

# MODELADO Y CONTROL DE UN CONVERTIDOR DC-DC TIPO STEP DOWN (BUCK CONVERTER)

Francisco José Pérez Zenteno  
Máster en Energías, Facultad de Ciencias Físicas  
Universidad Complutense de Madrid  
francp05@ucm.es

## Abstract

*In this article the methodology to model and control a DC DC step down converter, also known as Buck Converter, is presented. In order to perform this modelling, the average technique is used. Furthermore, the values of the passive components are calculated. Finally, the system is simulated with a PID controller in Matlab and Simulink in order to get the system behaviour.*

**Keywords:** DC DC converter, dynamic systems, state variables, transfer function, PID, Continuous Condition Mode (CCM)

## Resumen

*En este artículo se presenta la metodología necesaria para modelar y controlar un convertidor DC DC tipo Step Down, también conocido como Buck Converter. Para realizar este modelado se hace uso de la técnica del averaging (promedio). Además, se calculan los valores de los elementos pasivos. Finalmente se hace una simulación con un control PID del sistema con Matlab y Simulink para observar los resultados.*

**Palabras clave:** Convertidor DC-DC, sistemas dinámicos, variables de estado, función de transferencia, PID, Continuous Condition Mode (CCM)

## 1. INTRODUCCIÓN

En lo referente a la electrónica de potencia, los convertidores DC-DC tienen un lugar predominante debido a la gran cantidad de aplicaciones donde se puede utilizar. Desde fuentes de energía, seguidores de punto óptimo (MPP) y sistemas de generación distribuida hasta controladores de motores, podemos ver que su utilización se ha extendido tanto que se hace necesario la implementación de sistemas y/o algoritmos que permita sacarles el máximo provecho.

Estos dispositivos se suelen clasificar en función de cómo son capaces de regular el voltaje de salida. En general, se puede clasificar en tres tipos principales: *buck converter* (reduce el voltaje salida), *boost*

*converter* (aumenta el voltaje de salida) y *buck-boost converter* (aumenta o reduce el voltaje de salida según lo deseemos). A pesar de que estás se consideran como las topologías básicas, podemos encontrar también los *Cúk converter* y los *Full Bridges converter* que son combinaciones de los primeros [1].

La idea central de funcionamiento de todos estos dispositivos es el control de flujo de energía eléctrica; es decir, se busca que la potencia de la fuente sea aprovechada de la mejor forma por la carga, teniendo en cuenta la regulación de voltaje deseado. Con estas premisas se hace necesario tener interruptores de alta calidad que tenga la menor cantidad de pérdidas y sean capaces de trabajar en altas frecuencias y microprocesadores capaces de producir señales de modulación de ancho de pulso (PWM) adecuadas para los interruptores.

A la hora de modelar, simular y controlar estos dispositivos se debe de tomar en cuenta las condiciones con las que puede trabajar el circuito. Entre las más importantes se pueden destacar: variabilidad de la carga, modulación de frecuencia y la no linealidad de los interruptores y los elementos pasivos (inductores y capacitores) del circuito. Al considerar todas estas variables se hace un modelo mucho más fiel a la realidad; no obstante, a la hora de simularlo llega a haber problemas debido a la necesidad de sistemas continuos y lineales para poder aplicar los sistemas clásicos de control.

Es por eso que en este artículo se toman las siguientes consideraciones: Interruptores ideales, generadores (fuentes de voltaje) ideales y elementos pasivos lineales e invariantes

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas, se puede analizar los convertidores de tres formas básicas [2]:

- **Modelo de interruptor:** Expresa el comportamiento exacto del sistema ya que considera el comportamiento con el interruptor activo y desactivado.
- **Modelo de *sampled-data*:** Selecciona valores discretos del sistema.
- **Modelo de *averaging*:** Selecciona el valor promedio entre el estado activo y desactivado.

A lo largo de este artículo se presentará el modelado y control del convertidor *buck* por medio de la aproximación del promedio

## 2. MODELO DEL SISTEMA

### 2.1. ANALISIS DEL CIRCUITO Y OBTENCIÓN DEL MODELO

Lo primero que se debe de hacer para poder simular el sistema, es obtener las ecuaciones que describen su comportamiento.

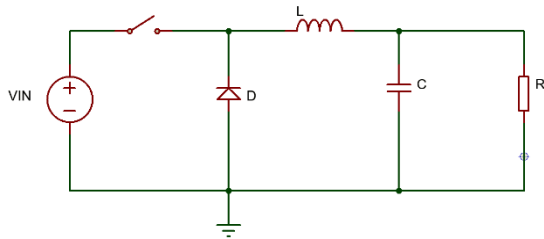


Figura 1 Circuito del Buck Converter

Haciendo el análisis nodal y de mallas del circuito se tiene que para el estado con interruptor cerrado es:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{V_{in} - V_R}{L} \\ \frac{dv_c}{dt} &= \frac{i_L}{C} - \frac{V_R}{RC} \end{aligned} \quad (1)$$

Haciendo lo mismo para el caso del interruptor abierto se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{V_R}{L} \\ \frac{dv_c}{dt} &= \frac{i_L}{C} - \frac{V_R}{RC} \end{aligned} \quad (2)$$

Considerando la metodología del promedio (*averaging*) para considerar los dos estados del interruptor, se tiene lo siguiente [3]:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L} [(V_{in} - V_R)d + (-V_R)(1 - d)] \\ \frac{dv_c}{dt} &= \frac{1}{C} \left[ \left( i_L - \frac{V_R}{R} \right) d + \left( i_L - \frac{V_R}{R} \right) (1 - d) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Donde se tiene que el primer paréntesis representa el comportamiento con interruptor cerrado y el segundo con interruptor abierto. Además,  $d$  es el *duty ratio*, es decir el tiempo que el interruptor está cerrado se representa como [4]:

$$d = \frac{t_{on}}{T} = \frac{V_R}{V_{in}} \quad (4)$$

Simplificando las ecuaciones 3, se obtiene una forma más sencilla del sistema.

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{V_{in}d - V_R}{L} \\ \frac{dv_c}{dt} &= \frac{i_L}{C} - \frac{V_R}{RC} \end{aligned} \quad (5)$$

Con estas ecuaciones ya es posible obtener el modelo del sistema en variables de estado. El cuál es el siguiente:

$$\begin{aligned} i_L &= x_1 & d &= u \\ v_c &= V_R = x_2 \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Para hacer este modelo se consideró lo siguiente: la salida que se desea es el voltaje del resistor que resulta ser igual al del capacitor, la entrada es el *duty ratio* del interruptor. Se tiene que considerar también, que este modelo considera a la fuente  $V_{in}$  como constante, lo cual no es siempre cierto.

Con la siguiente formula es posible obtener la función de transferencia a partir de las matrices de variables de estado

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C[S * I - A]^{-1} * B \quad (7)$$

Se tiene entonces que la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{V_{in} * \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

### 2.2. OBTENCIÓN DE LOS VALORES DEL INDUCTOR Y CAPACITOR

A la hora de implementar un convertidor buck es necesario escoger adecuadamente los valores del inductor y capacitor en función de la carga que queremos alimentar y de la fuente de voltaje.

De acuerdo con [5] existe al menos dos modos de operación en los que puede caer el convertidor buck. Estos se diferencian entre sí por la corriente que

observa el inductor. En el caso de no volverse cero entre los intervalos del switch, se considera que esta en el *continuous condition mode* (CCM) [fig. 2] . Si la corriente se vuelve cero, entonces se dice que está en *discontinuous condition mode* (DCM).

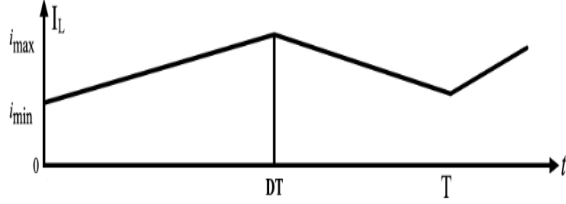


Figura 2 Corriente del inductor en CCM [6]

La relevancia de saber en qué modo de operación se está, se debe a las mayores pérdidas y complejidad que tiene el tener el DCM en comparación con el CCM. Se tiene por ejemplo que el valor del duty ratio para DCM pasa de ser (4) a ser:

$$d = V_R \sqrt{\frac{2Lf}{RV_{in}(V_{in} - V_R)}} \quad (9)$$

Es por eso que es conveniente trabajar en el CCM. Para asegurarse de estar en esta condición de trabajo, se puede ayudar de las siguientes formulas [5] [7]:

$$L = \frac{V_{in} - <V_R>}{2 <I_R>} dT \quad (10)$$

$$C = \frac{T \Delta i_L}{8 \Delta V_R}$$

Donde se tiene que  $L$  es el valor mínimo que debe de tener el inductor que el sistema trabaje en CCM,  $C$  es el valor del capacitor,  $T$  es el periodo de operación del interruptor,  $<I_R>$  es el valor promedio que se busca en la carga y  $\Delta V_R$  es la variación que se desea tener en el sistema.

### 2.3. VALORES PROPUESTOS PARA EL SISTEMA

Para la simulación de este artículo, se propuso valores de voltaje de entrada y voltaje regulado deseado que son comunes encontrar en dispositivos de electrónica para sistemas fotovoltaicos. Se consideró también una carga resistiva baja que represente a la entrada de un inversor. Los demás parámetros se calcularon con las ecuaciones 4 y 10

Todos los parámetros seleccionados se resumen en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Voltaje entrada [Vin]	24 V
Voltaje deseado [Vr]	12 V
Resistencia [R]	11 $\Omega$
Periodo [T]	21 $\mu$ s
Duty Ratio [d]	0.5
Inductor [L]	60 $\mu$ H
Capacitor [C]	4 $\mu$ F

Tabla 1 Parámetros del sistema

### 2.4. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO

Para poder validar que los datos de la tabla 1 permiten trabajar en CCM, se simuló en simulink el bloque de variables estado con un estímulo de un PWM cuyo periodo y duty ratio son aquellos de la tabla 1. Los resultados de la simulación son los siguientes:

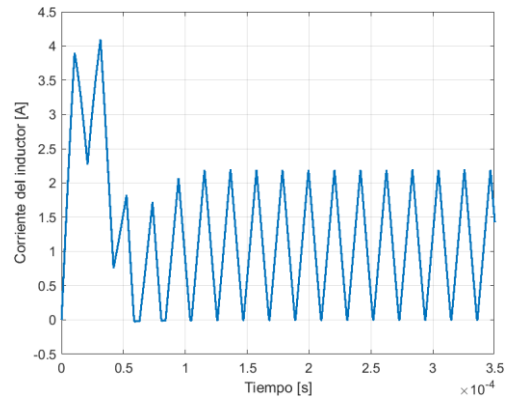


Figura 3 Corriente del inductor en lazo abierto

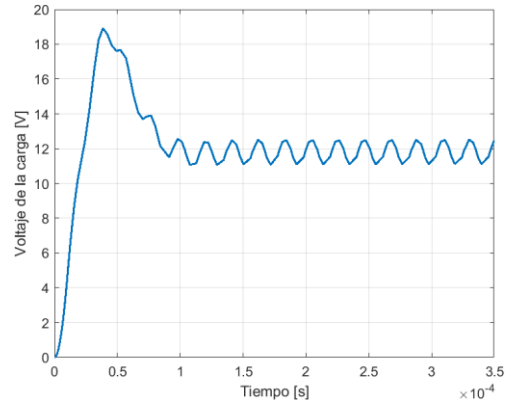


Figura 4 Respuesta del sistema ante una señal PWM en lazo abierto

Puesto que se desea implementar un control PID, también se simuló el bloque de variables de estado con un estímulo de un escalón cuyo valor final es igual al duty ratio. El resultado fue el siguiente.

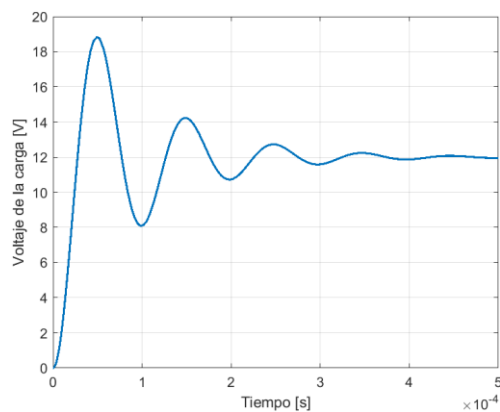


Figura 5 Respuesta del sistema ante un escalón

Se puede observar de la figura 3, que el sistema a partir de 0.1 ms se empieza a comportar en CCM. Además, de la figura 5 se observa que el sistema empieza a oscilar, pero alcanza el estado estable alrededor de los 0.31 ms.

### 3. CONTROL PID DEL SISTEMA

Haciendo uso de las herramientas de simulink, *PID Tuner* es posible obtener los valores óptimos para los coeficientes del PID. De tal modo se tienen siguientes valores:

Parámetro	Valor
Kp	0.1896
Ki	4746.3386
Kd	1.6250e-6
N (corte para filtro pasa bajas)	22687322.76 rad/s

Tabla 2 Valores de los coeficientes del control PID

El esquema de simulink que se utilizó para la simulación con el control es el siguiente:

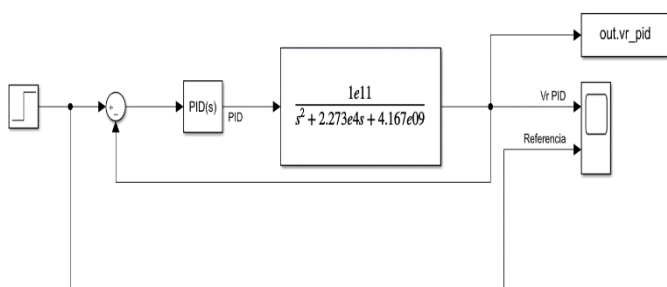


Figura 6 Esquema simulink del sistema con el control PID

Sometiendo el sistema con una entrada escalón, se obtiene la siguiente gráfica.

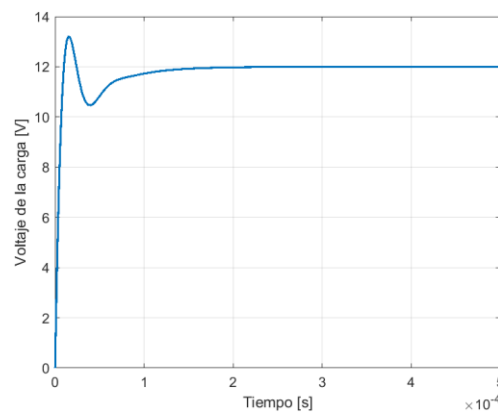


Figura 7 Respuesta del sistema con PID ante un escalón

De la gráfica anterior podemos ver claramente como el PID ha reducido de manera considerable el tiempo requerido por el sistema para llegar al estado estable. Se calculo por medio de la función de Matlab *stepinfo* que el tiempo para llegar al estado estable es de 0.1 ms

### 4. CONCLUSIONES

Se logró simular y controlar de buena forma un sistema de convertidor buck. Se comprobó que las ecuaciones propuestas por [3] [4] [5] [7] permiten obtener los valores adecuados de los elementos pasivos para poder simular un sistema que trabaje en CCM con valores típicos en sistemas de generación fotovoltaica. Se observó pues, que se cumplió con el objetivo del proyecto al obtener un valor constante de 12 VDC en la salida del convertidor. Además, se comprobó la gran utilidad y versatilidad que tiene la modelización por medio de variables de estado y función de transferencia, al poder implementar de buena forma un control PID (en función de transferencia) que haga al sistema mucho más estable y confiable.

### Agradecimientos

Agradezco a la Dra. Matilde Santos Peñas por la ayuda y asesoramiento aportada en la asignatura de Modelado y Simulación de Sistemas Energéticos y al gobierno de México y al CONACYT por haber creído en mí y financiar mis estudios en el extranjero.

### Anexos

A continuación, se muestra los esquemas de simulink utilizados para obtener la respuesta en lazo abierto del sistema.

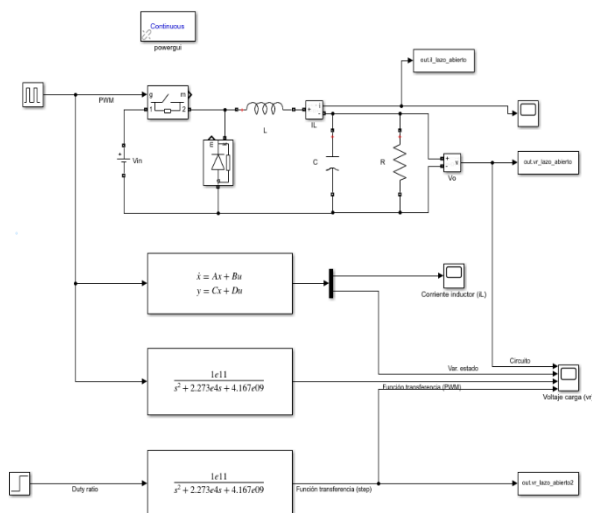


Figura 8 Esquemas de simulink para simular comportamiento del sistema en lazo abierto

## Referencias

- [1] N. Mohan, «Power Electronics: Converters, Applications and Design,» New Jersey, John Wiley & Sons , 2003, pp. 161-196.
- [2] S. Bacha, «Power Electronics Converters Modeling and Control,» Glasgow, Springer, 2014, pp. 10-22.
- [3] katkimshow, «DC-DC Converter Control: Modeling [archivo de video],» 25 mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=aa5M1HiM7Ac>. [Último acceso: 20 abril 2020].
- [4] M. H. Rashid, «Power Electronics,» San Diego, Elsevier, 2007, pp. 245-248.
- [5] R. Shaffer, «Fundamentals of Power Electronics with Matlab,» Boston, Charles River Media, 2007.
- [6] All About Circuits, «Discontinuous Conduction Mode of Simple Converters,» junio 11 2015. [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/discontinuous-conduction-mode-of-simple-converters/#:~:text=During%20continuous%20conduction%20mode%2C%20the%20inductor%20current%20in%20the%20energy,DC%2Dto%2DDC%20converters..> [Último acceso: 12 junio 2020].
- [7] katkimshow, «Fundamentals of Power Electronics - Buck Converter Critical Inductance Value,» 2 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=-rtFTszu-vQ>. [Último acceso: 10 junio 2020].