

Modelado y Simulación de un Convertidor Buck en Lazo Abierto

Miguel Andres Peña, Juan Fernando Montoya, David Ramirez Betancourth, Leandro Zapata Marin.

Universidad Nacional de Colombia

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Abstract—Este trabajo presenta el modelado y la simulación de un convertidor Buck en lazo abierto. Se obtiene la función de transferencia promediada del sistema, se implementa en simulación y se comparan sus resultados con el circuito completo en un software de simulación de circuitos. El análisis incluye la aplicación de escalones de $+0.1$ y -0.1 en d' , considerando como punto de operación $d' = 0.5$, correspondiente a una tensión de salida de $6V$. Finalmente, se evalúan los errores y se discute el desempeño dinámico del modelo.

Keywords—Buck Converter, Modeling, Simulation, Power Electronics, Control

I. INTRODUCCIÓN

El convertidor *Buck* es un regulador CC–CC que reduce la tensión de entrada a un valor menor con alta eficiencia. Para analizar y diseñar su control es necesario contar con un modelo matemático que describa su comportamiento dinámico.

En esta primera entrega se desarrolla el *modelo en lazo abierto* del convertidor, tomando como entrada el ciclo de trabajo complementario d' y como salida la tensión sobre la carga. Se obtiene la función de transferencia, se calculan polos, ceros y ganancia DC, y se simula en PSIM. La validación se realiza mediante comparación con el circuito conmutado en simulador, aplicando escalones de $+0.1$ y -0.1 alrededor del punto de operación $d' = 0.5$ (salida de $6V$). Finalmente, se analizan los resultados y el error del modelo, sentando la base para las siguientes etapas del proyecto.

II. MODELO DEL CONVERTIDOR

El convertidor *Buck* se compone de una fuente de tensión continua V_g , un interruptor controlado (MOSFET), un diodo, un inductor L , un condensador C y una resistencia de carga R . En el punto de operación definido por el ciclo de trabajo

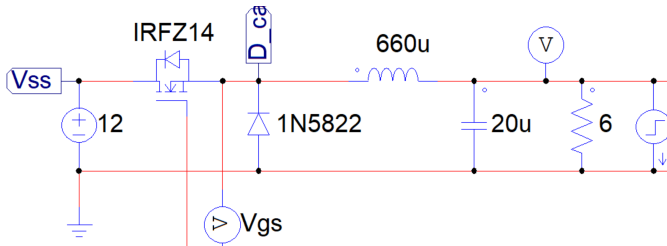


Fig. 1. Montaje del convertidor Buck utilizado en la simulación.

complementario d' , las ecuaciones diferenciales del sistema son:

$$L \frac{di_L}{dt} = V_i(1 - d') - v_o \quad (1)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = i_L - \frac{v_o}{R} \quad (2)$$

donde i_L es la corriente del inductor y v_o la tensión de salida en la carga.

A partir de estas ecuaciones, se linealiza el modelo alrededor del punto de operación y se obtiene la función de transferencia pequeña señal entre la variación del ciclo de trabajo $\hat{d}'(s)$ y la variación de la tensión de salida $\hat{v}_o(s)$:

$$H(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}'(s)} = \frac{V_g}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (3)$$

Sustituyendo los valores del convertidor ($V_g = 12V$, $L = 660 \mu H$, $C = 20 \mu F$, $R = 6 \Omega$), se obtiene:

$$H(s) = \frac{12}{1.32 \times 10^{-8}s^2 + 1.1 \times 10^{-4}s + 1} \quad (4)$$

De esta forma, la dinámica del convertidor queda representada por un sistema de segundo orden, cuya estabilidad y desempeño pueden analizarse a partir de los polos, la ganancia DC y la respuesta a escalones.

III. ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

A partir del modelo promediado del convertidor se obtuvieron los siguientes parámetros característicos:

- Frecuencia natural no amortiguada:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx 8704 \text{ rad/s}$$

- Razón de amortiguamiento:

$$\zeta = \frac{L}{2R\sqrt{LC}} \approx 0.4787$$

- Sobreimpulso máximo:

$$M_p = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\% \approx 25.3\%$$

- Tiempo de subida (10–90%):

$$t_r \approx \frac{1.8}{\omega_n} \approx 0.207 \text{ ms}$$

- Tiempo de establecimiento (criterio del 2%):

$$t_s \approx \frac{4.6}{\zeta \omega_n} \approx 1.104 \text{ ms}$$

- Polos del sistema:

$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \approx -4167 \pm j7642 \text{ rad/s}$$

- Ceros del sistema: Ninguno.
- Ganancia en DC:

$$H(0) = V_g = 12$$

La ubicación de los polos en el semiplano izquierdo confirma la estabilidad del sistema en lazo abierto. Dado que $0 < \zeta < 1$, el sistema es subamortiguado, lo que implica una respuesta transitoria con oscilaciones amortiguadas.

IV. SIMULACIÓN DEL MODELO PROMEDIADO

El modelo promediado, representado por la función de transferencia (4), se implementó y simuló computacionalmente utilizando Google Colab. Esta plataforma se usó para generar la respuesta del modelo ('Vout Modelo') ante las variaciones escalón en el ciclo de trabajo complementario d' . La salida representa la tensión teórica del convertidor según el modelo linealizado promediado.

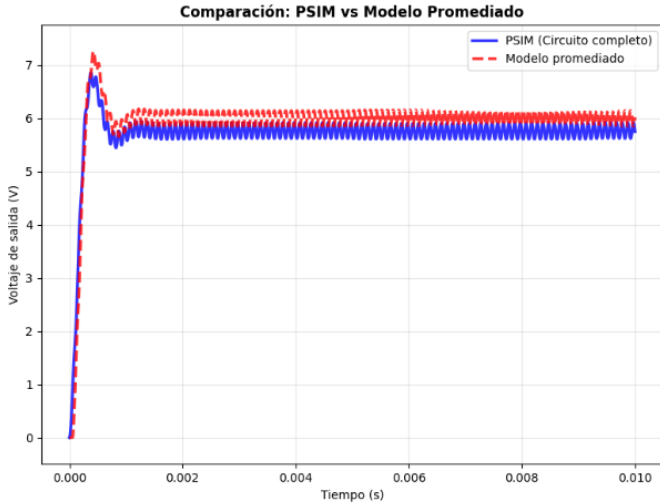


Fig. 2. Gráfica del Modelo circuital Vs Modelo simulado

V. SIMULACIÓN DEL CIRCUITO COMPLETO

Para validar el modelo, se implementó el circuito conmutado completo en el software PSIM. Esta simulación incluyó los componentes no ideales como el MOSFET, diodo, inductor (L), condensador (C), resistencia de carga (R) y la fuente de alimentación. La simulación se corrió por un tiempo total de 0.0100 segundos con un paso de 1.00e-07 segundos para capturar con fidelidad la dinámica de conmutación. Los datos de la tensión de salida ('Vsim') fueron exportados a un fichero CSV para su posterior análisis y comparación.

VI. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS

Se procesaron los datos de ambas simulaciones ('Vsim' de PSIM y 'Vout Modelo' de Colab) para cuantificar la precisión del modelo promediado.

A. Información del Conjunto de Datos

- **Tiempo total simulado:** 0.0100 segundos.
- **Paso de simulación:** 1.00e-07 segundos.
- **Rango Vout PSIM:** 0.000 a 6.858 V.
- **Rango Vout Modelo:** 0.000 a 7.262 V.

B. Métricas de Error: PSIM vs. Modelo

- **Error RMS:** 0.341931 V.
- **Error máximo:** 1.113906 V.
- **Error promedio:** 0.269407 V.
- **Error porcentual promedio:** 5.625 %.
- **Error porcentual máximo:** 100.000 %.

El error porcentual máximo se observa típicamente durante el transitorio de arranque, donde la tensión de salida es cercana a cero.

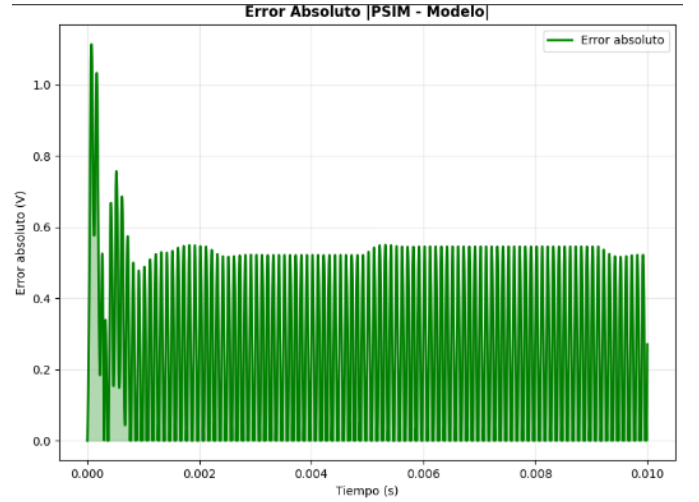


Fig. 3. Gráfica del error en el tiempo

C. Análisis Estadístico en Estado Estacionario (SS)

- **Error en estado estacionario:** 0.257156 V.
- **Voltaje PSIM promedio (SS):** 5.7636 V.
- **Voltaje Modelo promedio (SS):** 6.0073 V.
- **Desviación estándar PSIM (SS):** 0.108445 V.
- **Desviación estándar Modelo (SS):** 0.105115 V.

VII. CONCLUSIONES

El modelo promediado de pequeña señal demuestra ser una buena representación de la dinámica del convertidor Buck. Se observa un error porcentual promedio del 5.62%, lo cual es aceptable para análisis y diseño de sistemas de control. Las principales discrepancias, como el error en estado estacionario de 0.2572 V, pueden atribuirse a las no linealidades y pérdidas no modeladas en el circuito conmutado real, como las caídas de tensión en el MOSFET y el diodo. A pesar de estas

diferencias, el modelo captura adecuadamente la respuesta transitoria y los parámetros dinámicos clave del convertidor.

REFERENCES

- [1] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, Springer, 2001.
- [2] Apuntes del curso, Universidad Nacional de Colombia, 2025.