

Diseño y simulación de un convertidor DC-DC reductor en modo de conducción continua

Design and simulation of a step-down DC-DC converter in continuous conduction mode

Projeto e simulação de 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.

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.

Jury Alfredo Ramírez Toro

jury.ramirez@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8420-9463>

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

Luis Enrique Hidalgo Solórzano

luis.hidalgo@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7366-9141>

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.

RESUMEN

En este artículo, se describen el diseño y la simulación, bajo diferentes escenarios de alimentación y configuración, de un circuito convertidor DC-DC reductor. El desarrollo de este artículo se fundamenta en el trabajo realizado en (Rueda-Panchano, 2022), en donde se realizó la obtención de las ecuaciones matemáticas del circuito del convertidor DC-DC reductor y la correspondiente representación en diagrama de bloques de Simulink de estas ecuaciones (modelación). Aquello ha permitido que puedan seleccionarse en forma adecuada los elementos electrónicos para establecer los puntos de operación nominales (deseados) del diseño. Por otro lado, los resultados de simulación obtenidos, permitirían efectuar en el futuro, la construcción de un prototipo de unidad de experimentación de convertidor DC-DC reductor, lo cual se ayudaría comprender en la práctica, no solo a través de simulaciones/modelaciones, el comportamiento de este tipo de convertidor.

Palabras clave: modelación, simulación, convertidor reductor, buck converter, simulink.

ABSTRACT

In this article, it is described the design and simulation for different configurations of a step-down DC-DC converter circuit. The development of this article is based on the work carried out in (Rueda-Panchano, 2022), where were obtained the mathematical equations of the DC-DC converter and the corresponding Simulink block diagram representation of these equations (modeling). This allowed, in the current work, to select the electronic elements properly to establish the nominal (desired) operating points of the design. On the other hand, the obtained simulation results would allow to implement in the future, the construction of an experimentation prototype of a DC-DC step-down converter unit, which would allow to understand in practice, not only through simulations/modelling, the behavior of this type of converter.

Keywords: modeling, simulation, down converter, buck converter, simulink.

RESUMO

Neste artigo, são descritos o projeto e a simulação, sob diferentes cenários de alimentação e configuração, de um circuito conversor DC-DC abaixador. O desenvolvimento deste artigo é baseado no trabalho realizado no (Rueda-Panchano, 2022), onde foram obtidas as equações matemáticas do circuito conversor CC-CC e a representação do diagrama de blocos Simulink correspondente dessas equações (modelagem). Isso permitiu que os elementos eletrônicos fossem selecionados adequadamente para estabelecer os pontos de operação nominais (desejados) do projeto. Por outro lado, os resultados de simulação obtidos permitiriam, no futuro, a construção de um protótipo de uma unidade de experimentação de conversor DC-DC buck, o que nos permitiria compreender na prática, não só através de simulações/modelagem, o comportamento de este tipo de conversor.

Palavras-chave: modelagem, simulação, conversor, reductor, conversor buck, simulink.

Se asume que las condiciones mínimas de operación² en modo CCM son las siguientes:

- Potencia mínima de la carga para evitar paso de CCM a DCM: 10 W.
- Voltaje de salida mínimo: 10 V.
- Voltaje de entrada nominal: 24 V (fijos).

Con estos datos, la corriente mínima en la carga (R_L) (totalmente resistiva) en modo de conducción continua es de 1 A, tal como se calcula a continuación:

$$P_{LOAD} \geq 10 \text{ W} \rightarrow I_R|_{\min \text{ CCM}} = \frac{P_{LOAD}}{V_{LOAD}} = \frac{10 \text{ W}}{10 \text{ V}} = 1 \text{ A} \quad (1)$$

El convertidor debe limitar la corriente de carga I_R a un valor mínimo de 1 A, para evitar que éste pase del modo CCM al modo DCM. En base al cálculo anterior, se puede calcular con la ecuación (2) que una resistencia de carga variable (ej. un reóstato) con un valor máximo de 10 Ω , es necesaria para evitar el paso de conducción continua a conducción discontinua.

$$P_{LOAD} = \frac{V_{LOAD}^2}{R_L} \rightarrow R_L|_{\max \text{ CCM}} = \frac{V_{LOAD}^2}{P_{LOAD}} = 10 \Omega \quad (2)$$

Note en la figura 1, que cualquiera de los condensadores de desacoplo C_1 o C_2 tienen idealmente una corriente media de cero; por lo tanto, la corriente media en los inductores L_1 o L_2 en el límite entre el CCM y el DCM (a la cual llamamos I_{RB}), tiene el mismo valor de la corriente media en la carga, es decir, tiene un valor de 1 A.

A partir de la ecuación (3), se puede calcular la corriente media del inductor (I_{LB}) cuando la corriente en este elemento se encuentra en el límite entre la conducción continua y la conducción discontinua (figura 2). Asumiendo que F_1 es 6 kHz, se puede calcular el valor de L_1 a partir de la ecuación (3) (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009), donde I_{LB} es la corriente media en el inductor en el límite entre el CCM y el DCM, como se puede observar en la figura 2.

$$I_{LB} = \frac{DT_s}{2L} (V_{in} - V_o) \quad (3)$$

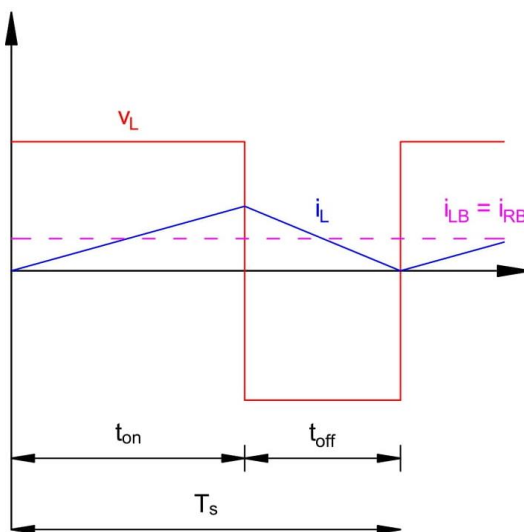
$$V_o = DV_{in} \rightarrow D = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{10}{24} = 0.416$$

$$\therefore I_{LB} = \frac{DT_s}{2L} (V_{in} - V_o) \rightarrow L = L_1 = \frac{DT_s (V_{in} - V_o)}{I_{LB} (2)} = \frac{0.416(24 - 10)}{6000(1)(2)} = 0.485 \text{ mH}$$

² Las condiciones mínimas de operación corresponden a aquellas a las que el convertidor opera cuando se encuentra cerca del límite entre el modo de conducción discontinua (DCM) y el modo de conducción continua, o en otras palabras, cuando se encuentra muy próximo a entrar al modo de conducción crítica (CRM).

Figura 2

Formas de onda de la corriente y el voltaje en el inductor en el límite entre la conducción continua y la discontinua.

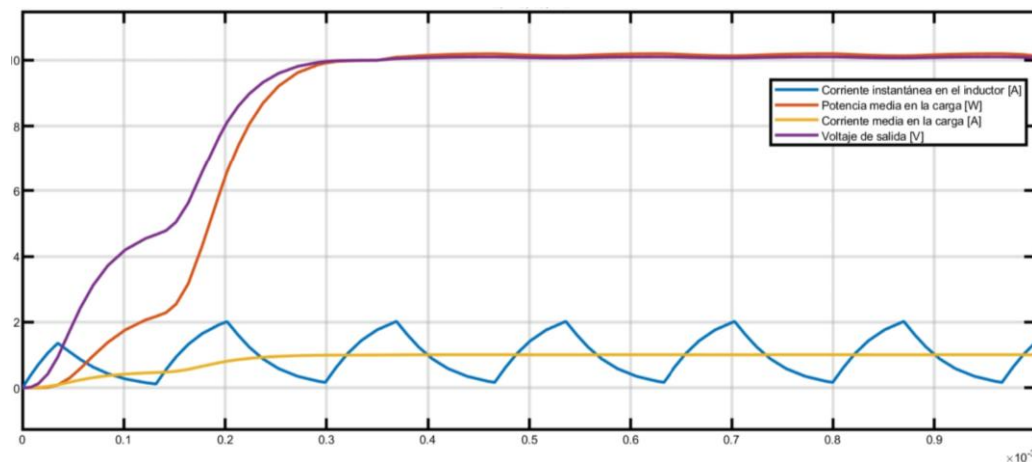


Se ha determinado un valor para L_l de 0.485 mH, el cual se redondea a 0.5 mH. De esta manera, los parámetros de operación $F_l = 6$ kHz y $L_l = 0.5$ mH pasan a ser los parámetros mínimos o críticos para mantener al convertidor DC-DC reductor en el modo de conducción continua.

Las curvas indicadas en la figura 3, se obtienen al simular el diagrama de bloques de Simulink del convertidor en lazo abierto con los parámetros mínimos antes mencionados ($F_l = 6$ kHz, $L_l = 0.5$ mH, $R_L = 10 \Omega$), Se han asumido $C_l = 1 \mu\text{F}$ y un voltaje de entrada (V_i) de 24 V. Estas curvas muestran el comportamiento dinámico de la potencia media en la carga, el voltaje de salida, y las corrientes instantánea y media del inductor, demostrando que el convertidor opera en el límite entre la conducción continua y la conducción discontinua, como es lo esperado, cuando los parámetros mínimos de operación, anteriormente mencionados, son los elegidos.

Figura 3

Corrientes y potencia de salida en el modo de conducción crítica.



Para determinar el resto de parámetros del convertidor, es decir, L_2 , C_2 , F_2 y F_3 , se toman en consideración las siguientes premisas que garantizarían el modo CCM a pesar de cambios en los parámetros de operación:

- $L_2 > L_1 \rightarrow$ Se obtiene mayor amortiguamiento de la corriente del inductor (se mantiene el modo CCM).
- $F_3 > F_2 > F_1 \rightarrow$ La corriente en el inductor tiene periodos pequeños (se mantiene el modo CCM).

Por lo tanto, se asumen los valores $L_2 = 2.2 \text{ mH}$, $F_2 = 10 \text{ kHz}$ y $F_3 = 14 \text{ kHz}$ para garantizar que el convertidor reductor se mantenga operando en el modo de conducción continua, sea cual sea su configuración, siempre y cuando la corriente en la carga no sea menor a 1 A, es decir, no sea R_L mayor que 10Ω . En cuanto a los capacitores, estos tienen la función de filtrar componentes de alta frecuencia en la onda del voltaje de salida, por lo cual, se asumen valores arbitrarios de capacitancia de $C_1 = 1 \mu\text{F}$ y $C_2 = 22 \mu\text{F}$.

Los parámetros encontrados, se han agrupado en la Tabla 1. La figura 4, muestra el circuito del módulo experimental mostrando los valores de componentes del circuito de acuerdo a la Tabla 1.

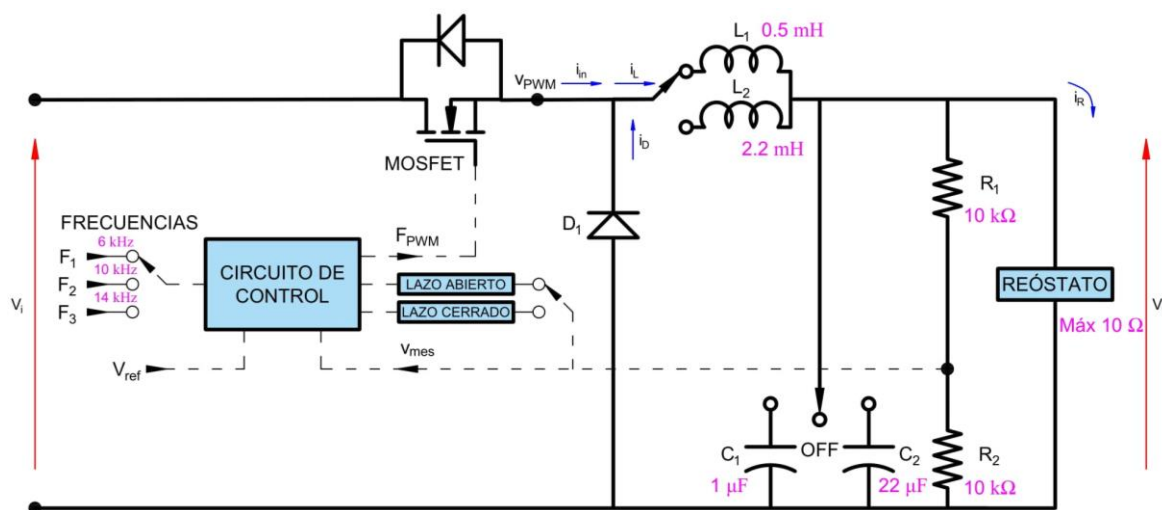
Tabla 1

Parámetros del circuito del convertidor DC-DC reductor.

L_1	L_2	C_1	C_2	PWM Frequency
0.5 mH	2.2 mH	1 μF	22 μF	$F_1 < F_2 < F_3$

Figura 4

Circuito del convertidor DC-DC reductor (módulo experimental).



Sintonización del controlador PID del convertidor DC-DC reductor.

Los parámetros de la función de transferencia del controlador PID (ver (Rueda-Panchano, 2022)) deben ser sintonizados para alcanzar las especificaciones deseadas de respuesta en el tiempo como son el máximo sobreimpulso y el tiempo de establecimiento (Ogata, 2010). En la sintonización se hacen cambios a las constantes de la función de transferencia del controlador, hasta obtener las especificaciones de diseño deseadas. Estas especificaciones son indicadas en la Tabla 2.

La sintonización se realiza en el límite entre conducción continua y discontinua, es decir, usando los parámetros críticos de operación: $V_i = 24 \text{ V}$, $V_o = 10 \text{ V}$, $R_{LOAD} = 10 \Omega$, $F_1 = 6 \text{ kHz}$, $L_1 = 0.5 \text{ mH}$ y $C_1 = 1 \mu\text{F}$.

Tabla 2

Especificaciones deseadas de la respuesta en el tiempo.

Tiempo de establecimiento (t_s)	Máximo sobreimpulso (M_p)
Menor que 2 ms	Menor al 60 %

Se asume que el controlador PID tiene una ganancia proporcional $K_p = 10$ y posteriormente, se toman en cuenta las siguientes recomendaciones de acuerdo a (Clair, 1993, n.d.; NI, 2019):

- T_i es de 4 a 8 veces T_d .
- K_d se encuentra en el siguiente rango: $6 \leq K_d \leq 10$
- A mayor T_i , más lenta es la respuesta del controlador.
- La salida (o respuesta) del controlador se incrementa si se incrementa T_d .
- $K_d = K_p \cdot T_d$.

Se asumen, $K_p = 10$ y $K_d = 6$. Luego, las constantes seleccionadas y la función de transferencia del controlador PID se determinan a partir del siguiente cálculo:

$$K_d = K_p T_d \rightarrow T_d = \frac{K_d}{K_p} = 0.6$$

$$T_i = 4T_d = 2.4$$

$$K_p' = \left(\frac{T_i + T_d}{T_i} \right) K_p = 12.5$$

Y así la función de transferencia del controlador PID pasa a ser la siguiente:

$$\text{Transfer Function}_{PID} = \frac{75s^2 + 156.25s + 52.0833}{s^2 + 12.5s} \quad (4)$$

El diagrama de bloques de Simulink del convertidor DC-DC reductor en lazo cerrado se obtiene en (Rueda-Panchano, 2022). A este diagrama de bloques se le incorpora la ecuación (4) correspondiente al modelo matemático del controlador PID obteniéndose el diagrama de bloques final mostrado en la figura 5. Usando el diagrama de bloques de la figura 5, se obtiene en Simulink la respuesta en el tiempo del voltaje de salida (V_o) que se presenta en la figura 6, usando como parámetros del convertidor los valores críticos $F_l = 6$ kHz, $L_l = 0.5$ mH, $C_l = 1$ μ F y $R_L = 10$ Ω , y además $V_i = 24$ V y un setpoint de 10 V. Puede observar en la figura 6, que las especificaciones de comportamiento deseadas t_s y M_p se están consiguiendo con los parámetros mínimos de operación elegidos.

Figura 5

Diagrama de bloques de Simulink del convertidor DC-DC reductor en lazo cerrado con los parámetros de operación mínimos.

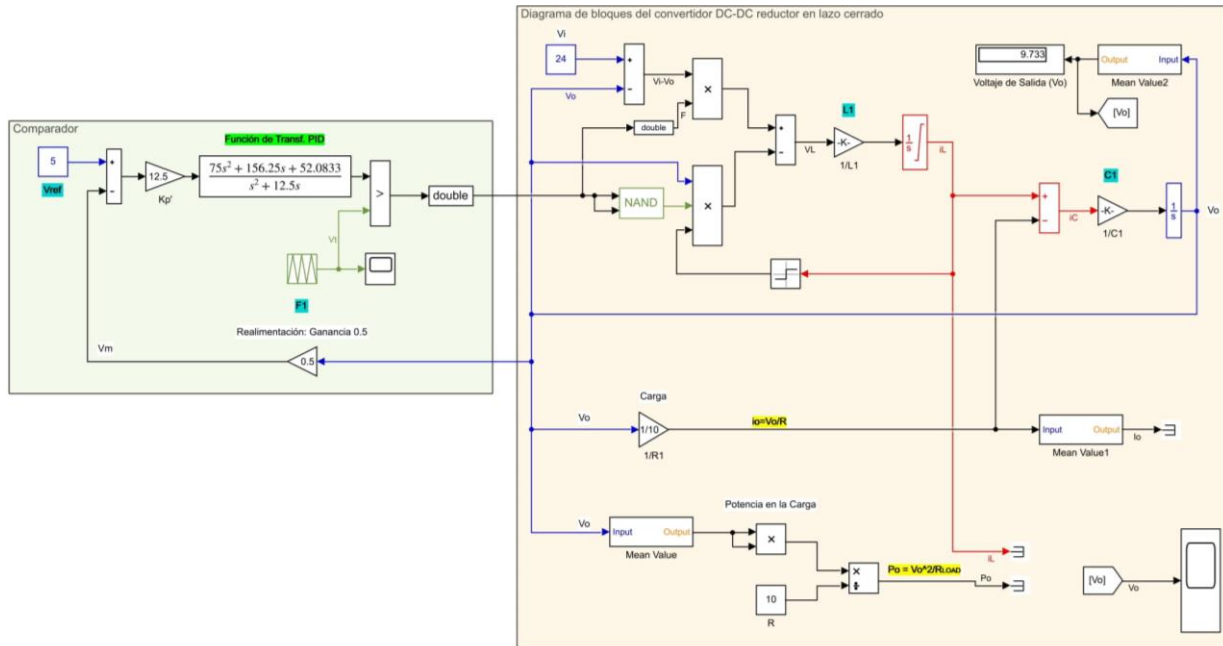
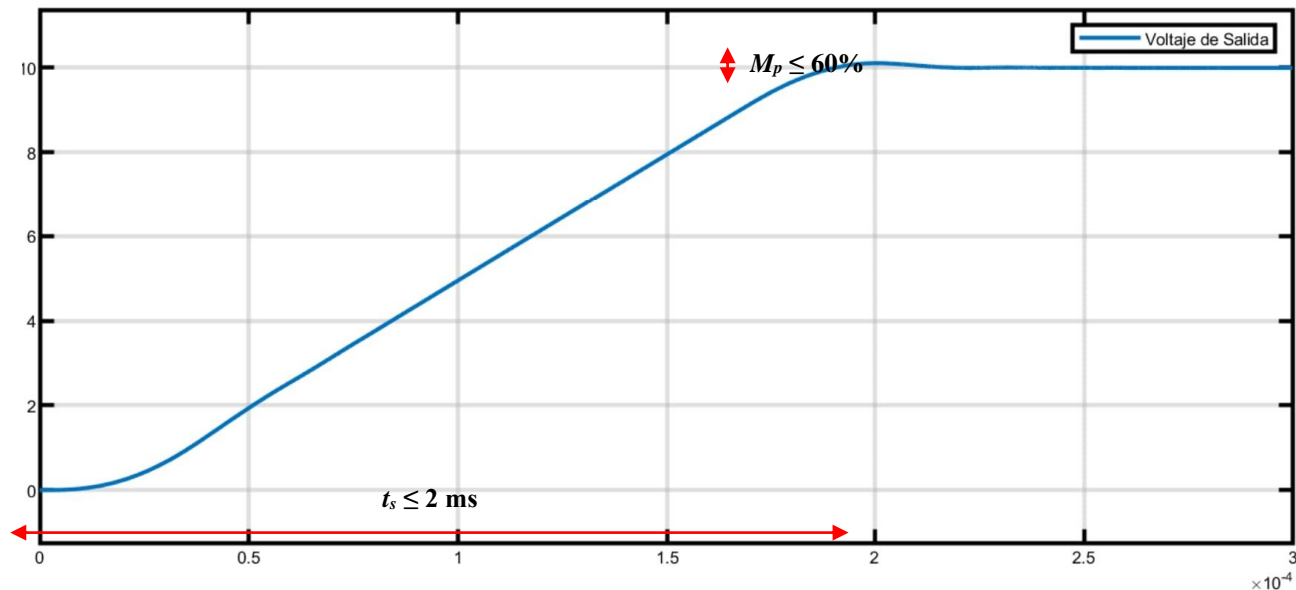


Figura 6

Respuesta del voltaje de salida con parámetros del convertidor: $F_1 = 6 \text{ kHz}$, $L_1 = 0.5 \text{ mH}$, $C_1 = 1 \text{ uF}$, $R_L = 10 \text{ ohm}$, $V_i = 24 \text{ V}$, Setpoint = 10V.



Validación del comportamiento dinámico (especificaciones de diseño) con Simulink

Para verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño con Simulink se han hecho simulaciones utilizando el diagrama de bloques de la figura 5. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos de especificaciones de comportamiento como son el tiempo de establecimiento (t_s) y el

máximo sobreimpulso (M_p). Se aprecia en esta tabla, que en las doce configuraciones posibles para el convertidor DC-DC reductor, las especificaciones de comportamiento t_s y M_p se encuentran dentro de los límites deseados señalados por la Tabla 2. A continuación, se evalúan las configuraciones 2 y 3 de la Tabla 4³ para validar las especificaciones t_s y M_p de las respuestas en el tiempo del convertidor bajo estas dos configuraciones.

Las figuras 7 y 8 presentan las respuestas en el tiempo del voltaje de salida en lazo cerrado para las configuraciones 2 y 3, respectivamente. En el caso de la configuración 2, la respuesta es subamortiguada siendo el M_p cercano al 54 % mientras que el t_s tiene un valor aproximado de 0.48 ms. Por otro lado, para la configuración 3 la respuesta es sobreamortiguada y el t_s es inferior, colocándose en un valor de 0.27 ms. Observe que los resultados obtenidos están dentro de los límites elegidos mostrados en la Tabla 2.

En las figuras 9 y 10, obtenidas para las configuraciones 2 y 3 respectivamente, se comprueba que el controlador PID mantiene la estabilidad del convertidor DC-DC reductor, para un setpoint de 10V, ante cambios en la carga desde 10 Ω hasta 3 Ω . Finalmente, las figuras 11 y 12 presentan el comportamiento de la corriente de salida en lazo cerrado para las configuraciones 2 y 3, respectivamente. Note que en ambas configuraciones la corriente se estabiliza rápidamente cuando la carga cambia de pronto de 10 Ω a 3 Ω .

Tabla 3

Configuraciones posibles para el convertidor DC-DC reductor.

Configuración	V_i [V]	Setpoint: $V_o=2 \cdot V_{REF}$ [V]	Frecuencia			Inductancia		Capacitancia		<i>Especificaciones de diseño obtenidas con las constantes seleccionadas: $T_i = 2.4$ s, $T_d = 0.6$ s, $K_p = 10$, $K_d = 6$.</i>	
			$F_1 = 6$ [kHz]	$F_2 = 10$ [kHz]	$F_3 = 14$ [kHz]	$L_1 = 0,5$ [mH]	$L_2 = 2,2$ [mH]	$C_1 = 1$ [μ F]	$C_2 = 22$ [μ F]	t_s [s]	M_p [%]
1	24	10	X	-	-	X	-	X	-	0,00019	1
2	24	10	X	-	-	X	-	-	X	0,000471	53,8
3	24	10	X	-	-	-	X	X	-	0,000271	0
4	24	10	X	-	-	-	X	-	X	0,00105	38,3
5	24	10	-	X	-	X	-	X	-	0,000188	1,06
6	24	10	-	X	-	X	-	-	X	0,000472	53,8
7	24	10	-	X	-	-	X	X	-	0,000275	0
8	24	10	-	X	-	-	X	-	X	0,00105	38,3
9	24	10	-	-	X	X	-	X	-	0,0019	1,1
10	24	10	-	-	X	X	-	-	X	0,000196	53,8
11	24	10	-	-	X	-	X	X	-	0,000294	0
12	24	10	-	-	X	-	X	-	X	0,00106	37,5

Nota. Especificaciones de la respuesta en el tiempo del voltaje de salida (V_o) en lazo cerrado: $t_s \leq 0,002$ s; $M_p \leq 60$ %.

³ Configuración 2: $F_1 = 6$ kHz, $L_1 = 0.5$ mH, y $C_2 = 22$ μ F, $V_i = 24$ V, $V_o = 10$ V. Configuración 3: $F_1 = 6$ kHz, $L_2 = 2.2$ mH, y $C_1 = 1$ μ F, $V_i = 24$ V, $V_o = 10$ V.

Figura 7

Verificación de las especificaciones de comportamiento del voltaje de salida del convertidor reductor con la configuración 2.

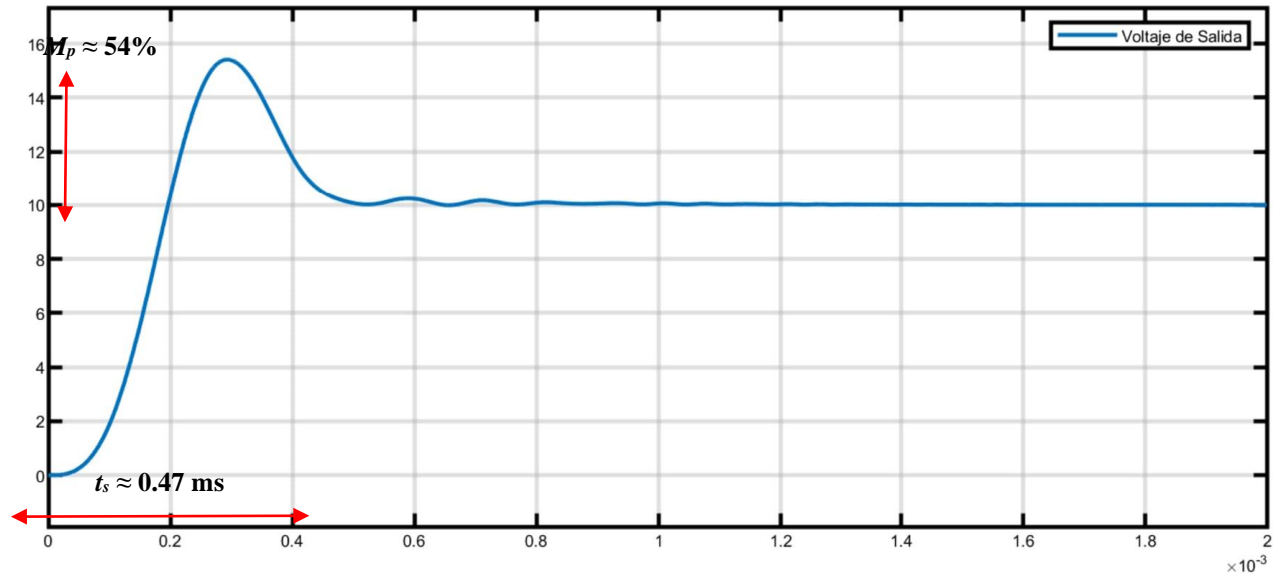


Figura 8.

Verificación de las especificaciones de comportamiento del voltaje de salida del convertidor reductor con la configuración 3.

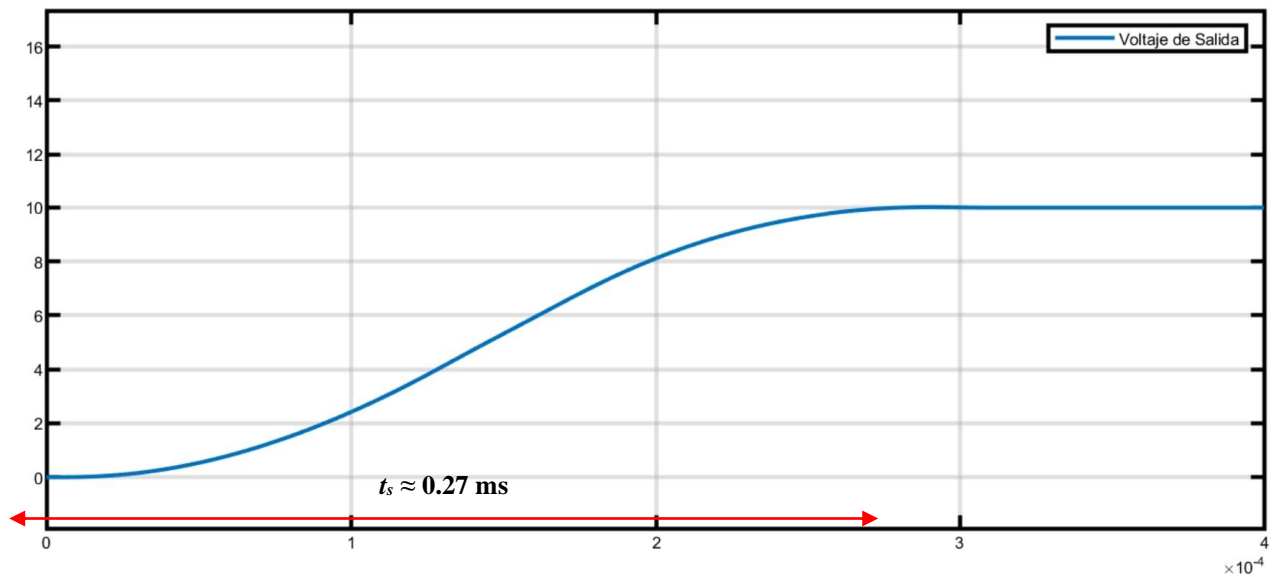


Figura 9

Verificación del comportamiento del voltaje de salida ante cambios en la carga (configuración 2).

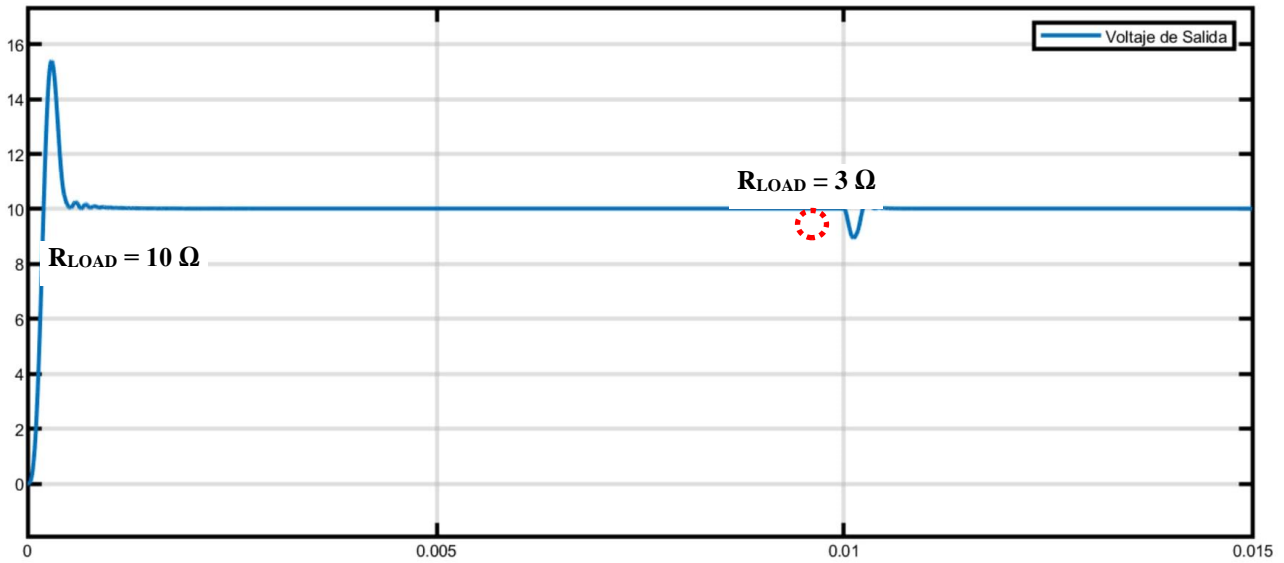


Figura 10

Verificación del comportamiento del voltaje de salida ante cambios en la carga (configuración 3).

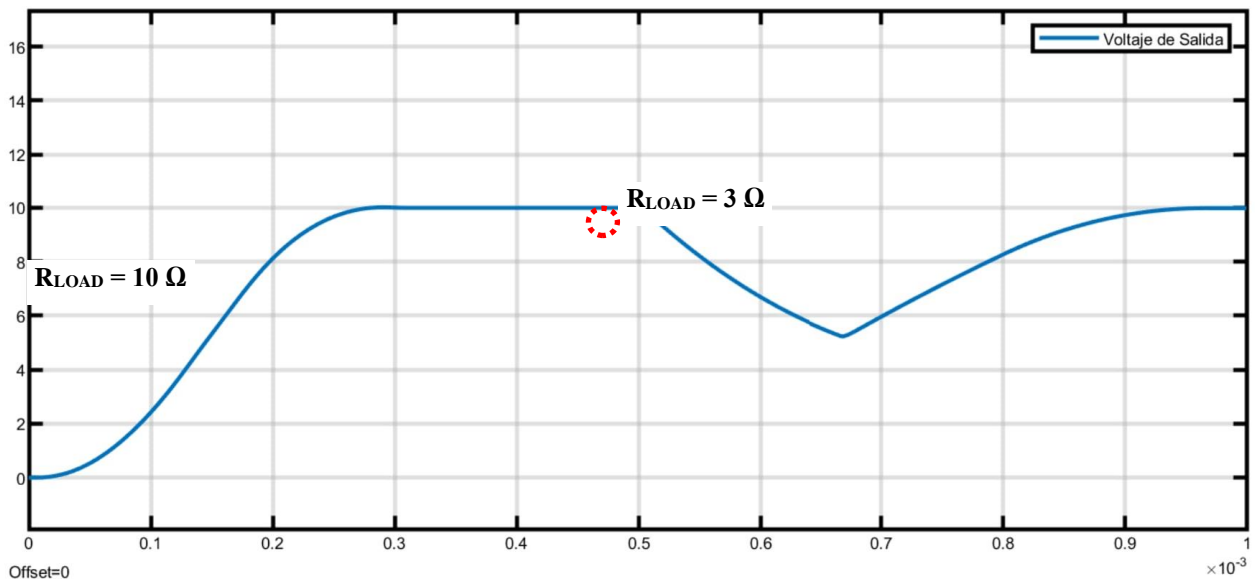


Figura 11

Comportamiento de la corriente de salida ante cambios en la carga (configuración 2).

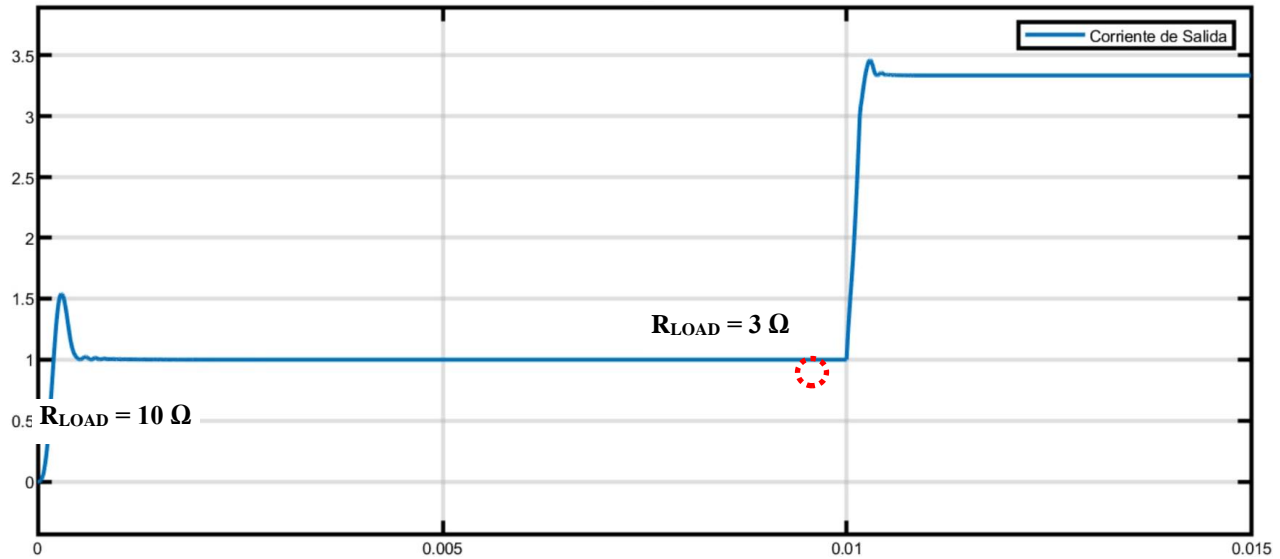
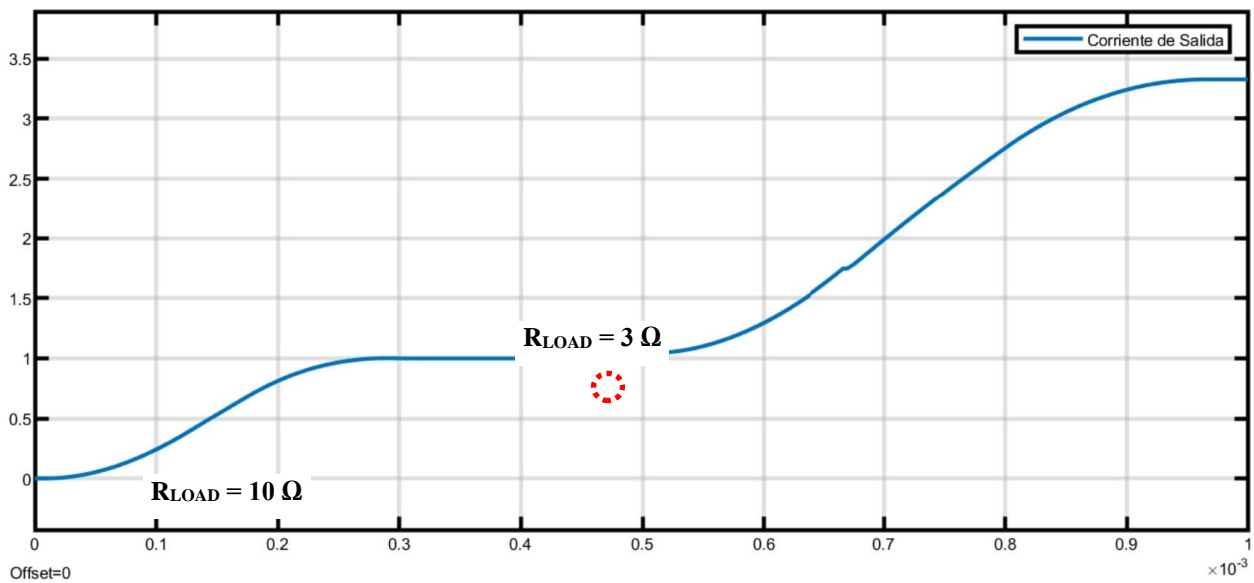


Figura 12

Comportamiento de la corriente de salida ante cambios en la carga (configuración 3).



Conclusiones

En esta investigación se ha realizado la modelación (ver referencia (Rueda-Panchano, 2022)), así como también el diseño y la simulación de un convertidor DC-DC reductor. Abordando el diseño y la simulación del convertidor a través del uso de diagrama de bloques de Simulink, se ha podido observar un método intuitivo de diseño que ofrece la posibilidad de colocar parámetros a las ecuaciones del modelo para chequear rápidamente el comportamiento dinámico del convertidor bajo diferentes configuraciones o escenarios de operación.

En el futuro, con los resultados obtenidos en la presente investigación, es posible llevar a cabo en forma precisa la evaluación de las cantidades eléctricas presentes en un módulo construido

(experimental) basado en el circuito del convertidor DC-DC reductor mostrado en la figura 4. Este módulo, colocado en un laboratorio permitiría llevar a cabo importantes experimentos prácticos que le den la posibilidad a un estudiante de contrastar o validar las simulaciones hechas en computadora con los datos de voltajes, corrientes, y potencias obtenidas a través de instrumentos reales de medición conectados al módulo.

Referencias

- Amir, A., Amir, A., Che, H. S., Elkhateb, A., & Abd Rahim, N. (2019). Comparative analysis of high voltage gain DC-DC converter topologies for photovoltaic systems. *Renewable energy*, *136*, 1147-1163.
- 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
- Fan, X., Sun, H., Yuan, Z., Li, Z., Shi, R., & Ghadimi, N. (2020). High voltage gain DC/DC converter using coupled inductor and VM techniques. *IEEE Access*, *8*, 131975-131987.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de Potencia: Convertidores, Aplicaciones y Diseño* (3rd Ed.): McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V.
- NI. (2019). How to Convert PID Parameters From Gain to Time. Retrieved from <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019L5TSAU>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (5th ed.). Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Rueda-Panchano, C. I. (2022). Modelación de un Convertidor DC-DC Reductor en Modo de Conducción Continua. *Manuscript submitted for publication*.
- Raghavendra, K. V. G., Zeb, K., Muthusamy, A., Krishna, T. N. V., Kumar, S. V. P., Kim, D. H., ... & Kim, H. J. (2019). A comprehensive review of DC-DC converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic systems. *Electronics*, *9*(1), 31.
- Shahir, F. M., Babaei, E., & Farsadi, M. (2018). Extended topology for a boost DC-DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *34*(3), 2375-2384.
- Ye, H., Jin, G., Fei, W., & Ghadimi, N. (2020). High step-up interleaved dc/dc converter with high efficiency. *Energy sources, Part A: recovery, utilization, and environmental effects*, 1-20.
- Wang, H., Gaillard, A., & Hissel, D. (2019). A review of DC/DC converter-based electrochemical impedance spectroscopy for fuel cell electric vehicles. *Renewable Energy*, *141*, 124-138.