

Modelación de un convertidor DC-DC reductor en modo de conducción continua

Modeling a step-down DC-DC converter in continuous conduction mode

Modelando um conversor DC-DC abaixador em modo de condução contínua

Carlos Iván Rueda Panchano

ivan.rueda@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5067-6277>

Facultad de Ingenierías, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Karen Yanela Simisterra Quiñonez

karen.simisterra.quinonez@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8590-6316>

Facultad de Ingenierías, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Gorki Iván Rueda Salazar

gorki.rueda@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4375-9944>

Facultad de Ingenierías, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Luis Fernando Palacios García

luis.palacios.garcia@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4619-7788>

Facultad de Ingenierías, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Nayzer Frank Mina González

nayzer.mina@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1344-0369>

Facultad de Ingenierías, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

RESUMEN

El convertidor DC-DC reductor (Buck Converter), es un circuito básico de la electrónica de potencia muy utilizado en aplicaciones de reducción de voltajes de corriente continua. En este artículo, se describe la modelación con diagramas de bloques de un convertidor de este tipo. El desarrollo de este trabajo, requirió la interpretación de las ecuaciones matemáticas que representan el comportamiento dinámico en lazo abierto y en lazo cerrado del circuito del convertidor, adaptando estas ecuaciones a la correspondiente representación en diagrama de bloques de Simulink. El diagrama de bloques obtenido, se ha utilizado en (Rueda-Panchano, 2022) para diseñar y evaluar el comportamiento del convertidor DC-DC reductor bajo diferentes escenarios de operación.

Palabras clave: Modelación, Simulación, Convertidor DC-DC Reductor, Buck Converter, Simulink, Matlab.

ABSTRACT

The step-down DC-DC converter (Buck Converter) is a basic power electronics circuit widely used in direct current voltage reduction applications. In this article, it is described the mathematical modeling with block diagrams of a closed-loop step-down DC-DC converter with PID controller. The development of this work required to understand the mathematical equations that represent the open-loop and closed-loop dynamic behavior of the buck DC-DC converter circuit, so that adapting these equations to the corresponding Simulink block diagram representation. The obtained block diagram has been used in (Rueda-Panchano, 2022) to design and evaluate the behavior of the buck converter for different operational parameters.

Keywords: Modeling, Simulation, DC-DC Buck Converter, Buck Converter, Simulink, Matlab.

RESUMO

O conversor abaixador DC-DC (Buck Converter) é um circuito básico de eletrônica de potência amplamente utilizado em aplicações de redução de tensão de corrente contínua. Neste artigo, é descrita a modelagem do diagrama de blocos desse conversor. O desenvolvimento deste trabalho exigiu a interpretação das equações matemáticas que representam o comportamento dinâmico em malha e malha aberta do circuito conversor, adaptando essas equações à representação do diagrama de blocos do Simulink correspondente. O diagrama de blocos obtido foi utilizado em (Rueda-Panchano, 2022) para projetar e avaliar o comportamento do conversor DC-DC abaixador em diferentes cenários de operação.

Palavras-chave: Modelagem, Simulação, Buck Converter DC-DC, Buck Converter, Simulink, Matlab.

Introducción

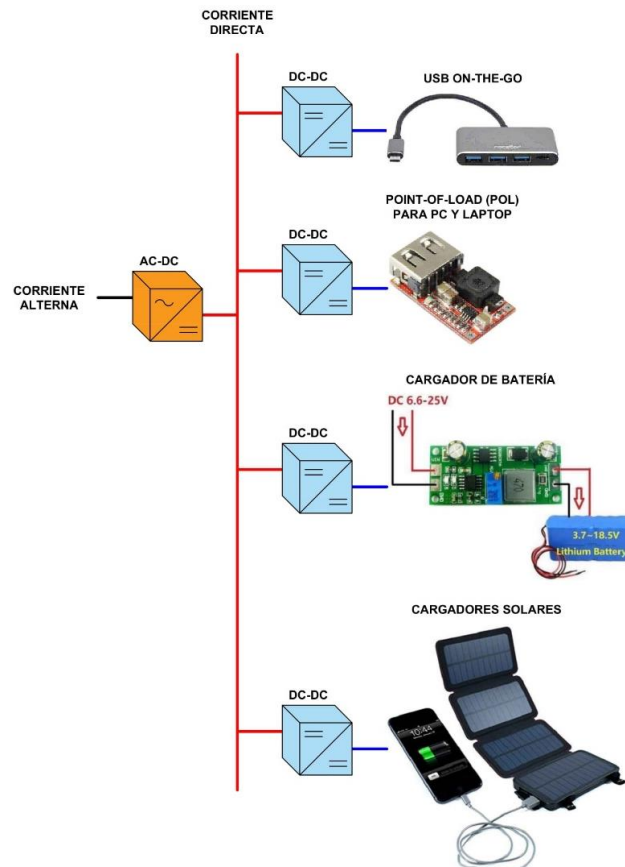
Un convertidor DC-DC reductor, es un circuito altamente eficiente que convierte un voltaje de corriente continua, a uno de menor valor también en corriente continua. Este tipo de circuito tiene un campo de aplicaciones muy amplio, pudiendo reducir tensiones de entrada de unos pocos voltios hasta los cientos o miles de voltios, proporcionando en general, un medio de reducción de voltaje muy eficiente y con alta densidad de potencia, permitiendo la reducción de la temperatura de funcionamiento y el tamaño de los dispositivos o artefactos que lo utilizan. De acuerdo a (Knight, 2015), algunas aplicaciones interesantes en la actualidad para este tipo de convertidores son las mostradas en la figura 1.

En las siguientes secciones, se presenta el análisis llevado a cabo para obtener el diagrama de bloques de Simulink del convertidor DC-DC reductor¹. El desarrollo correcto de este trabajo ha requerido llevar a cabo las siguientes tareas específicas:

1. Determinar el modelo matemático del convertidor DC-DC reductor.
2. Colocar valores de inductancia, capacitancia, y otros parámetros al modelo matemático del convertidor y verificar la operación en un voltaje de salida deseado mediante simulación en Simulink.

Figura 1.

Algunas aplicaciones de los convertidores DC-DC reductores.



¹ El desarrollo del presente artículo científico, ha permitido sentar las bases del diseño y simulación de un prototipo de unidad experimental de convertidor DC-DC reductor. Los resultados de las simulaciones de este prototipo, para diferentes escenarios de alimentación y configuración, se presentan en (Rueda-Panchano, 2022).

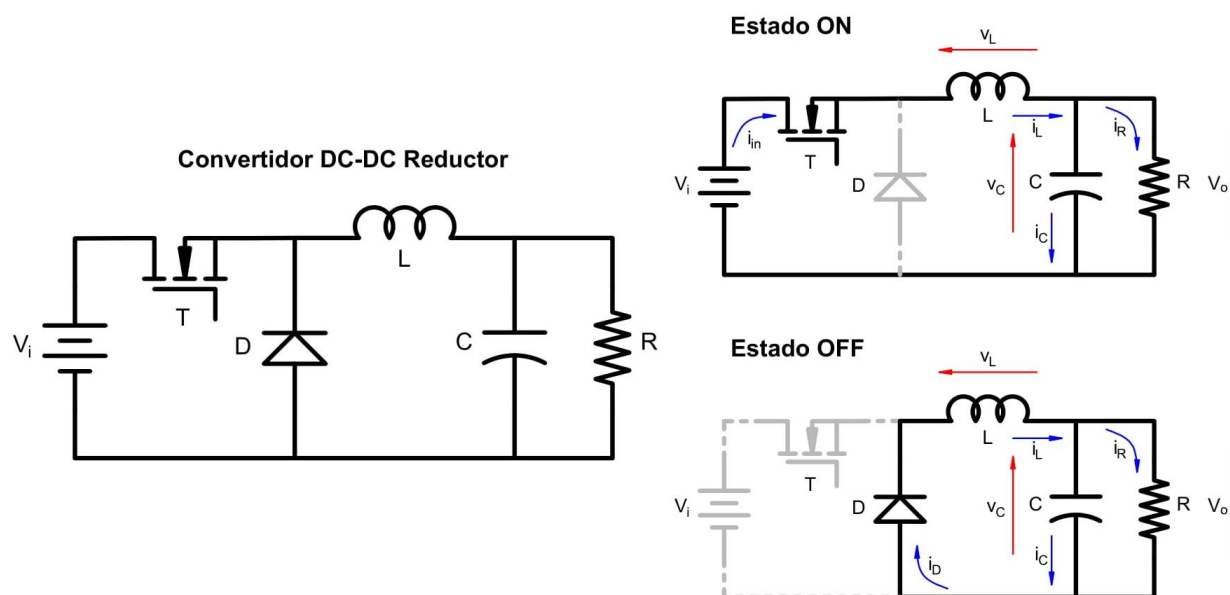
Desarrollo

Modelo matemático del convertidor DC-DC reductor

El elemento actuador del convertidor DC-DC reductor es un transistor (BJT, IGBT, MOSFET, etc.) que actúa como un interruptor de rápida conmutación, que hace que el circuito conmute entre dos estados de operación (ON u OFF) a una frecuencia establecida, tal como se indica en la figura 2. Durante la operación del convertidor, la energía se almacena e intercambia entre los elementos pasivos inductor y capacitor. De esta forma, del convertidor se obtiene un voltaje de salida continuo (V_o) en la carga que es menor que el voltaje de entrada continuo (V_i).

Figura 2.

Estados de operación del convertidor DC-DC reductor (Wikipedia contributors, 2022).



Como se puede apreciar en la figura 2, en ambos estados (ON u OFF), el convertidor se transforma en un circuito RLC. Un modelo matemático para este circuito (figura 3), permitiría predecir el comportamiento del voltaje de salida, a partir de los parámetros del circuito R , L , y C (Batard, Poitiers, Millet, & Ginot, 2012).

La Tabla 1, muestra las ecuaciones elementales (1) – (3) de los elementos pasivos de la red RLC de la figura 3. A partir de estas ecuaciones y de la Ley de Corrientes de Kirchhoff (LCK), se determina la ecuación (4), también mostrada en la Tabla 1.

Las ecuaciones (1) – (4), pueden utilizarse para representar al convertidor DC-DC reductor como un modelo matemático basado en diagrama de bloques de Simulink tomando en consideración las siguientes premisas:

- La corriente en el inductor, ecuación (1), puede representarse con un diagrama de bloques como el de la figura 4.
- La ecuación (4), voltaje de salida, corresponde al voltaje existente entre la resistencia R (carga) en paralelo con el condensador C . Esta ecuación es representada con un diagrama de bloques como el mostrado en la figura 5.

Figura 3.

Red RLC formada en ambos estados ON y OFF del convertidor DC-DC reductor.

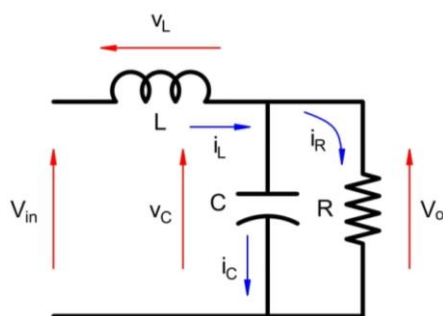


Tabla 1.

Las ecuaciones elementales del convertidor DC-DC reductor

Elemento	Ecuación de la Variable Eléctrica	No.
	$i_L = \frac{1}{L} \int (v_i - v_o) dt$	(1)
	$i_C = C \frac{dv_o}{dt}$	(2)
	$i_R = \frac{v_o}{R}$	(3)
$LCK: i_L = i_R + i_C \rightarrow i_C = i_L - i_R = C \frac{dv_o}{dt} \rightarrow v_o = \frac{1}{C} \int (i_L - i_R) dt$		
$\therefore v_o = \frac{1}{C} \int \left(i_L - \frac{V_o}{R} \right) dt$		

Figura 4.

Diagrama de bloques para la corriente del inductor (i_L).

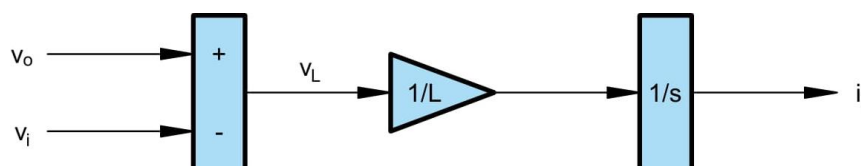
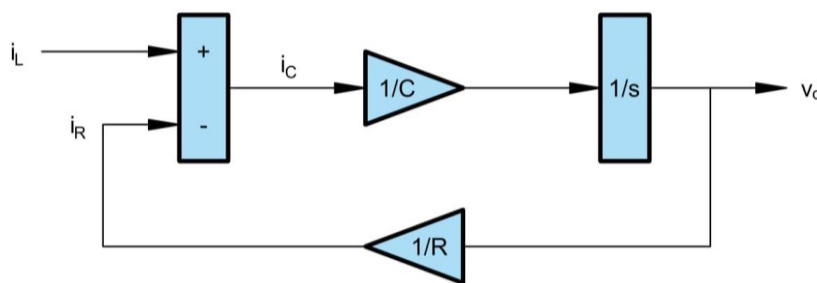


Figura 5.

Diagrama de bloques para el voltaje de salida (v_o).

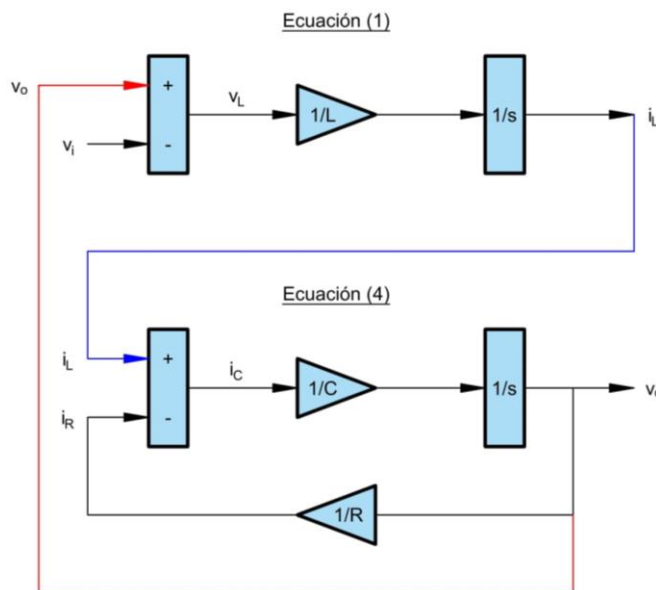


Con los diagramas de bloques de las figuras 4 y 5, encontrados para la corriente del inductor y el voltaje de salida respectivamente, se obtiene el modelo matemático del convertidor DC-DC reductor mostrado en la figura 6. Observe que este modelo considera únicamente el estado ON del convertidor, y no hay tampoco un lazo cerrado de control presente. Por lo tanto, este modelo serviría exclusivamente para el análisis² del estado ON del convertidor en lazo abierto de control.

Por otro lado, para determinar un modelo completo en lazo abierto para el convertidor DC-DC reductor, se deberían tomar en cuenta, al mismo tiempo, sus ambos estados de operación, ON y OFF. Para conseguir esto, a continuación, consideremos una nueva variable discreta “frecuencia de activado (F)” para modelar el comportamiento del interruptor (T) del convertidor. Se trata de una variable discreta de dos estados posibles, $1 \rightarrow$ interruptor encendido y $0 \rightarrow$ interruptor apagado. Esta variable debería considerarse en el diagrama de bloques indicado en la figura 6, para tomar en cuenta ambos estados de operación del convertidor, ON y OFF, al mismo tiempo. Tome en consideración, que en un software como Simulink, los dos estados lógicos 0 y 1 de la variable F, se pueden conseguir como resultado de la comparación entre una señal triangular (v_{tri}) y una señal continua ($v_{control}$), como se presenta en la figura 7.

Figura 6.

Representación en diagrama de bloques del voltaje de salida del convertidor DC-DC reductor en lazo abierto (sólo el estado ON).



² Este análisis se puede llevar a cabo usando un software que permita modelar sistemas dinámicos con diagramas de bloque, tal como Simulink de Matlab.

La ecuación del voltaje del inductor, $v_L = v_i - v_o$, también puede vincularse con el encendido y apagado del interruptor T , es decir, con la variable F . Esto se logra, introduciendo la variable F en la ecuación del voltaje del inductor (Batard et al., 2012). Esto es lo que se puede leer en la ecuación (5)³. A partir de la ecuación (5), se obtiene el modelo en diagrama de bloques de la figura 8, el mismo que puede considerarse como un modelo completo en lazo abierto para el convertidor DC-DC reductor. Sin embargo, este modelo no considera las características reales de los componentes del convertidor, por lo tanto, es un modelo que permite predecir el comportamiento *ideal* del convertidor *en lazo abierto*.

$$v_L = (v_i - v_o) * F - v_o * \bar{F} * \text{sign}(i_L) \tag{5}$$

Figura 7.

Diagrama de bloques para obtener la variable lógica F .

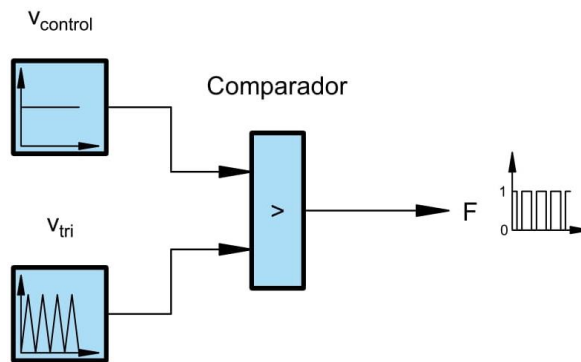
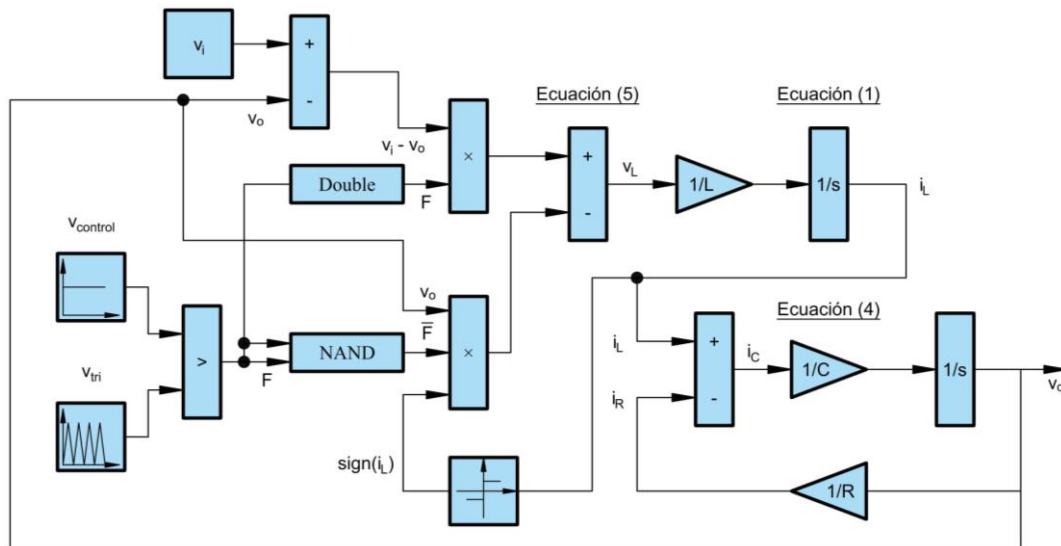


Figura 8.

Modelo completo en diagrama de bloques del convertidor DC-DC reductor en lazo abierto.



Para insertar un *lazo cerrado de control*, realimentando el voltaje de salida en el diagrama de bloques de la figura 8, se utiliza un divisor de tensión (Batard et al., 2012) que proporciona una medida proporcional (V_{mes}) del voltaje de salida DC (V_o), tal como lo indica la ecuación (6). La realimentación

³ La ecuación (5) utiliza la función $\text{sign}(i_L)$ con el fin de determinar si es el modo de conducción continua o discontinua el que el convertidor reductor tiene en un instante cualquiera de operación.

del voltaje de salida es este voltaje V_{mes} , el cual es comparado con un voltaje de referencia (V_{ref}) y así se cierra el lazo de control. El error obtenido de esta comparación es la variable de entrada para un algoritmo de control PID cuya salida viene a ser el voltaje de control ($v_{control}$) mostrado en la figura 7. Note que el ancho de pulso D de la onda de la variable lógica F , es decir, el tiempo en estado ON del interruptor T del convertidor, pasa a ser una variable que es proporcional al valor de $v_{control}$. Observe también que en estado estable el voltaje de salida se identifica con la ecuación 7.

Para el divisor de tensión antes mencionado, se asumen valores de resistencia de $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, de tal forma que V_o alcanza un valor máximo de 10 V, y V_{ref} de acuerdo a la ecuación (7), llega a un valor máximo de 5 V; así se consigue, que V_{ref} mantenga valores dentro de un rango de trabajo aceptable para un convertidor A/D de un dispositivo digital (ej. un microcontrolador).

$$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{mes} \tag{6}$$

$$V_o|_{\text{estado-estable}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} v_{ref} \tag{7}$$

La ecuación (8) es la función de transferencia de un controlador PID en la forma paralela o ISA (Clair, n.d.). Esta función de transferencia, se añade al diagrama de bloques de la figura 7, modificándolo para convertirlo en el diagrama de bloques mostrado en la figura 9.

$$\text{Transfer Function}_{PID} = K_p' \left(\frac{1 + \frac{1}{T_i' s} + T_d' s}{1 + \frac{T_d' s}{K_d}} \right) \tag{8}$$

St. Clair (Clair, n.d.) afirma que las constantes T_i' , T_d' , K_p' y K_d de la función de transferencia PID se conocen como valores “efectivos”. Las ecuaciones empleadas para calcular estas constantes se presentan en la Tabla 2 (Clair, 1993; NI, 2019). Ahora, interconectando los diagramas de bloques de las figuras 8 y 9, se obtiene el diagrama de bloques del convertidor DC-DC reductor de la figura 10, el cual permite evaluar el comportamiento del convertidor en *lazo cerrado* de control.

Figura 9.

Diagrama de bloques para implementar la función de transferencia del controlador PID.

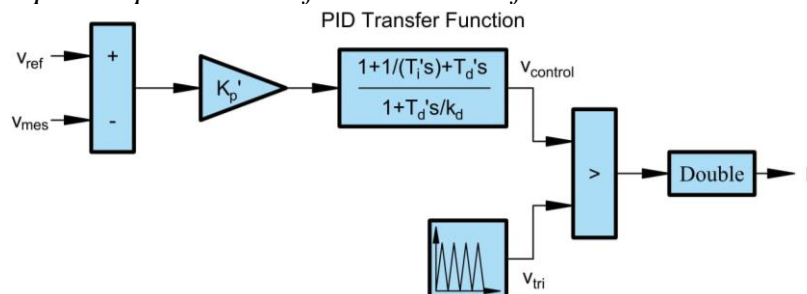


Tabla 2.

Ecuaciones de los parámetros de la función de transferencia PID.

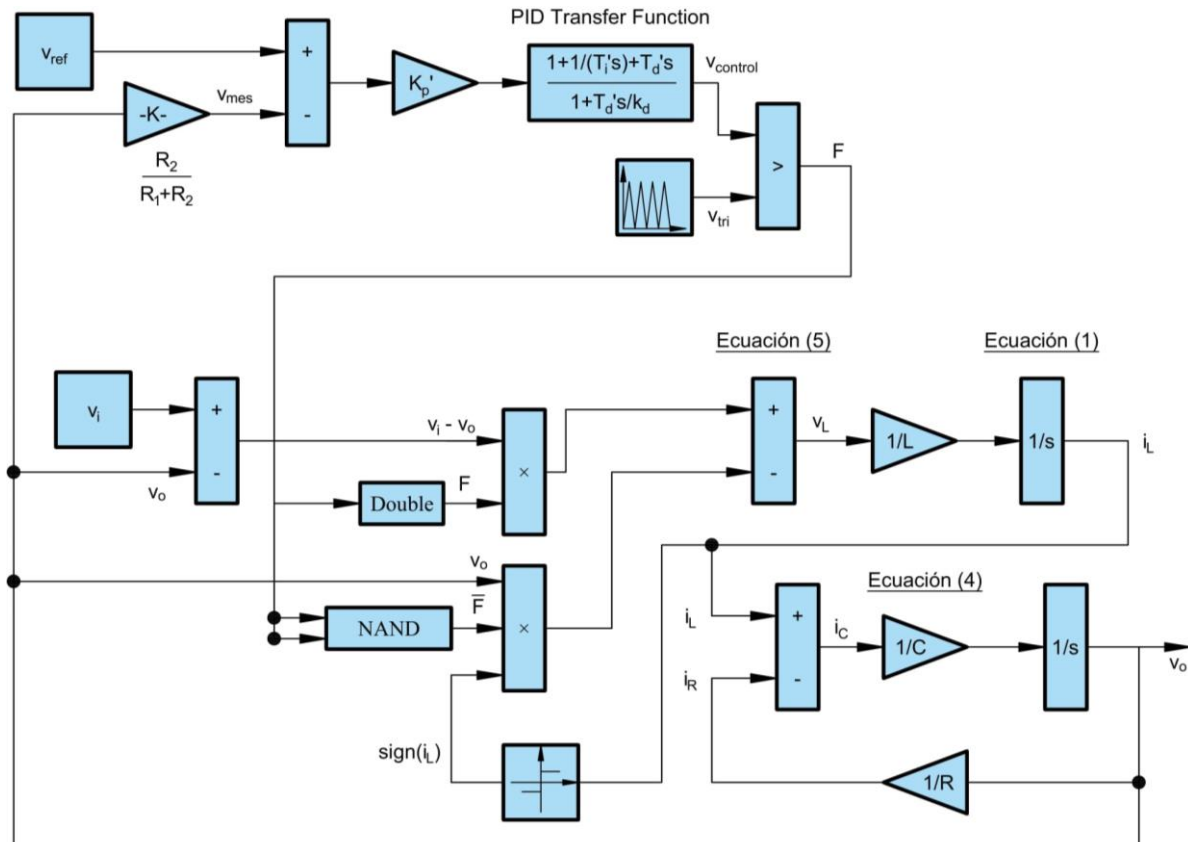
Parámetro	Ecuación	No.
Ganancia proporcional efectiva (K_p')	$K_p' = \left(\frac{T_i + T_d}{T_i}\right) K_p$	(8)
Tiempo integral efectivo (T_i')	$T_i' = T_i + T_d$	(9)
Tiempo derivativo efectivo (T_d')	$T_d' = \frac{T_i T_d}{T_i + T_d}$	(10)
Ganancia efectiva (K_d)	-	-
Ganancia proporcional (K_p)	-	-

Simulación del convertidor DC-DC reductor

Para los dos tipos de control, que son *lazo abierto* y *lazo cerrado*, se ha verificado que el comportamiento del convertidor es el esperado. La simulación del convertidor ha sido siempre en el modo de conducción continua puesto que los diagramas de bloques de las figuras 8 y 10 han sido identificados exclusivamente para este modo de operación.

Figura 10.

Modelo completo en diagrama de bloques del convertidor DC-DC reductor en lazo cerrado.



Los parámetros de simulación se muestran en la tabla 3. Estos parámetros han sido seleccionados con el método de prueba y error considerando que se desea obtener a través de las simulaciones un voltaje de salida⁴ de 12 V estables cuando se aplica al convertidor un voltaje de entrada de 24 V. Utilizando los parámetros de la tabla 3 y en base a los diagramas de bloques de Simulink mostrados en la figura 11 (para lazo abierto) y en la figura 12 (para lazo cerrado), se han obtenido los resultados de simulación que se presentan en las figuras 13 y 14, respectivamente, los cuales demuestran la estabilidad del convertidor para ambos tipos de operación, lazo abierto o lazo cerrado.

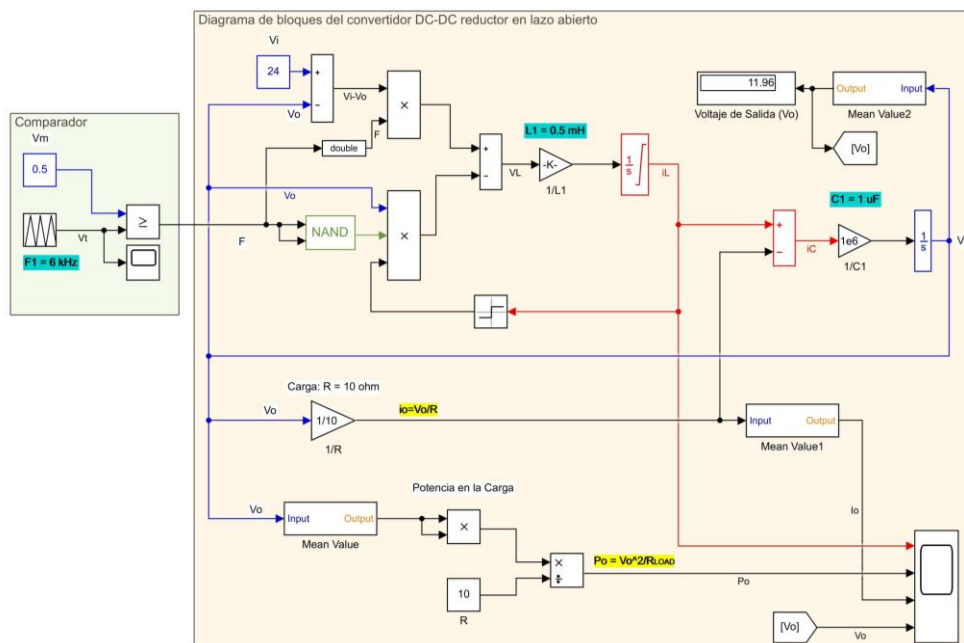
Tabla 3.

Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Inductancia (L)	0.5 μH
Capacitancia (C)	1 μF
Carga: R	10 Ω
Frecuencia (f)	6 kHz
Relación de trabajo (D)	0.5
Función de transferencia PID	$Transfer Function_{PID} = \frac{s^2 + 2s + 3}{s^2 + s}$

Figura 11.

Diagrama de bloques de Simulink del convertidor DC-DC reductor en lazo abierto.



⁴ El voltaje de salida (V_o) del convertidor reductor en conducción continua con un voltaje de entrada (V_i) se encuentra con la siguiente ecuación: $V_o = D \cdot V_i$, donde D es la relación de trabajo del convertidor.

Figura 12.

Diagrama de bloques de Simulink del convertidor DC-DC reductor en lazo cerrado.

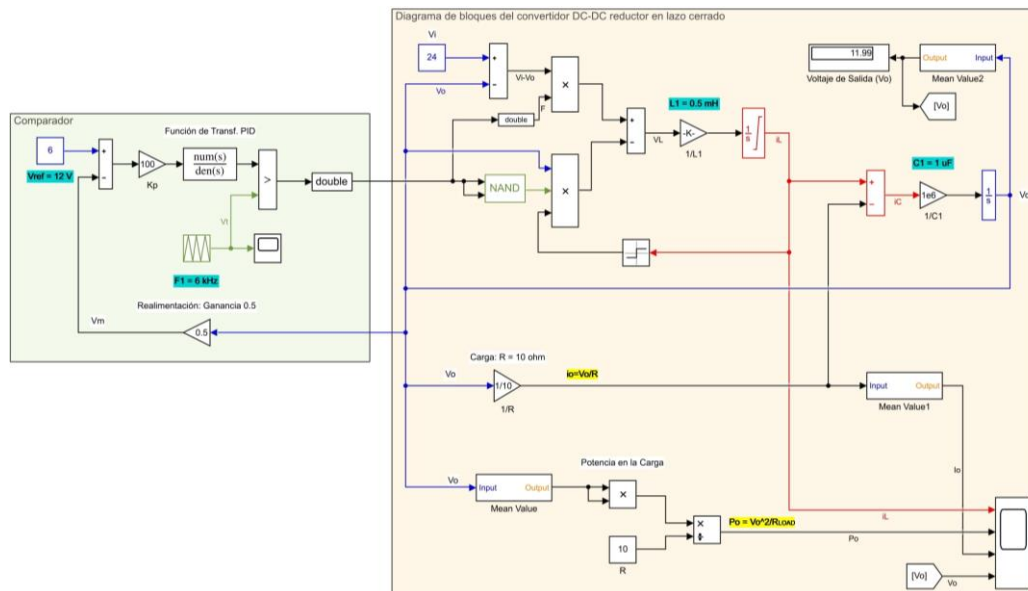


Figura 13.

Resultado de simulación obtenido con el diagrama de bloques de Simulink del convertidor DC-DC reductor en lazo abierto.

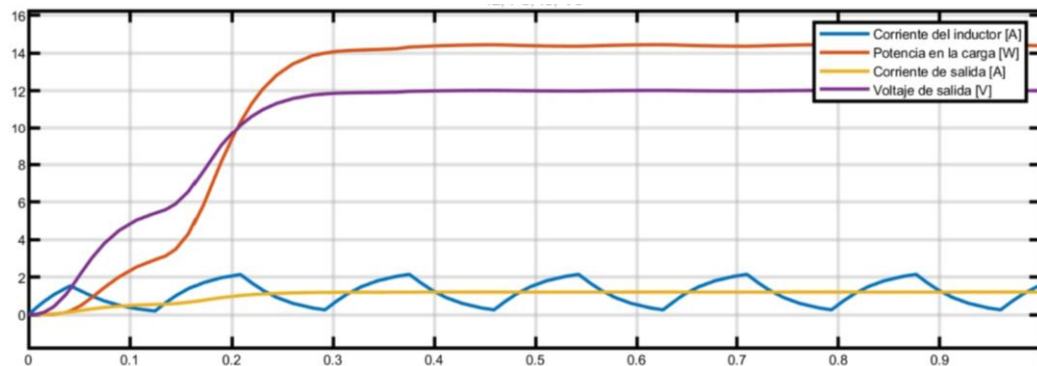
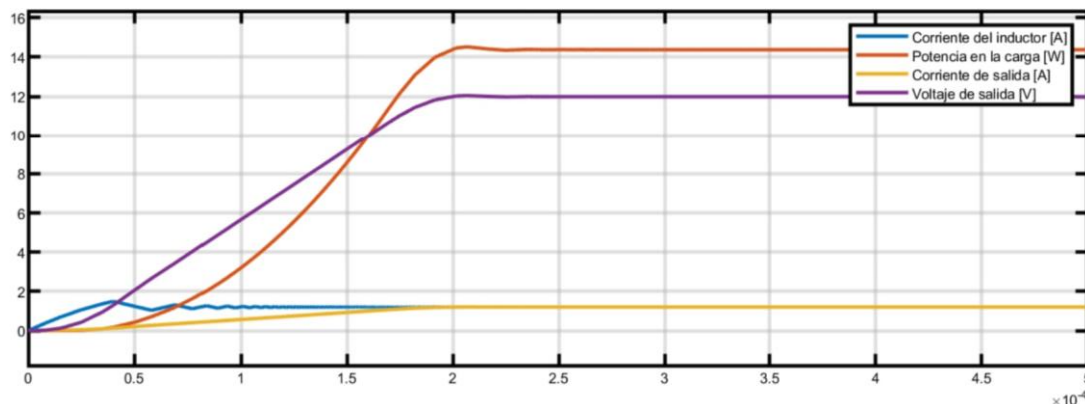


Figura 14.

Resultado de simulación obtenido con el diagrama de bloques de Simulink del convertidor DC-DC reductor en lazo cerrado.



Conclusiones

La verificación del comportamiento de convertidores DC-DC reductores a través de prototipos construidos puede consumir un tiempo significativo para el diseñador. Un modelo matemático basado en diagrama de bloques como el encontrado en el presente artículo podría ser utilizado computacionalmente para conseguir rápidamente una evaluación del convertidor bajo diferentes escenarios de operación en un tiempo mucho menor que el que se necesitaría generalmente, al emplearse prototipos construidos para evaluar los puntos de operación nominales. Si el tiempo representa costos para el diseñador, entonces la modelación de estos convertidores puede ser una herramienta necesaria para reducir los costos de desarrollo.

El presente artículo ha tenido como principal propósito desarrollar un modelo matemático de un convertidor DC-DC reductor orientado hacia herramientas computacionales accesibles como, por ejemplo, Simulink de MATLAB. De esta manera, se ha proporcionado al diseñador la habilidad de predecir el comportamiento del convertidor sin necesidad de que un prototipo sea construido sino a través del análisis de curvas en el tiempo para las cantidades eléctricas de interés (voltajes, corrientes y potencias) obtenidas por simulación. Esta nueva habilidad se aprovecha en el diseño y simulación de un convertidor DC-DC reductor, presentado en (Rueda-Panchano, 2022).

Referencias

- Batard, C., Poitiers, F., Millet, C., & Ginot, N. (2012). *Simulation of Power Converters Using Matlab-Simulink* (V. Katsikis Ed. Vol. 1). London, United Kingdom: IntechOpen.
- Clair, D. W. S. (1993). *Controller Tuning and Control Loop Performance* (2nd ed.). USA: Straight-Line Control Co., Inc.
- Clair, D. W. S. (n.d.). The PID Algorithm. Retrieved from http://www.straightlinecontrol.com/pid_algorithms.html
- Cui, C., Yan, N., Huangfu, B., Yang, T., & Zhang, C. (2021). Voltage Regulation of DC-DC Buck Converters Feeding CPLs via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 69(3), 1777-1781.
- Endo, H., Yamashita, T., & Sugiura, T. (1992, June). A high-power-factor buck converter. In *PESC'92 Record. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference* (pp. 1071-1076). IEEE.
- Ghamari, S. M., Mollae, H., & Khavari, F. (2021). Robust self-tuning regressive adaptive controller design for a DC-DC BUCK converter. *Measurement*, 174, 109071.
- Hwu, K. I., & Peng, T. J. (2011). A novel buck-boost converter combining KY and buck converters. *IEEE Transactions on power electronics*, 27(5), 2236-2241.
- Knight, D. (2015). Buck Converters and Their Cool Applications. Retrieved from <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/buck-converters-and-their-cool-applications/>
- Lin, X., Liu, J., Liu, F., Liu, Z., Gao, Y., & Sun, G. (2021). Fractional-order sliding mode approach of buck converters with mismatched disturbances. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 68(9), 3890-3900.
- Mobayen, S., Bayat, F., Lai, C. C., Taheri, A., & Fekih, A. (2021). Adaptive global sliding mode controller design for perturbed DC-DC buck converters. *Energies*, 14(5), 1249.
- NI. (2019). How to Convert PID Parameters From Gain to Time. Retrieved from <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019L5TSAU>
- Rueda-Panchano, C. I. (2022). Diseño y Simulación de un Convertidor DC-DC Reductor en Modo de Conducción Continua. Manuscript submitted for publication.