

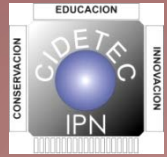


## Modelado, Simulación y Construcción de un Convertidor de Potencia Buck

CIDETEC-IPN. Departamento de Posgrado. Área de Mecatrónica

D. Muñoz-Carrillo, R. Silva-Ortigoza<sup>★</sup>, J. M. Alba-Martínez,  
M. Marciano-Melchor<sup>★</sup>, M. Marcelino-Aranda<sup>★</sup> y J. M. Díaz-Rentería

e-mails: rsilvao@ipn.mx, gtomartin@yahoo.com, mmarciano@ipn.mx



### Objetivo

El objetivo de este trabajo consiste en presentar el modelado, simulación y construcción del convertidor de potencia de CD/CD Buck o *reductor de voltaje*.

### Introducción

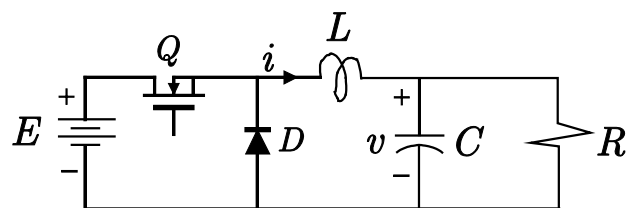
Ante la constante evolución de los equipos electrónicos de almacenamiento y tratamiento de información modernos, en lo referente a la constante miniaturización y concentración de funciones, el conseguir características similares en su *fuentes de alimentación* ha convertido a estas en una parte muy importante de cualquier equipo electrónico, e impone retos desafiantes a los diseñadores de circuitos. En función de cual sea la fuente de energía primaria del sistema un *proceso de conversión de energía eléctrica* va a estar presente dentro del sistema. Es la electrónica de potencia quien se encarga de estudiar los diferentes tipos de conversión de energía eléctrica y para ello emplea dispositivos de estado sólido. Estas conversiones pueden clasificarse en cuatro categorías: 1.- Convertidores de corriente directa a corriente directa (convertidores CD/CD), 2.- Convertidores de corriente alterna a corriente directa (CA/CD o *rectificadores*), 3.- Convertidores de corriente directa a corriente alterna (CD/CA o *inversores*) y 4.- Convertidores de corriente alterna a corriente alterna (CA/CA o *cicloconvertidores*). Los procesamientos de energía mencionados, tienen una amplia diversidad de aplicaciones, son usados en la instrumentación, en las computadoras, en las telecomunicaciones, y en la industria automotriz, en la industria aeronáutica, en la industria de la defensa militar, en los sistemas de iluminación, y en el transporte ferroviario, etc. Así, se puede ver que el rango de aplicabilidad de los *convertidores de Potencia* es ilimitado.

Este trabajo se enfoca en el estudio del Convertidor de Potencia Buck, el cual se encuentra dentro de los convertidores de CD /CD.

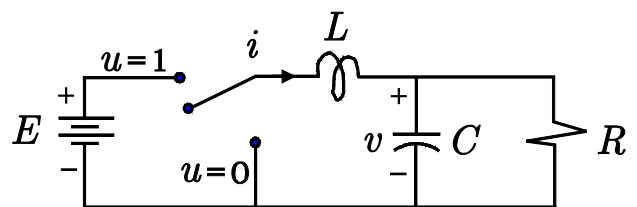
<sup>★</sup> R S-O, M M-M y M M-A agradecen el soporte económico recibido por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP-IPN) y de los programas EDI, EDD y COFAA del IPN, así como del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

### Descripción general del convertidor Buck

Considere el sistema conmutado mostrado en la Figura 1, el cual representa la dinámica conmutada de un convertidor de potencia de CD/CD tipo Buck. La implementación electrónica de este sistema se realiza mediante dispositivos semiconductores (transistor, diodo), siendo el gobierno del transistor Q el control del convertidor, el cual tiene dos posibles estados: el de apagado y el de encendido. Véase la Figura 1a. Esta topología también es conocida como reductora de voltaje, porque la salida de voltaje  $v$  es menor o igual que el voltaje de entrada  $E$ , i. e.,  $v \leq E$ . El objetivo de control de este sistema consiste en conseguir que el voltaje de salida del convertidor  $v$ , se establezca a un valor de voltaje deseado  $\bar{v}$ , mediante la propuesta apropiada de  $u$ . Siendo  $u$  la función de posición del interruptor, la cual actúa como variable de control, tomando valores en el conjunto discreto  $\{0, 1\}$ . Véase la Figura 1b.



(a) Implementación del convertidor mediante transistor-diodo.



(b) Representación ideal del convertidor.

Figura 1. Diagrama electrónico del convertidor de potencia de CD /CD Buck.

### Modelo conmutado del convertidor Buck

Para la obtención del modelo conmutado del convertidor de potencia de CD/CD Buck se hace uso de la Figura 1b, la cual introduce el concepto de interruptor ideal asociado al transistor  $Q$ . En esa figura el interruptor ideal tiene dos posibles posiciones:

- El caso en el cual  $u = 0$ , se asocia al hecho de que el transistor  $Q$  está apagado. En este estado el diodo  $D$  se polariza directamente, y no permite la conexión entre la fuente de voltaje  $E$  y la carga del sistema  $R$ .
- El caso  $u = 1$ , se asocia al hecho de que el transistor  $Q$  está encendido. En este estado el diodo  $D$  se polariza inversamente, lo que permite una conexión entre la fuente de voltaje  $E$  y la carga del sistema  $R$ . Además, permite que el inductor  $L$  almacene energía.

De esta manera para el caso en el que  $u = 0$ , tras la aplicación de las Leyes de Kirchoff de Voltaje y de Corriente (LKV y LKC) a la Figura 1b, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= -v \\ C \frac{dv}{dt} &= i - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

Mientras que para el caso en el que  $u = 1$ , tras la aplicación de LKV y LKC a la Figura 1b, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= -v + E \\ C \frac{dv}{dt} &= i - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

De esta manera, el *modelo conmutado* asociado al convertidor de potencia de CD/CD Buck está determinado por:

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= -v + uE \\ C \frac{dv}{dt} &= i - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (3)$$

Ya que, a partir de (3), cuando  $u = 0$  se obtiene el sistema (1) y cuando  $u = 1$  se obtiene el sistema (2). Siendo  $i$  la corriente asociada con  $L$ ,  $v$  el voltaje asociado a las terminales de  $C$  y  $E$  el voltaje de entrada del sistema.

### Modelo promedio del convertidor Buck

Con la intención de conocer las propiedades del convertidor de potencia Buck, se procede a calcular el valor de las variables del sistema  $i$  y  $v$  en estado estacionario, es decir,  $\bar{i}$ ,  $\bar{v}$ . Para esto se parte del modelo promedio asociado a (3), el cual está determinado por:

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= -v + u_{av} E \\ C \frac{dv}{dt} &= i - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (4)$$

donde ahora  $u_{av}$  pertenece al intervalo continuo  $[0, 1]$ .

### Sistema en estado estacionario

En estado estacionario o permanente, la razón de cambio asociada a las variables  $i$  y  $v$  del sistema promedio (4), son iguales a cero. Esto resulta como consecuencia de imponer como entrada del convertidor a  $u_{av} = U = \text{constante}$ . De esta manera, los valores en estado estacionario que toman las variables del sistema (4) quedan definidos por:

$$\bar{i} = \frac{\bar{v}}{R} \quad (5)$$

$$\bar{v} = UE$$

## Simulación del modelo en Matlab® -Simulink®

Ahora se realizan las simulaciones numéricas asociadas al sistema (4), las cuales permitirán conocer la evolución dinámica de la variable de corriente y de voltaje del convertidor de potencia Buck, para diferentes valores de entrada  $u_{av} = U = constante$ . Las simulaciones se realizaron con la ayuda del software Matlab®-Simulink®, y se utilizaron como parámetros de los componentes del sistema los siguientes valores:

$$L=4.94 \text{ mH a } 3 \text{ A}, \quad C=4.4 \text{ } \mu\text{F a } 275 \text{ V}, \quad R=28.5 \text{ } \Omega \text{ a } 50 \text{ W}, \quad E=18 \text{ V a } 3 \text{ A}.$$

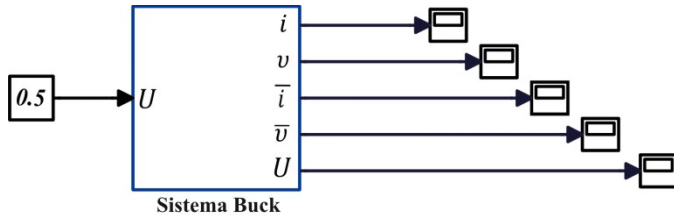


Figura 2: Diagrama a bloques del sistema Buck desarrollado en Matlab®-Simulink®.

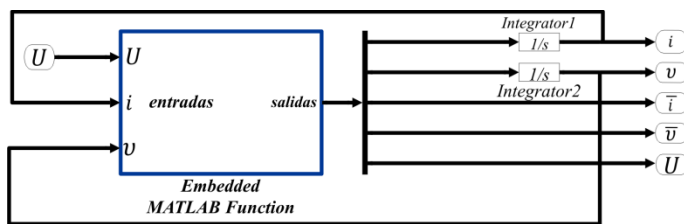


Figura 3: Realización del bloque "Sistema Buck".

## Simulaciones del convertidor Buck

Para realizar las simulaciones numéricas del sistema se consideran tres casos diferentes cuando la entrada  $U$  toma los siguientes valores: 0.5, 0.75 y 1. En los resultados de simulación se muestran tanto la evolución dinámica de  $i$  y  $v$ , como sus correspondientes valores en equilibrio,  $\bar{i}$  y  $\bar{v}$ , respectivamente.

## Descripción de los bloques en Simulink®

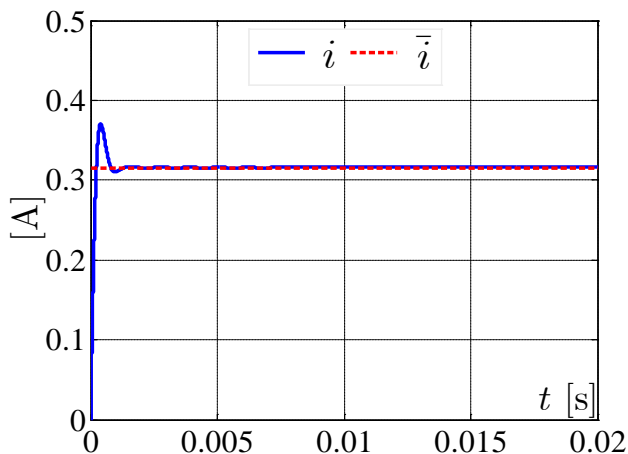
En la Figura 2 se muestra el diagrama a bloques desarrollado para simular la dinámica del convertidor Buck, determinada por (4). El bloque principal de este diagrama se denomina "Sistema Buck", el cual se construyó con una función embebida de Simulink®.

Por otro lado, la entrada del diagrama mostrado en la Figura 2, representa la entrada promedio del sistema,  $U$ , la cual puede tomar valores en el intervalo  $[0,1]$ . Mientras que la salida del diagrama, consiste en la visualización gráfica de las variables ( $i, v, \bar{i}, \bar{v}$  y  $U$ ), mediante la herramienta *scope* de Simulink®.

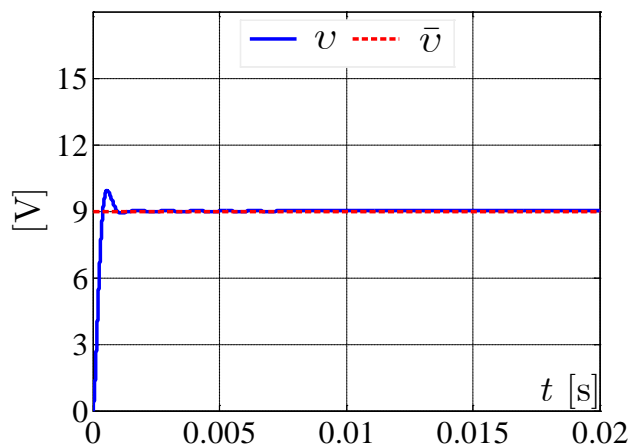
A su vez, el bloque "Sistema Buck" de la Figura 2, se realizó según se muestra en la Figura 3. Como ya se ha mencionado, hace uso de una función embebida, la cual contiene la información de las ecuaciones diferenciales (4), permitiendo de esta manera la simulación del sistema Buck.

## Simulación 1:

En la Figura 4, se muestran los resultados obtenidos en simulación cuando se considera  $U = 0.5$ . Ahí, se puede observar que la corriente y el voltaje, i. e.,  $i$  y  $v$ , satisfacen lo predicho por (5), y en este caso se tiene que  $v$  es la mitad del voltaje de entrada  $E$ .



(a) Corriente en el inductor



(b) Voltaje en el capacitor

Figura 4: Respuesta del sistema a una entrada  $U = 0.5$ .

### Simulación 2:

En esta simulación se puede apreciar el comportamiento de las variables del sistema para  $U = 0.75$ . En este caso, de acuerdo a (5), se espera que en estado estacionario  $v = 0.75E$ , lo cual esta en completo acuerdo, según se muestra en los resultados obtenidos en la Figura 5.

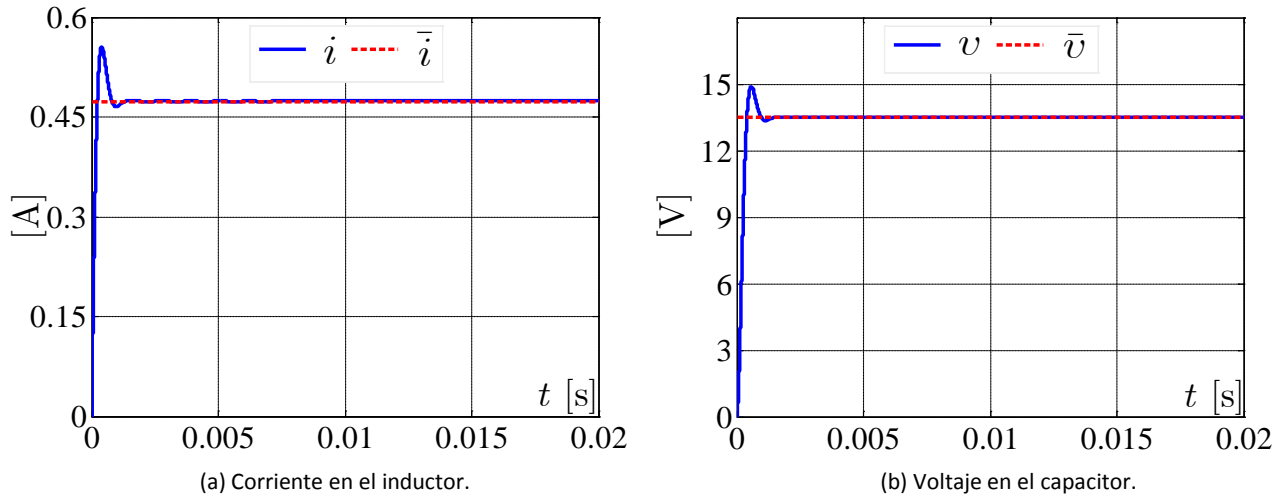


Figura 5: Respuesta del sistema a una entrada  $U = 0.75$

### Simulación 3:

Finalmente, se presentan los resultados de simulación cuando  $U = 1$ , obteniendo de acuerdo a (5) que  $v = E$ . Lo cual queda verificado a nivel simulación en la Figura 6.

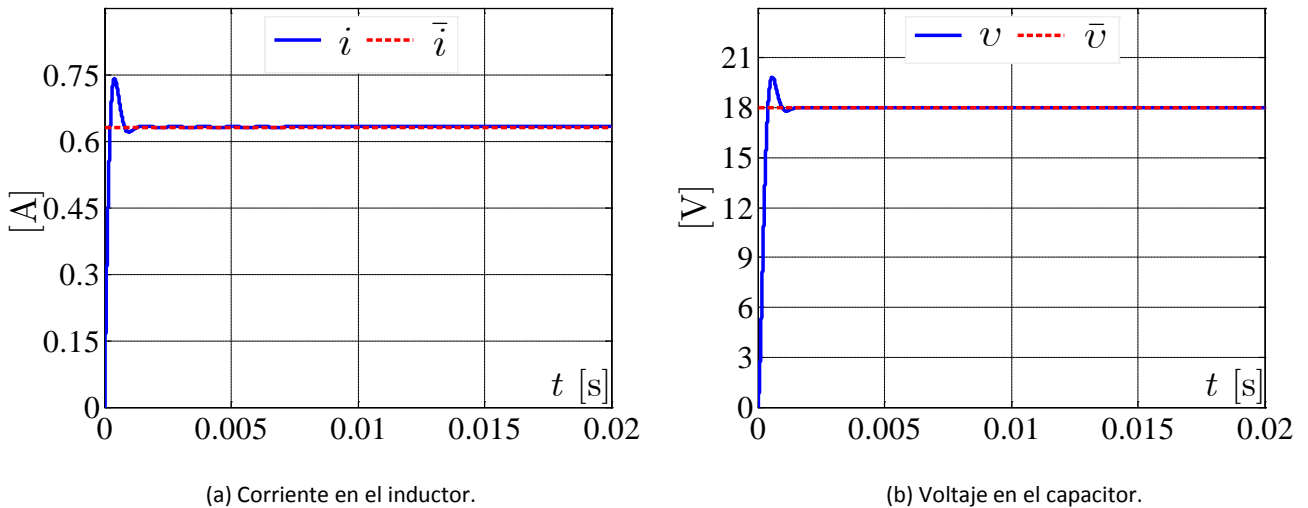


Figura 6: Respuesta del sistema a una entrada  $U = 1$ .

## Construcción del convertidor de potencia

Habiendo estudiado, a nivel de simulación, la dinámica del convertidor de potencia Buck, determinada por las ecuaciones (4). Con la intención de que en un trabajo futuro se evalué el sistema Buck a nivel experimental, en esta parte se presentan las generalidades del sistema construido.

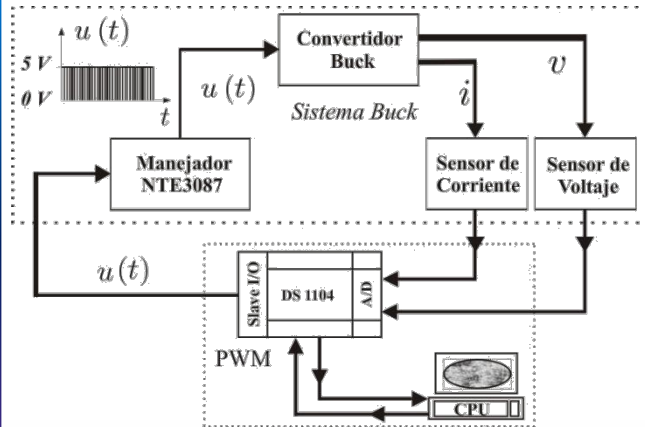


Figura 7: Diagrama a bloques del convertidor Buck construido para futuras investigaciones.

## Diagrama a bloques del convertidor Buck

En la Figura 7 se muestra el diagrama circuital del prototipo del convertidor Buck construido, el cual consta de dos bloques: el Sistema Buck y el PWM, los cuales se describen a continuación:

❖ Sistema Buck: Está compuesto del Convertidor Buck, un sensor de corriente, un sensor de voltaje y un manejador. Cabe mencionar que el elemento más importante en este bloque es el convertidor de potencia Buck.

❖ PWM: Este bloque tiene por objetivo que el interruptor mostrado en la Figura 1b pueda tomar las posiciones posibles, i.e.,  $u = 0$  ó  $u = 1$ . Este interruptor se sintetiza a nivel experimental con la ayuda de un MOSFET NTE2984, el cual se activa con niveles de voltajes lógicos ( $0\text{ V}$  ó  $5\text{ V}$ ). Así, por ejemplo, si se requiere realizar a nivel experimental  $U = 0,5$ , esto significará que el interruptor permanecerá el 50% de un periodo de tiempo  $T$  encendido, y el resto del periodo apagado.

## Prototipo del convertidor Buck

En la Figura 8 se muestra una fotografía del prototipo del convertidor de potencia de CD/CD Buck construido.

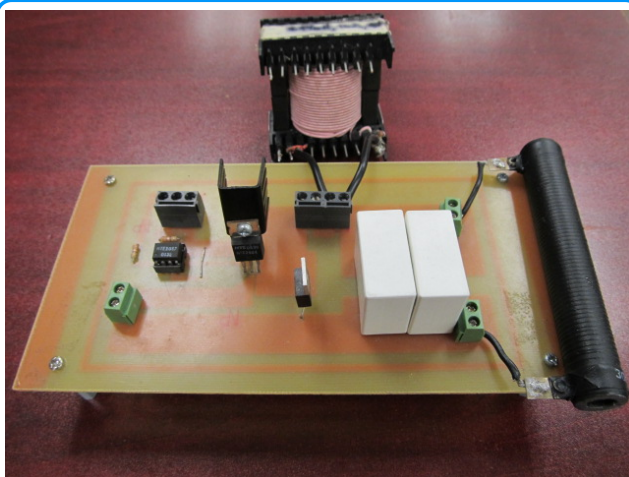


Figura 8: Fotografía del prototipo del convertidor Buck desarrollado.

## Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la deducción del modelado dinámico asociado al convertidor de potencia de CD/CD Buck, así como la simulación numérica del sistema deducido.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observó como el convertidor Buck se comporta como un reductor de voltaje, tal como se predijo en (5). Pues opera como un reductor de voltaje respecto a la entrada  $E$ , cuando  $U \in [0,1)$  (Figuras 4 y 5), y se comporta como un seguidor de voltaje, cuando  $U = 1$  (Figura 6).

Además, se bosquejó el diagrama a bloques general de los componentes del sistema construido del convertidor Buck, que se empleará en futuras investigaciones.

Con la intención de validar el convertidor Buck construido a nivel experimental, en el futuro se planea reportar los resultados obtenidos en tiempo real.

Para la síntesis en tiempo real se hará uso de una tarjeta de adquisición de datos de la marca dSPACE, modelo DS1104, junto con su software de aplicación y Matlab®-Simulink®.