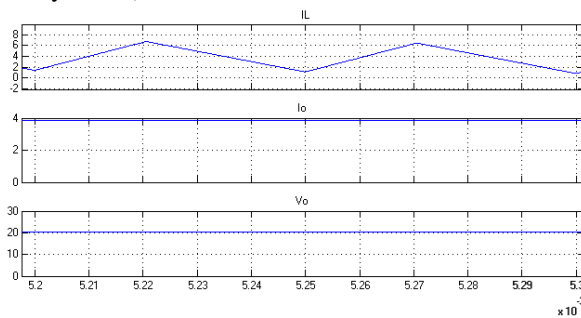


Figura 14. Comportamiento del sistema con el controlador integrativo

Como se ve en la figura 13 el sistema con el controlador es muy efectivo ya que logra que el voltaje de salida que antes era de 15V siguiera el valor deseado es decir 20V, además la corriente también subió y se mantuvo, esto indica que el controlador que se escogió funciona perfectamente, además la salida de este no supera los 0.5V lo cual es muy bueno, a continuación en la figura 14 se muestra esta señal.

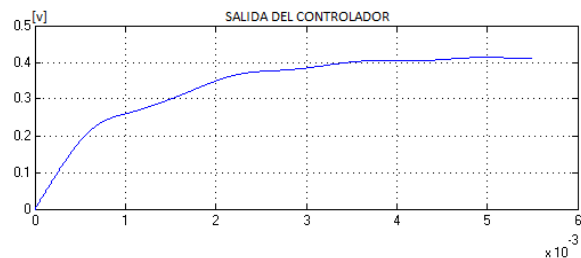


Figura 15. Señal de salida del controlador

Para culminar con este convertidor controlado BUCK se muestra como actúa al voltaje de salida hasta estabilizarse.

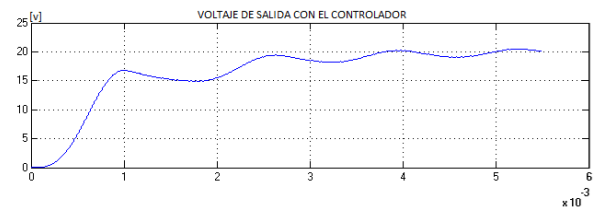


Figura 16. Señal del voltaje de salida con el controlador

Como se puede observar con el controlador el sistema no tiene esos picos de voltaje tan elevados como los que se veían al principio cuando el sistema estaba en lazo abierto. Esto nuevamente demuestra que este convertidor controlado se diseño correctamente.

#### IV. TERCER PLANTEAMIENTO, ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO EN MODO CONTINUO Y MODO DISCONTINUO

Para finalizar con el análisis de este tipo de convertidores se realizara el siguiente ejercicio con el cual se analizaran unas cosas que no se vieron en el diseño de los convertidores anteriores. El ejercicio plantea lo siguiente:

Diseñar un conversor de reductor de manera que la tensión de salida sea de 18V cuando la entrada sea de 48V. La carga es de 10Ω y la corriente de la bobina es permanente. El rizado de la tensión de salida no deberá superar el 0.5%. Especifique la frecuencia de conmutación de trabajo, el valor de cada uno de los elementos (C y L).

De acuerdo a lo ya visto a través de todo el documento se obtuvo lo siguiente asumiendo una frecuencia de 40KHz:

$$D = 0.375 \quad (44)$$

$$R = 10\Omega \quad (45)$$

$$L = 97.5\mu H \quad (46)$$

$$C = 100\mu F \quad (47)$$

$$I_{Lmin} = 0.36A \quad (48)$$

$$I_{L_{\max}} = 3.24A \quad (49)$$

$$I_o = 1.8A \quad (50)$$

Teniendo en cuenta lo hallado se tomaran en cuenta las siguientes preguntas para realizar un análisis en cuanto al funcionamiento en modo continuo y discontinuo de este tipo de convertidores.

- ¿Cuál es la limitación de la resistencia de carga para el funcionamiento en corriente permanente?

- ¿Cuál sería el rango de la tensión de salida para una resistencia de carga que varié entre  $5\Omega$  y  $20\Omega$ ?

- Diseñe de nuevo el convertidor de manera que la corriente en la bobina sea permanente para una resistencia de carga que varié entre 5 y  $20\Omega$ .

Para la primera parte hay que determinar cuando el sistema entra en funcionamiento discontinuo de acuerdo a lo siguiente:

$$\Delta_1 < 1 - D \quad (51)$$

En donde:

$$\Delta_1 = \frac{-D + \sqrt{D^2 + \frac{8L}{RT}}}{2} \quad (52)$$

De esta manera de acuerdo a (46) se empezara a variar R hasta que  $\Delta_1 < 1 - D$  para así determinar hasta que valor de resistencia el sistema deja de trabajar en corriente continua. De acuerdo a esto se tiene:

$$\Delta_1 < 0.625 \quad (53)$$

$$\Delta_1 = \frac{-0.375 + \sqrt{0.375^2 + \frac{8 \cdot 97.5 \mu H}{12.5 \frac{1}{40KHz}}}}{2} = 0.624 \quad (54)$$

De esta manera cuando  $R \geq 12.5\Omega$  el sistema empieza a funcionar en modo discontinuo o corriente en estado no permanente, por consiguientes esta sería la limitación en la resistencia.

Para la siguiente parte hay que tener en cuenta lo acabado de realizar, ya que el voltaje de salida ante un cambio en la resistencia depende de su modo de funcionamiento, ya que se puede afirmar que con una resistencia de carga  $R=5\Omega$  el sistema funciona en modo continuo por consiguiente la salida esta dada por  $V_o=V_s \cdot D$  es decir el voltaje de salida es el mismo (18V), sin embargo cuando la resistencia de carga  $R=20\Omega$  el funcionamiento del convertidor es en modo discontinuo, por consiguiente se debe tener en cuenta que el voltaje de salida esta dado por:

$$V_o = \frac{DV_s}{\Delta_1 + D} \quad (55)$$

De esta manera utilizando (52) y (55) se tiene que el voltaje de salida es:

$$V_o = 13.8V \quad (56)$$

Para finalizar se diseñara un nuevo convertidor que cumpla con el funcionamiento en modo continuo ante cualquier variación de resistencia en el rango de 5 a 20 teniendo en cuenta el criterio utilizado en el apartado III, es decir para los cálculos se utilizara la resistencia mas elevada, por consiguiente:

$$D = 0.375 \quad (57)$$

$$R = 20\Omega \quad (58)$$

$$L = 156.25 \mu H \quad (59)$$

$$C = 62.5 \mu F \quad (60)$$

*(Si se realiza la simulación en matlab y se varia el valor de resistencia se puede comprobar que el diseño se realizo correctamente, sin embargo no se mostraran los resultados para no hacer mas largo el documento)*

## V. APLICACIONES MÁS COMUNES

Para finalizar el documento se quiere mencionar algunas aplicaciones de este tipo de convertidores para tener una idea para que puedan servir estos circuitos. Estas son algunas de las muchas aplicaciones:

- Fuentes de alimentación CC (Switch Mode Power Supplies, SMPS) para equipamiento electrónico.
- Control de motores
- Etapas de corrección de factor de potencia

- Generadores resonantes de calentamiento por inducción
- Sistemas de GGP de celdas de combustible

#### IV. CONCLUSIONES

- El diseño de los convertidores tipo Buck pueden llegar a ser relativamente sencillos, sin embargo existen ciertos criterios o conceptos que muchas veces no se tienen en cuenta que son de vital importancia, como lo es, saber que elementos son los indicados en la practica, diseño de la bobina y que la corriente se encuentre en régimen permanente, en fin. Por otro lado el diseño del controlador puede llegar a ser frustrante cuando no se han visto técnicas de control, sin embargo como se pudo ver en el planteamiento de este controlador es muy sencillo y lo podría llegar a implementar una persona sin muchos conocimientos del tema.

- Se ha podido determinar una relación importante que facilita los cálculos para el diseño del convertidor cuando se tienen voltajes de entrada y potencias a la salida que varían, es decir se pudo concluir que para no realizar los 4 análisis que esto implica, se llego al criterio de que se debe utilizar el voltaje máximo y la potencia mínima para que se garantice un funcionamiento en modo continuo ante cualquier variación de los valores establecidos de voltaje de entrada y potencia de salida.

#### Bibliografía

[1] HART DANIEL, Electrónica de Potencia, Valparaíso, cap. 6, University Valparaíso, Indiana, Pearson Educacion S.A., Madrid 20001

[2] Syed Abdul Rahman Kashif, Buck Converter -- Close Loop, disponible en la página de internet:  
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27381-buck-converter-close-loop>.

[3] MUHAMMAD H. RASHID, Electrónica de Potencia "Circuitos, dispositivos y aplicaciones", Segunda edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

[4] Universidad de Oviedo, Convertidores CC/CC, disponible en la página de internet:  
[https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=27&ved=0CEcOFjAGOBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.uniovi.es%2Fate%2Fcalaje%2Fdocumentacion%2FMarina%2FEP\\_LMN\\_13304%2F6-EP-LMN-13323-](https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=27&ved=0CEcOFjAGOBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.uniovi.es%2Fate%2Fcalaje%2Fdocumentacion%2FMarina%2FEP_LMN_13304%2F6-EP-LMN-13323-)

[CONVERTIDORES%2520CC.PPT&ei=VKGHT9\\_vHImi9QSejO3CCQ&usq=AFOjCNFgLxxn2XbuiCsDnP5npCdJfXWsbA&sig2=8\\_JIIRS8TPTG7tDeZxBbtQ](http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=27&ved=0CEcOFjAGOBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.uniovi.es%2Fate%2Fcalaje%2Fdocumentacion%2FMarina%2FEP_LMN_13304%2F6-EP-LMN-13323-)

[5] W. Uturbey, Convertidores DC-DC, Instituto de ingeniería eléctrica, documento PDF, disponible en la página de internet:  
<http://iie.fing.edu.uy/ense/assign/elpot1/dcdc.pdf>

[6] Pablo Jorge Carbonell Cortés, Técnicas de control borroso basadas en modelos locales aplicadas a convertidores dc/dc conmutados. Aplicación al convertidor Buck, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Valencia, Tesis Doctoral, Disponible en la página de internet:  
<http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/4641/tesisUPV1029.pdf?sequence=1>

[7] Jenn-Kun Kuo, Chi-Fa Wang, An integrated simulation model for PEM fuel cell power systems with a buck DCeDC converter, Department of Greenery, National University of Tainan, Tainan 70005, Taiwan, disponible en la pagina de internet:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991101319X>

## ANEXOS

### ANEXO A

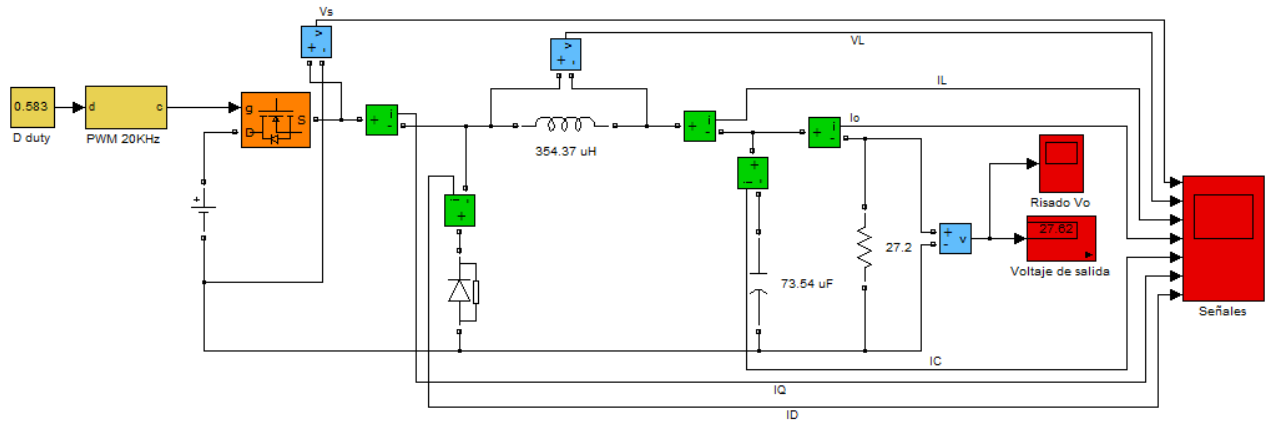


Figura 2. Conexión de bloques utilizado para la simulación de convertidor.

### ANEXO B

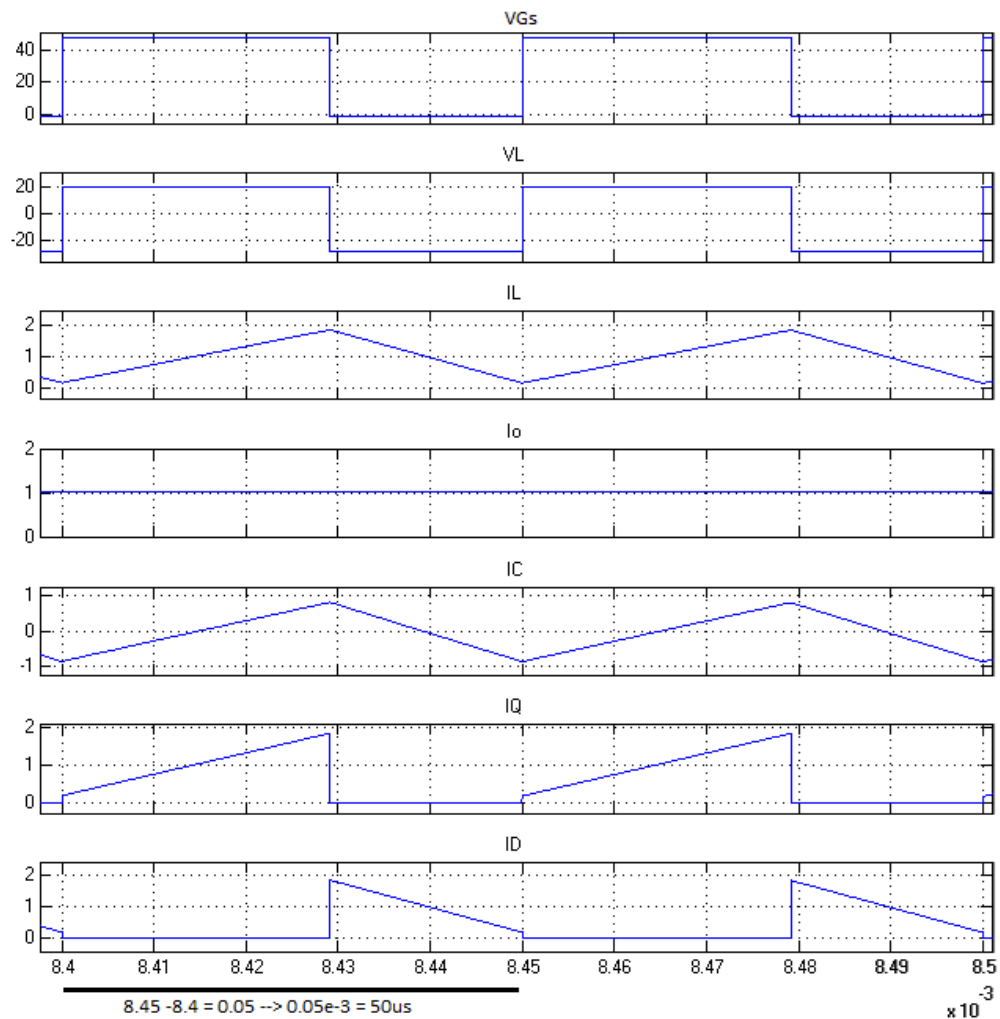


Figura 5. Señales de voltaje y corriente en los elementos que componen el convertidor BUCK

## ANEXO C

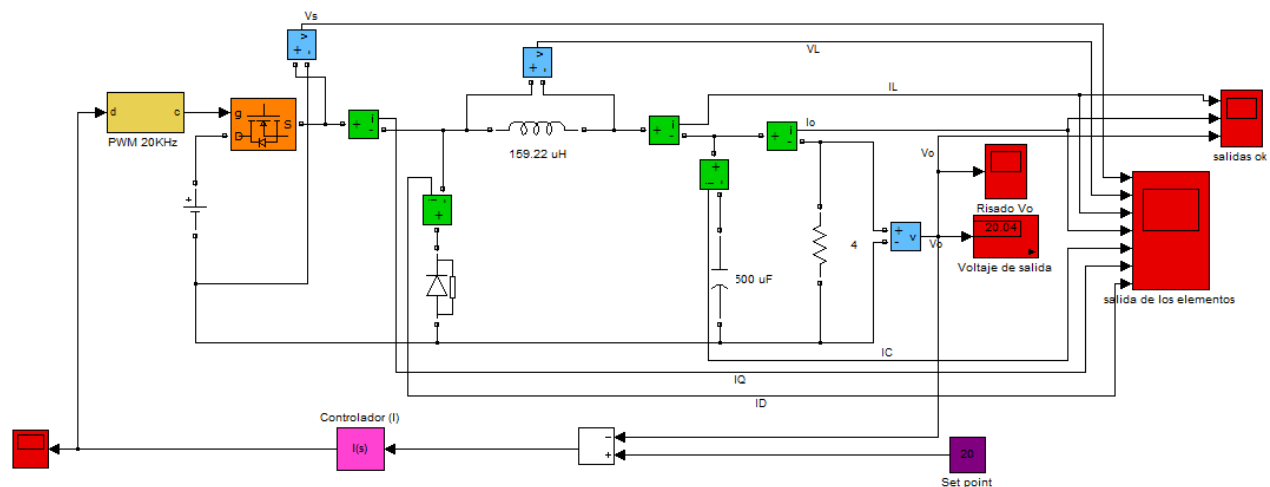


Figura 6. Conexión de bloques utilizado para la simulación de convertidor en lazo cerrado

## ANEXO D

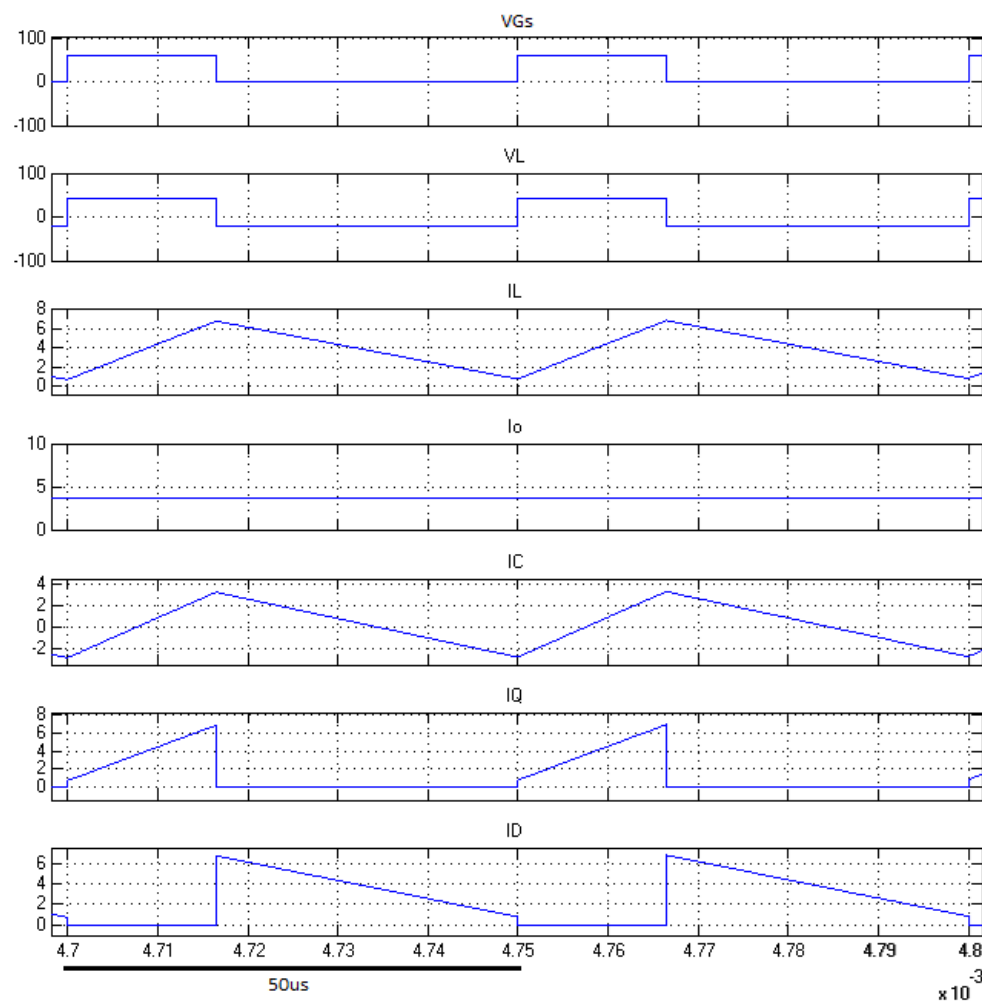


Figura 10. Señales de voltaje y corriente en los elementos que componen el convertidor BUCK