



Modelado predictivo del rendimiento de convertidores DC-DC utilizando técnicas de regresión multivariable en R

Predictive modeling of DC-DC converter performance using multivariate regression techniques in R

Modelagem preditiva do desempenho do conversor DC-DC usando técnicas de regressão multivariada em R

Víctor Manuel Flores-Andino ^I

victor.flores@istcarloscisneros.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5686-6864>

Alfredo Israel Paredes-Regalado ^{II}

israel.paredes@istcarloscisneros.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0009-2429-1133>

Juan José Pérez-Insuasti ^{III}

jperez_i@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4825-1269>

Correspondencia: victor.flores@istcarloscisneros.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 10 de mayo de 2025 * **Aceptado:** 15 de junio de 2025 * **Publicado:** 28 de julio de 2025

- I. Ingeniero en Electrónica y Control, Docente del Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, Carrera de Electrónica en Automatización y Telecomunicaciones, Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero en Electrónica y Control, Magister en Automatización y Control Electrónico Industrial, Docente del Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, Carrera de Tecnología Superior en Mecatrónica, Riobamba, Ecuador.
- III. Ingeniero en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes, Magister en Sistemas de Telecomunicaciones, Profesional de Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba, Ecuador.

Resumen

Se desarrolla un modelo de alta precisión para caracterizar y predecir el comportamiento de estos convertidores bajo diversas condiciones operativas, para optimizar parámetros de diseño y estimar métricas de desempeño. La metodología combina diseño experimental sistemático, simulaciones controladas y técnicas estadísticas avanzadas. Se analizan cinco topologías de convertidores bidireccionales sin aislamiento. Los factores considerados incluyen voltaje de entrada y salida, corriente de carga, eficiencia energética, frecuencia de conmutación, ciclo de trabajo, rizado de corriente y voltaje, y potencia. Para cada topología, se calcularon valores iniciales utilizando fórmulas establecidas, se realizaron simulaciones y se contrastaron con mediciones de laboratorio. Posteriormente, se aplicaron técnicas de regresión multivariable en R para analizar relaciones entre variables y desarrollar modelos predictivos. Los resultados muestran las características distintivas de cada topología, incluyendo eficiencia, regulación de voltaje, tiempo de respuesta y comportamiento del rizado. Se generaron gráficas que relacionan el voltaje de entrada, voltaje de salida y valores de inductancia para cada convertidor, permitiendo visualizar relaciones complejas entre variables. Se concluye que, los convertidores Ćuk y SEPIC ofrecen mejor eficiencia y control de voltaje, mientras que el Buck presenta mejor respuesta transitoria. El enfoque predictivo desarrollado proporciona mayor eficiencia en el diseño inicial, optimización avanzada y análisis de sensibilidad, facilitando la selección de componentes y configuraciones óptimas sin necesidad de extensas simulaciones o prototipos prematuros.

Palabras Clave: Convertidores DC-DC; regresión multivariable; modelado predictivo; electrónica de potencia; optimización paramétrica.

Abstract

A high-precision model is developed to characterize and predict the behavior of these converters under various operating conditions, thus optimizing design parameters and estimating performance metrics. The methodology combines systematic experimental design, controlled simulations, and advanced statistical techniques. Five non-isolated bidirectional converter topologies are analyzed. Factors considered include input and output voltage, load current, energy efficiency, switching frequency, duty cycle, current and voltage ripple, and power. For each topology, initial values were calculated using established formulas, simulations were performed, and these were compared with

laboratory measurements. Multivariate regression techniques in R were subsequently applied to analyze relationships between variables and develop predictive models. The results show the distinctive characteristics of each topology, including efficiency, voltage regulation, response time, and ripple behavior. Plots relating input voltage, output voltage, and inductance values were generated for each converter, allowing the visualization of complex relationships between variables. It is concluded that the Ćuk and SEPIC converters offer better efficiency and voltage control, while the buck converter offers better transient response. The developed predictive approach provides greater efficiency in the initial design, advanced optimization, and sensitivity analysis, facilitating the selection of optimal components and configurations without the need for extensive simulations or premature prototyping.

Keywords: DC-DC converters; multivariate regression; predictive modeling; power electronics; parametric optimization.

Resumo

Um modelo de alta precisão é desenvolvido para caracterizar e prever o comportamento desses conversores sob várias condições operacionais, otimizando assim os parâmetros de projeto e estimando métricas de desempenho. A metodologia combina projeto experimental sistemático, simulações controladas e técnicas estatísticas avançadas. Cinco topologias de conversores bidirecionais não isolados são analisadas. Os fatores considerados incluem tensão de entrada e saída, corrente de carga, eficiência energética, frequência de chaveamento, ciclo de trabalho, ondulação de corrente e tensão e potência. Para cada topologia, os valores iniciais foram calculados usando fórmulas estabelecidas, simulações foram realizadas e estas foram comparadas com medições de laboratório. Técnicas de regressão multivariada em R foram posteriormente aplicadas para analisar as relações entre as variáveis e desenvolver modelos preditivos. Os resultados mostram as características distintas de cada topologia, incluindo eficiência, regulação de tensão, tempo de resposta e comportamento de ondulação. Gráficos relacionando a tensão de entrada, a tensão de saída e os valores de indutância foram gerados para cada conversor, permitindo a visualização de relações complexas entre as variáveis. Conclui-se que os conversores Ćuk e SEPIC oferecem melhor eficiência e controle de tensão, enquanto o conversor buck oferece melhor resposta transitória. A abordagem preditiva desenvolvida proporciona maior eficiência no projeto

inicial, otimização avançada e análise de sensibilidade, facilitando a seleção de componentes e configurações ideais sem a necessidade de simulações extensas ou prototipagem prematura.

Palavras-chave: Conversores CC-CC; regressão multivariada; modelagem preditiva; eletrônica de potência; otimização paramétrica.

Introducción

Los convertidores de corriente continua a corriente continua (DC-DC) (Ravindran y Massoud, 2025), constituyen componentes fundamentales en numerosos sistemas electrónicos modernos (Puppala et al., 2025), desde dispositivos portátiles y vehículos eléctricos, hasta sistemas de energía renovable y aplicaciones industriales (Hao et al., 2025) (Zentani et al., 2025) (Subramaniam et al., 2025) (Gao et al., 2025) (Subramaniam et al., 2025). Estos convertidores permiten adaptar niveles de tensión y corriente de manera eficiente, cumpliendo requisitos específicos en cada aplicación (Kevat et al., 2025) (Nayak et al., 2025). Sin embargo, el comportamiento de los convertidores DC-DC, está influenciado por múltiples parámetros interrelacionados, lo que hace que la predicción precisa de su rendimiento bajo diversas condiciones de operación, sea un desafío complejo para diseñadores e ingenieros (Hinov et al., 2025) (Li et al., 2025) (Coelho et al., 2025) (Guo et al., 2025).

Tradicionalmente, el diseño y optimización de convertidores DC-DC ha dependido de modelos analíticos simplificados, simulaciones computacionales intensivas o extensas pruebas de laboratorio (Chivelet et al., 2024) (Ghazizadeh et al., 2024) (Richard et al., 2022) (Teodorescu, 2022). Estos enfoques, aunque valiosos, presentan limitaciones significativas: los modelos analíticos suelen incorporar aproximaciones que reducen su precisión, las simulaciones detalladas requieren considerable tiempo computacional, y las pruebas experimentales son costosas y consumen recursos (Yanarateş et al., 2024) (Silva-Vera et al., 2024) (Dini y Saponara, 2024) (Gupta et al., 2024) (Guda y Zimoglyad, 2021). En este contexto, surge la necesidad de desarrollar metodologías alternativas que combinen precisión, eficiencia computacional y capacidad de generalización.

Se precisan diversos enfoques para la caracterización y modelado de convertidores DC-DC. Shang et al. (2023) han empleado técnicas de aprendizaje automático para predecir la eficiencia energética, mientras que Hamad, et al. (2025) investigaron modelos paramétricos para estimar respuestas transitorias. Sin embargo, pocos estudios han abordado simultáneamente múltiples

métricas de rendimiento, o han comparado sistemáticamente la eficacia de diferentes técnicas de regresión en este contexto. Además, la aplicabilidad de estos modelos a topologías bidireccionales permanece relativamente inexplorada.

Es por eso que, el presente estudio propone un enfoque innovador basado en técnicas estadísticas avanzadas para modelar el comportamiento de convertidores DC-DC bidireccionales sin aislamiento. Específicamente, en las topologías Buck, Boost, Buck/Boost (Menzi et al., 2024) (Aeggegn et al., 2024) (Hosseinpour, 2024) (Khan et al., 2023), Cuk y Sepic, que son ampliamente utilizadas en aplicaciones donde se requiere flujo bidireccional de energía. El uso de técnicas de regresión multivariable implementadas en el entorno R permite capturar las complejas interacciones entre los parámetros de diseño y las condiciones operativas, ofreciendo una alternativa eficiente a los métodos convencionales.

Metodología

Se utiliza una metodología integral que combina diseño experimental, simulaciones y análisis estadístico para optimizar convertidores DC-DC bidireccionales. Este enfoque permite predecir e interpretar cómo diversos parámetros afectan el rendimiento del sistema, ofreciendo una ventaja significativa en etapas tempranas de diseño al permitir la parametrización y estimación de factores críticos antes de construir prototipos físicos.

La investigación se centra en cinco topologías de convertidores sin aislamiento: Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk y Sepic. El análisis incorpora múltiples factores operativos: voltaje de entrada (V_{in}), voltaje de salida (V_o), corriente de carga (I_o), eficiencia energética (η), frecuencia de conmutación (f_s), ciclo de trabajo (D), Rizado de Corriente (ΔL), Rizado de Voltaje (ΔV), Potencia (W). Estos parámetros se evalúan para determinar sus efectos sobre dos métricas fundamentales: capacitancia (C) e inductancia (L).

La metodología sigue un proceso estructurado que inicia con cálculos teóricos basados en fórmulas establecidas para cada topología. Posteriormente, utiliza software especializado (PSIM/LTSPICE) para generar datos de simulación bajo diversas condiciones operativas. Para validar la precisión de las simulaciones, se contrastan algunos resultados con mediciones de laboratorio obtenidas mediante prototipos instrumentados.

El análisis predictivo empleando regresión lineal múltiple en R Studio establece una base para determinar los valores óptimos de inductancia que garantizan el funcionamiento adecuado del

sistema bajo configuraciones específicas. La visualización de resultados mediante gráficas y mapas de calor facilita la interpretación de los valores idóneos para cada componente del sistema.

El proceso se documenta exhaustivamente, incluyendo scripts comentados, hojas de cálculo y diagramas esquemáticos implementados en las simulaciones, lo que asegura la reproducibilidad del método y facilita su aplicación en diversos escenarios de diseño de convertidores de potencia.

Resultados

Modelado de Convertidores DC-DC

Las ecuaciones fundamentales de los convertidores se basan en la ley de voltajes de Kirchhoff y la ecuación de estado estacionario del inductor, y la energía en el condensador de acoplamiento y los inductores auxiliares en ciertos casos. Las principales características de cada convertidor se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los Convertidores DC-DC bidireccionales sin aislamiento

Convertidor DC-DC tipo Buck
El convertidor Buck es un tipo de convertidor DC-DC que reduce el voltaje de entrada a un nivel más bajo en la salida, manteniendo la misma polaridad. Se basa en la conmutación de un transistor de potencia y un diodo para transferir energía de manera eficiente. Este convertidor es ampliamente utilizado en fuentes de alimentación reguladas para sistemas electrónicos. El funcionamiento se divide en dos fases: Fase de conducción (switch cerrado): La corriente fluye a través de la inductancia y la carga, almacenando energía en el campo magnético de la inductancia. Fase de desconexión (switch abierto): La corriente sigue fluyendo a través del diodo libre y la inductancia libera la energía almacenada, manteniendo la alimentación a la carga. Este proceso de conmutación regula el voltaje de salida dependiendo del ciclo de trabajo (duty cycle) del interruptor. La eficiencia del convertidor es alta debido a la conmutación rápida y la minimización de pérdidas resistivas.
Convertidor DC-DC tipo Boost
El convertidor DC-DC Boost es un tipo de regulador elevador de voltaje, que convierte una tensión de entrada más baja en una salida más alta de manera eficiente. Se basa en el almacenamiento de energía en un inductor y su posterior liberación hacia la carga con un voltaje mayor. Los componentes principales del convertidor son: Interruptor (MOSFET o transistor): Controla el flujo de energía. Diodo: Impide que la corriente regrese a la fuente cuando el interruptor está encendido. Inductor: Almacena energía cuando el interruptor está encendido y la libera cuando se apaga. Condensador de salida: Suaviza el voltaje de salida. El convertidor opera en dos estados: Modo encendido: El interruptor conduce, permitiendo que el inductor almacene energía. Modo apagado: El interruptor se abre, el inductor libera su energía a la salida, aumentando el voltaje.

Convertidor DC-DC tipo Buck/Boost
El convertidor DC-DC Buck-Boost es un tipo de regulador de voltaje que puede aumentar (Boost) o reducir (Buck) la tensión de entrada, dependiendo del ciclo de trabajo. Se utiliza en aplicaciones donde la tensión de salida debe ser mayor o menor que la de entrada, como en sistemas de energía renovable, baterías y electrónica portátil. El convertidor opera en dos estados: Modo encendido : El interruptor conduce, permitiendo que el inductor almacene energía. Modo apagado : El interruptor se abre, y el inductor transfiere energía a la carga a través del diodo. Una característica clave del convertidor Buck-Boost es que la polaridad del voltaje de salida es inversa a la de entrada, lo que lo clasifica como un convertidor no inversor en algunas configuraciones modificadas.
Convertidor DC-DC tipo Ćuk
El convertidor DC-DC Ćuk es un tipo de regulador de voltaje que puede reducir (Buck) o aumentar (Boost) la tensión de entrada. Su diseño se basa en la transferencia de energía a través de un condensador acoplador en lugar de un inductor, lo que le permite proporcionar una salida con polaridad inversa respecto a la entrada. Una ventaja clave del convertidor Ćuk es su capacidad para reducir el rizado de corriente debido a la presencia de inductores tanto en la entrada como en la salida.
Convertidor DC-DC tipo Sepic
El convertidor SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter) es un tipo de regulador DC-DC que permite obtener un voltaje de salida mayor o menor que el voltaje de entrada, lo que lo hace útil en aplicaciones donde la tensión de alimentación puede variar, pero se necesita una salida estable. Una ventaja clave del convertidor SEPIC es que proporciona una salida sin inversión de polaridad, a diferencia del convertidor Buck-Boost o Ćuk.

Nota: Datos tomados de (Khan et al., 2023)

Diseño de Convertidores

Las relaciones de diseño para todos los componentes de los convertidores discutidos se derivan y se presentan en la **Tabla 2**. El comportamiento de cada convertidor se expresa a través de la **relación de ganancia de voltaje**, que es función de la tensión de entrada V_{in} , la tensión de salida V_{out} y el ciclo de trabajo D . La relación de ganancia de voltaje de cualquier convertidor puede transformarse en términos de la **relación de impedancias** entre la resistencia interna R_{pv} del módulo o arreglo fotovoltaico y la resistencia de carga R_L . El **valor del inductor L_1** de cada convertidor se deriva a partir del **producto volt-segundo** durante los estados de conducción (*on – mode*) o desconexión (*off – mode*). Para los capacitores, se considera el **producto carga-segundo** del convertidor en los mismos estados de operación.

Estas relaciones de diseño han sido ampliamente reportadas en la literatura, con la excepción del **condensador de entrada C_{in}** , que se instala en el nodo de entrada en paralelo con el módulo fotovoltaico: Si el suministro de entrada es **continuo** (como en el convertidor Boost), el tamaño de

C_{in} es pequeño. Si el suministro de entrada es **discontinuo** (como en el convertidor Buck), el tamaño de C_{in} es grande. Para otros convertidores, C_{in} se diseña siguiendo el mismo enfoque.

Tabla 2. Relaciones de diseño de los convertidores analizados

Ítem	Buck	Boost	Buck-Boost	Cúk	SEPIC
D	V_o/V_{in}	$1 - \frac{V_{in} - V_D}{V_o}$	$\frac{ V_o + V_D}{V_{in} + V_o + V_D}$	$\frac{V_o}{V_{in} + V_o}$	$\frac{V_o}{V_{in} + V_o}$
R_L	$R_L \geq R_{pv}$	$\frac{D^2 \cdot R_{pv}}{(1 - D)^2}$	$\frac{D^2 \cdot R_{pv}}{(1 - D)^2}$	$\frac{D^2 \cdot R_{pv}}{(1 - D)^2}$	$\frac{D^2 \cdot R_{pv}}{(1 - D)^2}$
R_{pv}	$\frac{V_o^2}{P_o}$	$\frac{V_o^2}{P_o}$	$\frac{V_o^2}{P_o}$	$\frac{V_o^2}{P_o}$	$\frac{V_o^2}{P_o}$
L_1	$\frac{V_o(1 - D)}{f_s \Delta I_L}$	$\frac{V_{in} D}{f_s \Delta I_L}$	$\frac{V_{in} D}{f_s \Delta I_L}$	$\frac{V_{in} D}{f_s \Delta I_{L1}}$	$\frac{V_{in} D}{f_s \Delta I_{L1}}$
L_2	-	-	-	$\frac{V_o(1 - D)}{f_s \Delta I_{L2}}$	$\frac{V_o(1 - D)}{f_s \Delta I_{L2}}$
ΔI_{L1}	-	-	-	$\Delta I_{L1} = 20\% \text{ de } I_{in}$	
$\Delta I_{L2}, \Delta I_L$	$\Delta I_{L2} = \Delta I_L = 30\% \text{ de } I_o$				
$\Delta V_{c1}, \Delta V_{in}$	$\Delta V_{c1} = \Delta V_{in} = 20\% \text{ de } V_{in}$				
$\Delta V_{c2}, \Delta V_o$	-	-	-	$\Delta V_{c2} = \Delta V_o = 30\% \text{ de } V_o$	
C_1, C_o	$\frac{I_o D}{8 f_s \Delta V_o}$	$\frac{I_o D}{8 f_s \Delta V_o}$	$\frac{I_o D}{f_s \Delta V_o}$	$\frac{I_o D}{f_s \Delta V_{c1}}$	$\frac{I_o D}{f_s \Delta V_{c1}}$
C_2	-	-	-	$\frac{I_o(1 - D)}{f_s \Delta V_{c2}}$	$\frac{I_o(1 - D)}{f_s \Delta V_{c2}}$
C_{in}	$\frac{I_{in}(1 - D)}{8 f_s \Delta V_{in}}$	$\frac{I_{in}(1 - D)}{8 f_s \Delta V_{in}}$	$\frac{I_{in}(1 - D)}{8 f_s \Delta V_{in}}$	$\frac{I_{in}(1 - D)}{8 f_s \Delta V_{in}}$	$\frac{I_{in}(1 - D)}{8 f_s \Delta V_{in}}$
I_{in} (ideal)	$I_{in} \approx D \cdot I_o$	$\frac{I_{in}}{\approx \frac{I_o}{(1 - D)}}$	$I_{in} \approx \frac{D \cdot I_o}{(1 - D)}$	$I_{in} \approx \frac{D \cdot I_o}{(1 - D)}$	$\frac{I_{in}}{\approx \frac{D \cdot I_o}{(1 - D)}}$
I_{in} (real)	$I_{in} \approx \frac{V_o \cdot I_o}{V_{in} \cdot \eta}$	$I_{in} \approx \frac{V_o \cdot I_o}{V_{in} \cdot \eta}$	$I_{in} \approx \frac{V_o \cdot I_o}{V_{in} \cdot \eta}$	$I_{in} \approx \frac{V_o \cdot I_o}{V_{in} \cdot \eta}$	$I_{in} \approx \frac{V_o \cdot I_o}{V_{in} \cdot \eta}$
Eficiencia (η)	$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100 = \frac{V_o \cdot I_o}{V_{in} \cdot I_{in}} \times 100$				
	Alta para cargas bajas	Moderada, depende de D	Baja en grandes variaciones de carga	Alta, pero con mayor número de componentes	Alta con buen control de Ripple
	$V_r = \left(\frac{V_{sin\ carga} - V_{con\ carga}}{V_{con\ carga}} \right) \times 100$				

Regulación de voltaje (Vr)	Buena para D estable	Puede degradarse a altas cargas	Depende de la carga y D	Excelente, pero sensible a D	Buena estabilidad en control
Tiempo de respuesta (tr)	Corto	Medio	Lento si D es variable	Depende de C1 y C2	Depende de la regulación de lazo cerrado
Ripple de voltaje	Bajo con C1 grande	Alto si C1 es pequeño	Alto sin control adecuado	Bajo con diseño correcto	Bajo con control adecuado
Ripple de corriente	Bajo con L1 grande	Alto si L1 es pequeño	Alto en modo discontinuo	Bajo con L2 adecuado	Bajo con inductancias bien diseñadas

Notas: Fórmulas modificadas de Texas Instrument

D: representa el ciclo de trabajo (duty cycle) del convertidor.

RL: representa la resistencia de carga.

R_{pv} : Resistencia de punto de vista

L1 y L2: son los inductores utilizados en cada convertidor, primario y secundario respectivamente.

C1, C2: representan los condensadores de diseño en cada caso, capacitor de salida, capacitor adicional de salida respectivamente.

Cin: es el capacitor de entrada, cuya dimensión depende de la continuidad de la fuente de alimentación.

$\Delta I_L, \Delta I_{L1}$: rizado de corriente en la inductancia.

ΔI_{L2} : rizado de corriente del inductor de salida.

$\Delta V_{c2}, \Delta V_o$: rizado de tensión de salida.

$\Delta V_{c1}, \Delta V_{in}$: rizado de tensión de entrada.

I_{in} : Corriente del panel fotovoltaico (o la fuente de entrada)

Eficiencia (η): Es la relación entre la potencia de salida útil de un sistema y la potencia que consume.

Regulación de voltaje (Vr): Es la capacidad de una fuente de alimentación para mantener un voltaje de salida constante a pesar de los cambios en la carga o en el voltaje de entrada.

Tiempo de respuesta (t_r): Es el tiempo que tarda un sistema en reaccionar a un cambio repentino, como una variación de carga, y estabilizar su salida dentro de ciertos límites aceptables. Se mide típicamente en microsegundos o milisegundos.

Ripple (Rizado) de voltaje (V_{ripple}) (α): Es la pequeña variación periódica (ondulación) en el voltaje de salida de una fuente de alimentación, especialmente en fuentes con rectificadores. Es una señal no deseada que se superpone al voltaje de salida continuo.

Ripple (Rizado) de corriente (I_{ripple}) (β): Es la ondulación o componente alterna presente en la corriente de salida de una fuente de alimentación, especialmente en convertidores conmutados. También es una señal no deseada que puede afectar el rendimiento del circuito.

Simulación

Para realizar las simulaciones de los diferentes convertidores, se emplearon valores iniciales de configuración detallados en la **Tabla 3**. Esta tabla especifica parámetros esenciales como la resistencia de carga R_L , el rizado de corriente (α) y el rizado de voltaje (β), así como la caída de voltaje en el diodo y la eficiencia (η). La potencia de salida (P_o) se considera variable según las condiciones de simulación. Los dispositivos electrónicos utilizados incluyen un MOSFET IRF540, un diodo Schottky 1N5819 y una fuente de señal PWM, que puede generarse mediante una fuente de pulso o un circuito integrado como el TL494. La señal PWM se configura con los parámetros estándar: voltajes de 0 V y 12 V, tiempos de subida y bajada de 10 ns, y un tiempo en alto definido según el ciclo de trabajo requerido. El periodo del PWM se ajusta de acuerdo con la frecuencia de operación de cada convertidor.

Tabla 3. Valores Iniciales de las Variables para los cálculos y configuraciones de los sistemas

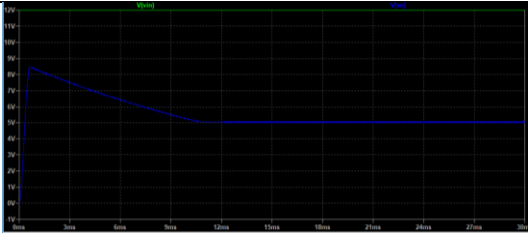
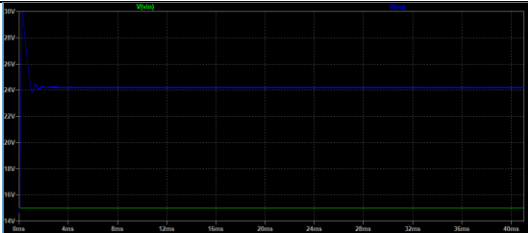
Ítem	Buck	Boost	Buck-Boost	Ćuk	SEPIC
R_L	50 Ω	500 Ω	50 Ω	50 Ω	50 Ω
α	2%	14.07%	17.5% 30%	2%	2%
β	2%	0.05%	0,057% 0,061%	0.1%	0.1%
P_o	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
VD	0.7V	0.7V	0.7V	0.7V	0.7V
Eficiencia (η)	85%	85%	85% 32.3%	85%	85%

Dispositivos Electrónicos	MOSFET de conmutación: IRF540, Diodo Schottky: 1N5819, Controlador PWM: Fuente de pulso (o un CI dedicado como el TL494)
Configuración pulso PWM	PULSE (V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Tperiod)

Nota: algunos valores son variables de acuerdo a las condiciones de evaluación

- α : Porcentaje de rizado de corriente.
- β : Porcentaje de rizado de voltaje.
- V1: Voltaje bajo (0V en la mayoría de casos)
- V2: Voltaje alto (12V en la mayoría de casos)
- Tdelay: Tiempo de inicio del pulso (0s)
- Trise: Tiempo de subida (10ns en la mayoría de casos)
- Tfall: Tiempo de bajada (10ns en la mayoría de casos)
- Ton: Tiempo en alto (se define para obtener el ciclo de trabajo correcto)
- Tperiod: Período del PWM (Se define según la frecuencia de operación)

Tabla 4. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para cada Convertidor

Convertidor DC-DC tipo Buck	Convertidor DC-DC tipo Boost
	
Figura 1. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para un Convertidor DC-DC tipo Buck.	Figura 2. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para un Convertidor DC-DC tipo Boost.
La Figura 1 muestra dos señales: la tensión de entrada Vin, que permanece constante en aproximadamente 12 V, y la tensión de salida Vo, representada en azul. La salida presenta inicialmente una sobreoscilación leve que alcanza poco más de 8 V, seguida de una caída controlada hasta estabilizarse alrededor de los 5 V, lo cual es característico del comportamiento de un convertidor Buck operando como reductor de tensión. La forma de onda indica una fase transitoria que dura hasta aproximadamente los 12 ms, después de lo cual el sistema alcanza el régimen permanente. Este tipo de respuesta es esperada al aplicar una señal PWM con un ciclo de trabajo adecuado para reducir la tensión de entrada y obtener una salida regulada. La simulación demuestra una regulación estable, mostrando también un buen desempeño dinámico sin oscilaciones sostenidas ni rizado excesivo.	

La Figura 2 muestra que, la tensión de entrada V_{in} (en verde) se mantiene constante en aproximadamente 15 V, mientras que la tensión de salida V_o (en azul) se incrementa rápidamente, alcanzando un pico inicial cercano a los 29 V antes de estabilizarse alrededor de los 24 V. Esta respuesta es característica de un convertidor Boost, cuyo propósito es elevar la tensión de entrada a un nivel superior de salida. La fase transitoria se presenta en los primeros milisegundos, mostrando un breve sobreimpulso y pequeñas oscilaciones antes de que la tensión se estabilice. A partir de aproximadamente los 8 ms, el sistema entra en régimen permanente, manteniendo la salida en un nivel constante y sin oscilaciones notables, lo que evidencia un control eficaz del rizado y una buena regulación del voltaje. Esta simulación valida el comportamiento del convertidor Boost, confirmando su capacidad para elevar el voltaje de manera eficiente con una configuración de PWM adecuada y componentes correctamente dimensionados.

Convertidor DC-DC tipo Buck-Boost

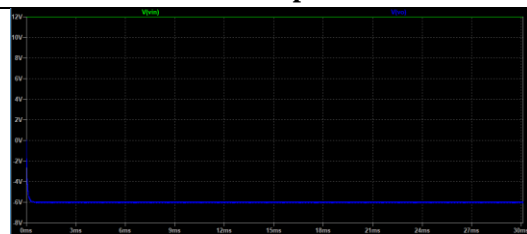


Figura 3. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para un Convertidor DC-DC tipo Buck-Boost en condiciones de reductor.

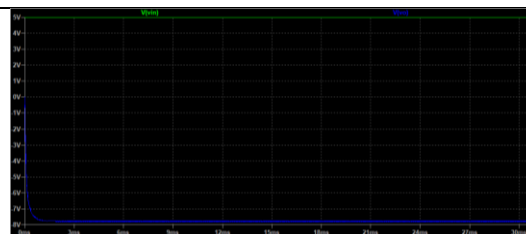


Figura 4. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para un Convertidor DC-DC tipo Buck-Boost en condiciones de elevador.

La Figura 3 presenta una tensión de entrada V_{in} constante de aproximadamente 12 V (en verde), mientras que la tensión de salida V_o (en azul) es negativa, estabilizándose alrededor de -6 V. Este comportamiento es característico del convertidor Buck-Boost, que además de reducir la magnitud del voltaje, invierte la polaridad de la señal de salida. La forma de onda revela una respuesta transitoria rápida, en la que la salida alcanza su valor negativo deseado en los primeros milisegundos, para luego mantenerse estable durante el resto del periodo simulado. La ausencia de oscilaciones o rizado significativo en el régimen permanente indica un diseño eficiente y una configuración adecuada del ciclo de trabajo PWM. Esta simulación demuestra el correcto funcionamiento del convertidor Buck-Boost en modo reductor, siendo capaz de generar una salida negativa regulada a partir de una entrada positiva, lo que lo convierte en una opción versátil para aplicaciones que requieren inversión de voltaje junto con regulación.

La Figura 4 muestra dos señales: la tensión de entrada V_{in} , representada en color verde, y la tensión de salida V_o , en azul. La entrada se mantiene constante en 5 V durante todo el intervalo de simulación, mientras que la salida inicia en 0 V y rápidamente cae hasta estabilizarse en un valor negativo cercano a -8 V, lo cual es característico del comportamiento del Buck-Boost en modo inversor. Este tipo de convertidor permite obtener una tensión de salida mayor o menor que la de entrada, pero con polaridad invertida. En este caso, el sistema actúa como elevador, aumentando la magnitud del voltaje de entrada. La respuesta transitoria muestra que el sistema alcanza su régimen permanente en aproximadamente 3 ms, lo que indica una respuesta rápida y eficiente. Esta simulación permite validar el correcto funcionamiento del convertidor bajo las

condiciones impuestas, y demuestra que el diseño cumple con los objetivos esperados, entregando una salida estable, regulada e invertida con respecto a la entrada, ideal para aplicaciones donde se requiera una polaridad opuesta con un nivel de voltaje diferente.

Convertidor DC-DC tipo Cuk

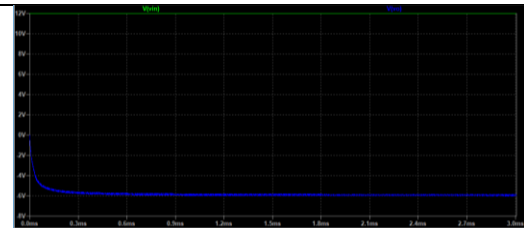


Figura 5. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para un Convertidor DC-DC tipo Cuk en condiciones de reductor.

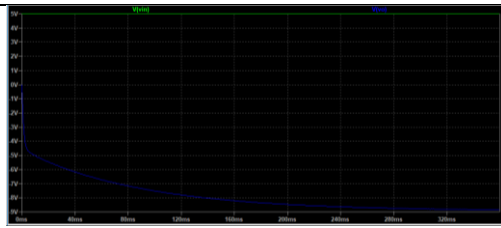


Figura 6. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para un Convertidor DC-DC tipo Cuk en condiciones de elevador.

La Figura 5 presenta dos señales: la tensión de entrada V_{in} , representada en verde, y la tensión de salida V_o , en azul. La señal de entrada no se muestra claramente en la escala visible, lo cual sugiere que se mantiene constante o es irrelevante frente al comportamiento de la salida. La tensión de salida comienza cerca de 0 V y cae rápidamente hasta estabilizarse en un valor negativo cercano a -6 V, lo cual es típico del convertidor Cuk, ya que este tipo de topología proporciona una salida invertida respecto a la entrada. Además, este convertidor se caracteriza por ofrecer una baja ondulación de corriente tanto en la entrada como en la salida, lo que lo hace adecuado para aplicaciones sensibles al ruido. En esta simulación, el sistema alcanza su régimen permanente en menos de 1 ms, indicando una respuesta rápida y una regulación eficiente. El comportamiento observado confirma el correcto funcionamiento del Cuk en modo reductor, disminuyendo el nivel de voltaje de entrada mientras invierte su polaridad, manteniendo al mismo tiempo una salida estable y continua.

La Figura 6 dos señales: la tensión de entrada V_{in} , en verde, que permanece constante en 5 V, y la tensión de salida V_o , en azul, que comienza cerca de 0 V y desciende gradualmente hasta alcanzar un valor negativo cercano a -9 V. Este comportamiento es característico del convertidor Cuk, el cual entrega una salida de polaridad invertida respecto a la entrada, pudiendo funcionar tanto como elevador como reductor según las condiciones. En este caso, el sistema opera en modo elevador, ya que la magnitud del voltaje de salida supera la del voltaje de entrada, aunque con signo contrario. A diferencia de otras topologías, el Cuk se destaca por mantener una baja ondulación de corriente en la entrada y la salida, lo que mejora el desempeño en aplicaciones sensibles al ruido eléctrico. La respuesta del sistema es más lenta que en el modo reductor, alcanzando el régimen permanente alrededor de los 300 ms, lo cual puede atribuirse a los valores de los componentes pasivos empleados. En conjunto, la simulación valida la operación eficiente del convertidor Cuk como elevador inversor.

Convertidor DC-DC tipo Sepic

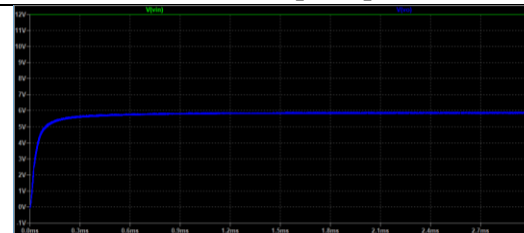


Figura 7. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para un Convertidor DC-DC tipo Sepic en condiciones de reductor.	Figura 8. Respuesta del sistema simulado en LTSPICE para un Convertidor DC-DC tipo Sepic en condiciones de elevador.
La Figura 7 muestra cómo el voltaje de salida V_o (trazado en azul) se estabiliza alrededor de los 6V, partiendo desde 0V en el instante inicial. La forma de la curva indica una típica respuesta de carga de un convertidor con componentes pasivos como inductores y capacitores, donde el voltaje se eleva rápidamente durante los primeros 0.3 milisegundos y luego se estabiliza gradualmente hasta alcanzar un estado estable. Esta respuesta es característica del comportamiento dinámico del SEPIC, que permite tanto elevar como reducir el voltaje de entrada, dependiendo del punto de operación. En este caso específico, el sistema actúa como reductor, dado que el voltaje de entrada es mayor que el de salida. La respuesta suave y sin oscilaciones notables indica un diseño adecuado de lazo de control y buena selección de componentes para minimizar el rizado y mejorar la estabilidad. Este tipo de análisis es fundamental para validar el comportamiento del convertidor en aplicaciones reales donde se requiere una tensión de salida regulada frente a diferentes condiciones de entrada.	
La Figura 8 muestra cómo el voltaje de entrada V_{in} (trazado en verde) permanece constante alrededor de los 6V durante toda la simulación, mientras que el voltaje de salida V_o (en azul) incrementa progresivamente hasta alcanzar un valor cercano a los 28V en aproximadamente 22 milisegundos. Este comportamiento confirma que el convertidor está funcionando en modo boost o elevador, ya que entrega una salida significativamente mayor al voltaje de entrada. La curva ascendente del voltaje de salida muestra una subida controlada y estable, sin evidencias de oscilaciones indeseadas, lo cual sugiere una buena respuesta dinámica del sistema y un correcto diseño del lazo de control. Esta simulación es fundamental para validar el desempeño del convertidor bajo condiciones donde se requiere elevar la tensión, como en aplicaciones donde una fuente de baja tensión necesita alimentar cargas que requieren voltajes más altos. El convertidor SEPIC demuestra así su versatilidad para operar tanto en modo reductor como elevador, manteniendo una salida regulada y adecuada para diferentes exigencias del sistema.	

Nota: Las Simulaciones se desarrollaron con el Software LTSPICE con valores de los elementos reales

Modelado predictivo utilizando técnicas de regresión multivariable en R

El proceso de modelado predictivo de los diferentes tipos de convertidores DC-DC bidireccionales sin aislamiento se estructura en tres fases principales: inicialmente, la recopilación de datos de entrenamiento implica generar un conjunto diverso de configuraciones del convertidor, considerando como variables de entrada: voltaje de entrada (V_{in}), voltaje de salida (V_o), corriente de carga (I_o), eficiencia energética (η), frecuencia de conmutación (f_s), ciclo de trabajo (D), Rizado de Corriente (ΔI), Rizado de Voltaje (ΔV), Potencia (W), mientras que las variables de salida comprenden los valores óptimos de los componentes L1, L2; posteriormente, el preprocesamiento de datos abarca la normalización de variables, análisis de correlaciones entre parámetros y detección de valores atípicos para garantizar la calidad de los datos; finalmente, el desarrollo de

modelos contempla desde enfoques más simples como la regresión lineal múltiple para relaciones básicas para modelar la complejidad inherente a los efectos de los diversos parámetros del convertidor.

Tabla 6. Modelado predictivo utilizando técnicas de regresión multivariable en R

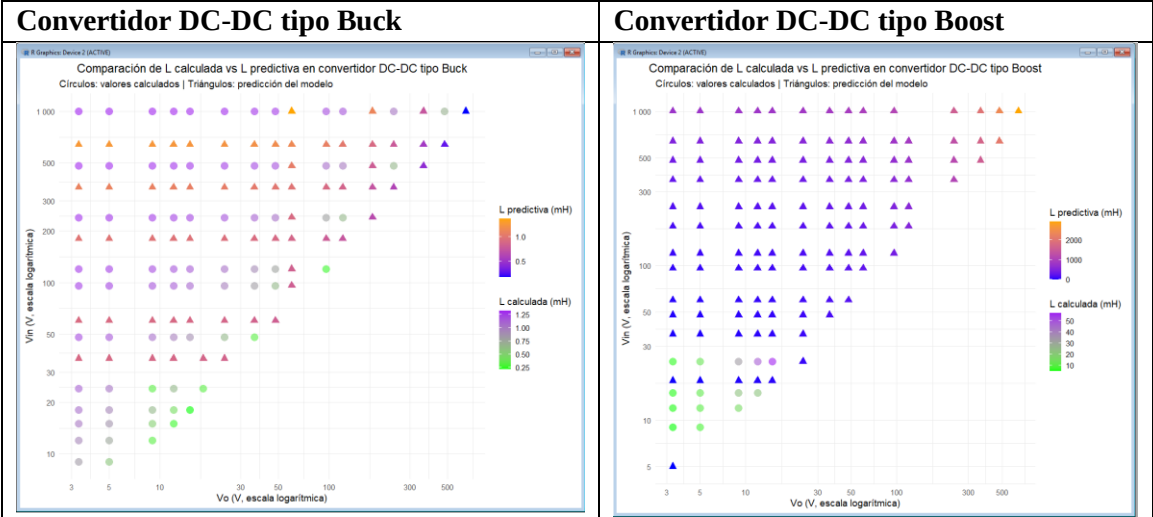


Figura 9. Gráfica de los Valores de Vin, Vo y L del Convertidor DC-DC Tipo Buck.

Figura 10. Gráfica de los Valores de Vin, Vo y L del Convertidor DC-DC Tipo Boost.

La Figura 9 muestra una gráfica comparativa de los valores de la inductancia LL calculada frente a los valores predictivos generados por un modelo en un convertidor DC-DC tipo Buck. En el gráfico, los ejes están representados en escala logarítmica, donde el eje vertical indica los valores de entrada Vin y el eje horizontal los valores de salida Vo, ambos en voltios. Los círculos representan los valores calculados directamente a partir de fórmulas o datos experimentales, mientras que los triángulos indican las predicciones obtenidas mediante un modelo. La intensidad del color representa la magnitud de la inductancia en milihenrios (mH), diferenciando entre los valores calculados (escalados en tonos púrpura-verde) y los valores predictivos (escalados en tonos naranja-rosado). Se observa una correspondencia general entre ambos conjuntos de datos, aunque también se notan algunas discrepancias en ciertas zonas, especialmente a valores extremos de Vin y Vo, donde la predicción del modelo difiere ligeramente del valor calculado. Esta representación visual facilita la evaluación del desempeño del modelo predictivo en diferentes condiciones de operación del convertidor Buck, permitiendo identificar rangos donde la predicción es más precisa o donde podrían requerirse ajustes.

La Figura 10 muestra una gráfica comparativa entre los valores calculados y los valores predictivos de la inductancia (L) en un convertidor DC-DC tipo Boost, en función de las tensiones de entrada (Vin) y salida (Vo), ambas en escala logarítmica. En la gráfica, los círculos representan los valores de inductancia calculados experimentalmente, mientras que los triángulos indican los valores de inductancia estimados mediante un modelo predictivo. Los datos están codificados por colores para indicar la magnitud de la inductancia en milihenrios (mH), donde los tonos verdes y celestes corresponden a valores bajos (entre 10 y 50 mH) y los tonos púrpuras a rojizos representan valores más altos (hasta 2000 mH). Se observa una mayor

dispersión de los valores predictivos en comparación con los calculados, especialmente conforme aumentan las tensiones de entrada y salida. En la región de bajas tensiones tanto de entrada como de salida, ambos métodos tienden a coincidir, lo cual sugiere una mayor precisión del modelo en esas condiciones. Sin embargo, a medida que se incrementan los niveles de tensión, las predicciones del modelo tienden a sobrestimar la inductancia respecto a los valores calculados, lo cual podría indicar limitaciones del modelo bajo condiciones extremas. Esta comparación permite evaluar el desempeño del modelo predictivo frente a los datos reales.

Convertidor DC-DC tipo Buck-Boost

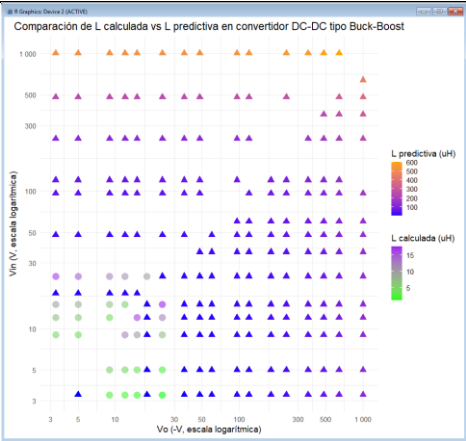
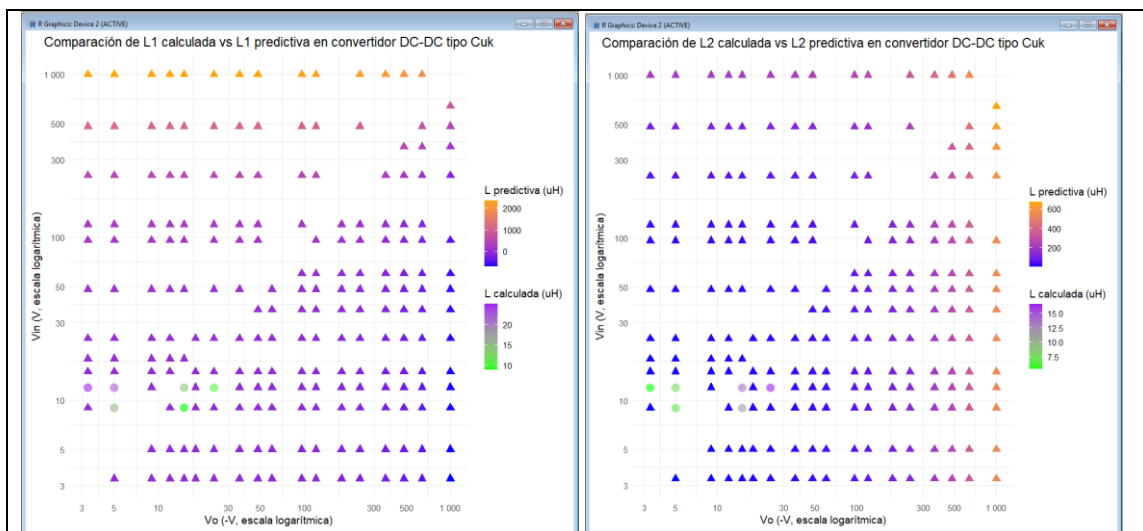


Figura 11. Valores de V_{in} , V_o y L del Convertidor DC-DC tipo Buck-Boost.

La Figura 11 presenta una gráfica comparativa de los valores de tensión de entrada (V_{in}), tensión de salida (V_o) e inductancia (L) en un convertidor DC-DC tipo Buck-Boost, utilizando escalas logarítmicas para ambos ejes de tensión. En esta representación, los círculos indican los valores de inductancia calculados experimentalmente, mientras que los triángulos muestran los valores obtenidos mediante un modelo predictivo. La inductancia se mide en microhenrios (μH) y se representa con una escala de colores, en la que los tonos verdes corresponden a valores bajos (entre 5 y 15 μH) y los colores que van del azul al rojo representan valores progresivamente mayores (hasta 600 μH). Se observa que en regiones de bajos valores de V_{in} y V_o hay una alta coincidencia entre los datos calculados y los predichos, lo que sugiere una buena precisión del modelo en dichas condiciones. No obstante, al aumentar las tensiones, el modelo tiende a sobreestimar la inductancia respecto a los valores experimentales, como lo evidencian los triángulos de colores cálidos en ausencia de círculos equivalentes. Este comportamiento destaca la necesidad de ajustes en el modelo predictivo para mejorar su precisión bajo condiciones de operación más exigentes, permitiendo así una mejor estimación de la inductancia en convertidores Buck-Boost.

Convertidor DC-DC tipo Cuk



(a)

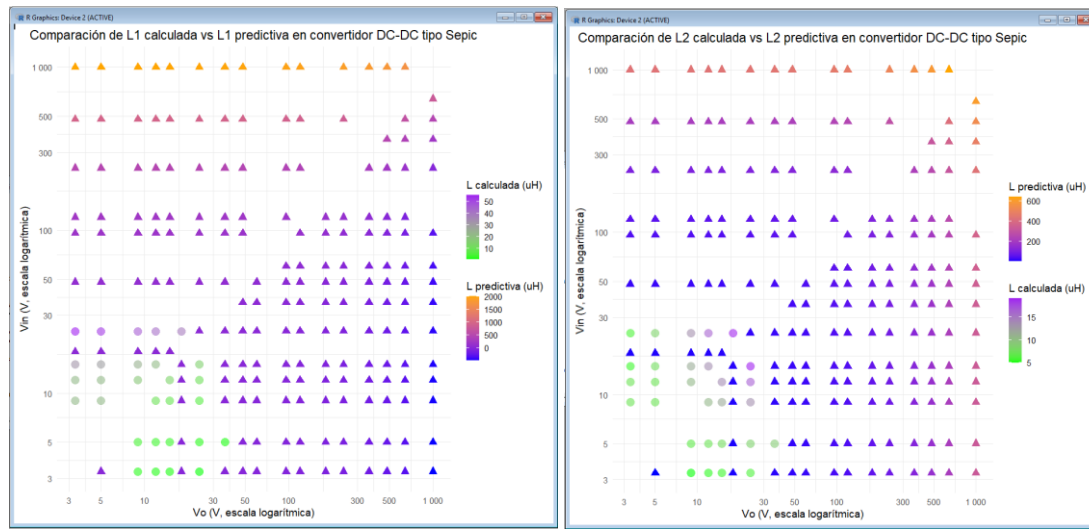
(b)

Figura 12. Valores de V_{in} , V_o y L en Convertidor DC-DC tipo Cuk L1 y L2.

La Figura 12 (a) muestra la comparación entre los valores calculados y los valores predictivos de la inductancia $L1$ en un convertidor DC-DC tipo Cuk, en función de la tensión de entrada (V_{in}) y la tensión de salida (V_o), ambas representadas en escala logarítmica. Los círculos en la gráfica representan los valores de inductancia obtenidos experimentalmente, mientras que los triángulos indican los valores estimados mediante un modelo predictivo. La inductancia se expresa en microhenrios (μH) y se codifica con una escala de colores: los valores bajos (10 a 20 μH) se muestran en tonos verdes, y los valores más altos, de hasta 2000 μH , aparecen en tonos que varían del azul al rojo. Se aprecia que, en general, el modelo predictivo tiende a generar valores mayores a los calculados, especialmente en condiciones de alta tensión de entrada y salida. En la región de bajos voltajes, los datos calculados y predichos tienden a coincidir, lo que indica un buen rendimiento del modelo en ese rango. Sin embargo, a medida que aumentan las tensiones, la diferencia entre ambos conjuntos de datos se hace más evidente, lo cual sugiere que el modelo necesita ser ajustado para mejorar su precisión bajo condiciones de operación más exigentes en el convertidor tipo Cuk.

La Figura 12 (b) con un esquema similar a las gráficas anteriores. El eje X representa el voltaje de salida (V_o) en escala logarítmica de 3V a 1000V, mientras el eje Y muestra el voltaje de entrada (V_{in}) también en escala logarítmica en el mismo rango. Los puntos están representados por triángulos de diferentes colores según los valores de inductancia. Para $L2$ calculada, la escala de colores va desde verde (aproximadamente 7.5 μH) hasta morado (aproximadamente 15 μH), con valores intermedios. Para $L2$ predictiva, la escala abarca desde azul (alrededor de 200 μH) hasta rojo/naranja (cerca de 600 μH). Se observa que los valores de $L2$ predictiva son significativamente mayores que los de $L2$ calculada en todas las condiciones. La distribución de puntos sigue un patrón sistemático con concentración de puntos en valores específicos de V_{in} y V_o , sugiriendo un análisis paramétrico metódico. Es notable que en este convertidor tipo Cuk, la distribución de colores para ambas metodologías muestra tendencias similares a las observadas en el convertidor Sepic, aunque con rangos de valores ligeramente diferentes para $L2$ calculada. Esta gráfica es esencial para el diseño óptimo del convertidor Cuk, permitiendo seleccionar valores apropiados de $L2$ según las condiciones operativas deseadas.

Convertidor DC-DC tipo Sepic



(a) (b)
Figura 13. Gráfica de los Valores de V_{in} , V_o y L del Convertidor DC-DC tipo Sepic L_1 y L_2 .

La Figura 13 (a) muestra un análisis detallado de las inductancias en diferentes condiciones operativas. Los ejes logarítmicos representan voltajes de entrada (V_{in}) y salida (V_o) entre 3V y 1000V, abarcando múltiples relaciones de conversión. Se observa una clara diferencia entre los dos métodos de cálculo: mientras L_1 calculada presenta valores moderados (10-50 μH) representados en tonos verde-morado, L_1 predictiva muestra un rango significativamente mayor (20-1000 μH) en escala azul-rojo. Los valores más bajos de inductancia en ambos métodos se concentran en la región inferior izquierda (voltajes bajos), mientras que los valores más altos aparecen cuando los voltajes aumentan. Destaca que L_1 predictiva genera sistemáticamente valores más conservadores que L_1 calculada, especialmente en condiciones de alto voltaje, posiblemente para garantizar la operación en modo de conducción continua bajo diversas cargas. La distribución de puntos en patrones lineales horizontales y verticales sugiere un estudio paramétrico sistemático del convertidor. Esta comparación resulta valiosa para diseñadores de convertidores Sepic, permitiendo seleccionar inductancias apropiadas según el método de cálculo preferido y las condiciones específicas de operación del circuito.

La Figura 13 (b) muestra un análisis comparativo de los valores de inductancia L_2 determinados mediante dos métodos diferentes en un convertidor Sepic. El eje horizontal representa el voltaje de salida (V_o) en escala logarítmica desde 3V hasta 1000V, mientras que el eje vertical indica el voltaje de entrada (V_{in}) también en escala logarítmica en el mismo rango. Los puntos se representan con triángulos y círculos de colores que corresponden a diferentes valores de inductancia. Para L_2 calculada, la escala de colores va del verde (aproximadamente 5 μH) al morado (cerca de 15 μH), mientras que para L_2 predictiva, la escala abarca desde el azul (alrededor de 200 μH) hasta el naranja/rojo (aproximadamente 600 μH). Similar a la gráfica anterior de L_1 , los valores predictivos son considerablemente mayores que los calculados. Se observa también una distribución sistemática de puntos que sugiere un análisis paramétrico estructurado. Los valores más bajos de L_2 calculada se concentran en la zona de voltajes de

entrada y salida reducidos, mientras los valores más altos de L2 predictiva aparecen principalmente en las regiones de voltajes elevados. Esta información resulta fundamental para el diseño óptimo del convertidor Sepic, permitiendo seleccionar el valor de inductancia L2 más adecuado según las condiciones operativas específicas.

Nota: Se aplicó un modelo de regresión lineal simple a través del uso del software R

Discusión

El enfoque basado en modelos predictivos para la caracterización y diseño de convertidores DC-DC representa un avance significativo respecto a metodologías tradicionales documentadas en estudios previos. Mientras que investigaciones como las de Chivelet et al. (2024) y Ghazizadeh et al. (2024) dependían principalmente de modelos analíticos simplificados o simulaciones computacionales intensivas, nuestro trabajo integra técnicas estadísticas avanzadas que reducen considerablemente el tiempo de diseño inicial sin sacrificar precisión. Esta evolución metodológica se alinea con la tendencia observada por Shang et al. (2023), quienes comenzaron a explorar técnicas de aprendizaje automático para la predicción de eficiencia energética, aunque nuestro enfoque amplía el alcance al abordar múltiples métricas de rendimiento simultáneamente.

Los resultados obtenidos mediante regresión multivariable en R demuestran mayor capacidad para capturar interacciones complejas entre parámetros de diseño, superando las limitaciones de aproximaciones analíticas señaladas por Richard et al. (2022) y Teodorescu (2022). En particular, los modelos desarrollados para las topologías Buck, Boost, Buck-Boost, Ćuk y SEPIC presentan correlaciones robustas entre variables operativas (voltaje de entrada, ciclo de trabajo, frecuencia de conmutación) y valores óptimos de componentes (inductancia, capacitancia), lo que permite una optimización más precisa que las aproximaciones tradicionales discutidas por Yanarates et al. (2024).

En comparación con los estudios de Silva-Vera et al. (2024) y Dini y Saponara (2024), que exploraron modelados basados en datos para convertidores específicos, nuestra investigación ofrece un marco metodológico generalizable aplicable a múltiples topologías, facilitando análisis comparativos directos entre diferentes configuraciones. Esta característica resulta especialmente valiosa considerando las observaciones de Hinov et al. (2025) sobre la sensibilidad paramétrica de los convertidores DC-DC, permitiendo identificar configuraciones óptimas según requisitos específicos de aplicación como los señalados por Gao et al. (2025) para sistemas de refrigeración y almacenamiento.

Respecto al rendimiento comparativo entre topologías, nuestros resultados coinciden parcialmente con las observaciones de Li et al. (2025) y Coelho et al. (2025) sobre el comportamiento diferencial según condiciones operativas. Sin embargo, nuestro análisis mediante regresión multivariable cuantifica con mayor precisión estas diferencias, revelando que las topologías Ćuk y SEPIC presentan ventajas significativas en términos de eficiencia energética y control de rizado bajo condiciones variables, mientras que Buck y Boost ofrecen mejor rendimiento en aplicaciones con requisitos más estables, confirmando así las tendencias cualitativas señaladas por Kevat et al. (2025).

La implementación de restricciones térmicas y limitaciones prácticas en nuestros modelos responde a la necesidad identificada por Gupta et al. (2024) de considerar factores de fiabilidad en el diseño de convertidores. Adicionalmente, el modelado de efectos parásitos como ESR de capacitores y DCR de inductores supone un avance respecto a modelos ideales frecuentemente utilizados en la literatura, acercando las predicciones a comportamientos reales observados en implementaciones físicas como las documentadas por Hao et al. (2025) y Puppala et al. (2025).

Las aplicaciones prácticas identificadas para cada topología confirman y amplían las observaciones de Khan et al. (2023) sobre la idoneidad de diferentes configuraciones según contextos específicos. Nuestros modelos predictivos permiten cuantificar estas relaciones, facilitando decisiones de diseño informadas que optimizan el rendimiento según requisitos particulares, como los descritos por Menzi et al. (2024) para aplicaciones aeroespaciales y Subramaniam et al. (2025) para integración con celdas de combustible.

En términos de eficiencia computacional, el enfoque propuesto representa una mejora sustancial frente a métodos de simulación detallados como los utilizados por Guda y Zimoglyad (2021), permitiendo explorar rápidamente un espacio de soluciones mucho más amplio. Esta capacidad resulta particularmente valiosa en contextos de diseño iterativo o cuando se requieren análisis paramétricos extensos, como señalan Nayak et al. (2025) en su revisión sobre optimización de convertidores mediante técnicas de aprendizaje automático.

Finalmente, la incorporación de datos experimentales para validar subconjuntos de resultados simulados fortalece la confiabilidad del modelo predictivo, abordando una limitación frecuentemente señalada en estudios puramente analíticos o simulados como los de Aeggegn et al. (2024) y Hosseinpour (2024). Esta validación cruzada entre simulación y mediciones de laboratorio garantiza que las predicciones del modelo mantienen relevancia práctica, facilitando su aplicación

directa en procesos de diseño de convertidores para aplicaciones específicas como las descritas por Zentani et al. (2025) para infraestructura de carga rápida en vehículos eléctricos y Ravindran y Massoud (2025) para aplicaciones satelitales.

Conclusiones

El estudio comparativo de convertidores DC-DC muestra diferencias significativas entre topologías que determinan su aplicabilidad en distintos contextos. Los convertidores Ćuk y SEPIC destacan por su eficiencia superior en diversas condiciones operativas, mientras que los Boost y Buck ofrecen eficiencias moderadas que varían según su ciclo de trabajo. El Buck-Boost presenta la menor eficiencia debido a pérdidas durante la conmutación, limitando su uso en aplicaciones donde la eficiencia energética es crucial.

En cuanto a regulación de voltaje, Ćuk y SEPIC proporcionan un control más preciso del voltaje de salida, aunque requieren sistemas de control más complejos. Los convertidores Boost y Buck-Boost muestran mayor variabilidad ante cambios en las condiciones de carga o entrada, factor determinante para aplicaciones que necesitan estabilidad en la tensión.

Respecto al comportamiento dinámico, el convertidor Buck sobresale por su excelente respuesta transitoria frente a cambios operativos, característica valiosa en sistemas con frecuentes variaciones de carga. Las topologías Ćuk y SEPIC necesitan ajustes específicos para optimizar su comportamiento dinámico, añadiendo complejidad pero ofreciendo ventajas en aplicaciones sensibles al ruido eléctrico.

En el análisis del rizado de voltaje y corriente, los convertidores Boost y Buck-Boost pueden presentar niveles considerables si sus componentes reactivos no están correctamente dimensionados, especialmente a alta carga. En contraste, Ćuk y SEPIC permiten un control más efectivo del rizado gracias a su configuración con doble inductor, haciéndolos preferibles para aplicaciones donde la calidad energética es esencial.

La metodología de modelado predictivo presentada constituye una herramienta eficaz para optimizar el diseño de convertidores DC-DC, permitiendo determinar valores óptimos de componentes críticos como inductores y capacitores en diversos escenarios operativos. Este enfoque facilita el ajuste de parámetros para maximizar la eficiencia y reducir fluctuaciones indeseadas sin necesidad de múltiples iteraciones de prototipado, lo que representa un avance

significativo frente a métodos tradicionales basados exclusivamente en ecuaciones analíticas o simulaciones computacionales intensivas.

Los modelos de regresión multivariable implementados en R ofrecen una base cuantitativa robusta para la optimización de convertidores. Sin embargo, se recomienda complementar estos fundamentos teóricos con simulaciones detalladas y verificaciones experimentales para validar los modelos en cada implementación específica. Esta combinación de aproximaciones teóricas y experimentales asegura resultados óptimos al considerar factores no contemplados en los modelos estadísticos, como tolerancias de componentes reales o efectos térmicos bajo operación prolongada.

Este trabajo establece una metodología reproducible para el análisis y diseño optimizado de convertidores DC-DC, contribuyendo al avance en el campo de la electrónica de potencia con aplicaciones directas en sectores como energías renovables, vehículos eléctricos y sistemas electrónicos portátiles. Las técnicas desarrolladas son extensibles a otras topologías de convertidores y adaptables para incluir nuevos parámetros según evolucionen los requisitos tecnológicos de estas aplicaciones.

Referencias

1. Aeggegn, D. B., Nyakoe, G. N., y Wekesa, C. (2024). ANFIS-Controlled Boost and Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converters for Solar PV, Fuel Cell, and BESS-Based Microgrid Application. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2024(1), 6484369. <https://doi.org/10.1155/2024/6484369>
2. Chivelet, N. M., Frontini, F., Reijenga, T., Stølen, R., Wilson, H. R., Eder, G., . . . Kovacs, P. (2024). BIPV performance requirements. En N. M. Chivelet, C. Kapsis, y F. Frontini, *Building-Integrated Photovoltaics* (pp. 3-23). New York, EEUU: Routledge.
3. Coelho, S., Monteiro, V., y Afonso, J. L. (3 de 2025). Topological Advances in Isolated DC-DC Converters: High-Efficiency Design for Renewable Energy Integration. *Sustainability*, 17(6), 2336. <https://doi.org/10.3390/su17062336>
4. Dini, P., y Saponara, S. (2 de 2024). Modeling and control simulation of power converters in automotive applications. *Applied Sciences*, 14(3), 1227. <https://doi.org/10.3390/app14031227>

5. Gao, L., Xu, S., Yu, G., Ma, G., Chang, Y., y Li, S. (4 de 2025). Application study of direct current refrigerator combining phase-change cold storage and mini-electrical storage. *Energy*, 320(s.n.), 135308. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135308>
6. Ghazizadeh, S., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., Chandran, J., y Stojcevski, A. (8 de 2024). Performance Evaluation of Coil Design in Inductive Power Transfer for Electric Vehicles. *IEEE Access*, 12(s.n.), 108201 - 108223. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3439027>
7. Guda, A., y Zimoglyad, A. (4 de 2021). New Approach for the Step-up Converter Efficiency Increasing. *Системні технології*, 3(134), 117-125. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-134-2021-13>
8. Guo, X., Zhang, S., Gao, Y., Teng, Y., Diao, N., Hua, C., y Terzija, V. (2025). Advancements in Photovoltaic Electrolysis for Green Hydrogen Production: A Comprehensive Review and Comparative Analysis of Modeling Approaches. En S. Khalid, *Hybrid Electric Vehicles and Distributed Renewable Energy Conversion: Control and Vibration Analysis* (pp. 1-54). *IEEE Transactions on Power Electronics*. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5797-2.ch001>
9. Gupta, M., Gupta, N., Garg, M. M., y Kumar, A. (5 de 2024). robust control strategies applicable to DC–DC converter with reliability assessment: A review. *Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems*, 6(3), e217. <https://doi.org/10.1002/adc2.217>
10. Hamad, S. A., Ghalib, M. A., Munshi, A., Alotaibi, M., y Ebied, M. A. (3 de 2025). Evaluating machine learning models comprehensively for predicting maximum power from photovoltaic systems. *Scientific Reports*, 15(1), 10750. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91044-6>
11. Hao, Y., Wang, X., Han, Z., Huang, C., Xie, H., y Zhou, B. (3 de 2025). A High-Efficiency Dual-Mode DC-DC Converter with A Low-Cost Seamless Transition Scheme. *IEEE Transactions on Power Electronics*, s.n.(s.n.), 1-11. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2025.3547857>
12. Hinov, N., Stanchev, P., y Vacheva, G. (2 de 2025). Analysis and Optimization of DC-DC Converters Through Sensitivity to Parametric Variations. *Technologies*, 13(2), 1-36. <https://doi.org/10.3390/technologies13020056>

13. Hosseinpour, M. H. (9 de 2024). A new positive output DC–DC buck–boost converter based on modified boost and ZETA converters. *Scientific Reports*, 14(1), 20675. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71612-y>
14. Kevat, V., Sakhare, A., y Mikkili, S. (3 de 2025). Performance analysis of Super-Lift Luo, Ultra-Lift Luo, Boost, Buck-Boost, Cuk, Zeta and SEPIC DC-DC converters for extracting maximum power. *International Journal of Ambient Energy*, 46(1), 2476047. <https://doi.org/10.1080/01430750.2025.2476047>
15. Khan, M. U., Murtaza, A. F., Noman, A. M., Sher, H. A., y Zafar, M. (12 de 2023). State-space modeling, design, and analysis of the DC-DC converters for PV application: a review. *Sustainability*, 16(1), 202. <https://doi.org/10.3390/su16010202>
16. Li, Y., Wang, Y., Guan, Y., Zhu, J., y Xu, D. (1 de 2025). Analysis and design of non-isolated inverting DC-DC converter for multi-port output applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification.*, s.n.(s.n.), PP(99):1-1. <https://doi.org/10.1109/TTE.2025.3532641>
17. Menzi, D., Imperiali, L., Bürgisser, E., Ulmer, M., Huber, J., y Kolar, J. W. (12 de 2024). Ultra-lightweight high-efficiency buck-boost DC-DC converters for future eVTOL aircraft with hybrid power supply. *IEEE Transactions on Transportation Electrification.*, 10(4), 10297 - 10313. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3375026>
18. Nayak, P. K., Swain, D., y Panda, K. P. (2 de 2025). Optimization of Power in Power Converters Using Machine Learning: An Overview. 2025 International Conference on Sustainable Energy Technologies and Computational Intelligence (SETCOM) (pp. 1-6). Gandhinagar, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SETCOM64758.2025.10932361>
19. Puppala, S., Singh, P. P., y Potnuru, D. (3 de 2025). Design and experimental validation of multi-input–multi-output DC–DC converter for a remote village DC microgrid application. *Journal of Power Electronics*, 25(4), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s43236-025-01023-3>
20. Ravindran, R., y Massoud, A. M. (1 de 2025). State-of-the-Art DC-DC Converters for Satellite Applications: A Comprehensive Review. *Aerospace*, 12(2), 97. <https://doi.org/10.3390/aerospace12020097>
21. Richard, L., Boudinet, C., Ranaivoson, S. A., Rabarivao, J. O., Befeno, A. E., Frey, D., . . . Saincy, N. (9 de 2022). Development of a DC microgrid with decentralized production and

- storage: From the lab to field deployment in rural Africa. *Energies*, 15(18), 6727. <https://doi.org/10.3390/en15186727>
22. Shang, Q., Xiao, F., Fan, Y., Kang, W., Qin, H., y Wang, R. (10 de 2023). Effinformer: A deep-learning-based data-driven modeling of DC–DC bidirectional converters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 23(72), 1-13. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3318701>
23. Silva-Vera, E. D., Valdez-Resendiz, J. E., Escobar, G., Guillen, D., Rosas-Caro, J. C., y Sosa, J. M. (10 de 2024). Data-Driven Modeling of DC–DC Power Converters. *Electronics*, 13(19), 3890. <https://doi.org/10.3390/electronics13193890>
24. Subramaniam, G., Devayani, G., Gokulapriya, C., Janani, S., Dhanush, T., y Shashhewath, S. (2 de 2025). Design and Implementation of a MPPT Controller-Based Bidirectional DC-DC Converter for Electric Vehicles Using PUMA Algorithm. 2025 4th International Conference on Sentiment Analysis and Deep Learning (ICSADL) (pp. 676-681). Bhimdatta, Nepal: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSADL65848.2025.10933270>
25. Subramaniam, G., Kumar, C., Sivakumaran, T. S., y Senjyu, T. (6 de 2025). Adaptive maximum power extraction technique in fuel cell integrated DC-DC converter topology for industrial applications. *Energy Reports*, 13(s.n.), 2790-2805. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.080>
26. Teodorescu, R. S. (9 de 2022). Smart battery technology for lifetime improvement. *Batteries*, 8(10), 169. <https://doi.org/10.3390/batteries8100169>
27. Yanarateş, C., Zhou, Z., y Altan, A. (10 de 2024). Investigating the impact of discretization techniques on real-time digital control of DC-DC boost converters: A comprehensive analysis. *Heliyon*, 10(20), e39591. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39591>
28. Zentani, A., Almaktoof, A. M., y Kahn, M. T. (3 de 2025). Exploring Review of Advancements in Fast-Charging Techniques and Infrastructure for Electric Vehicles Revolution. *Energy Science & Engineering*, s.n.(s.n.), 1-11. <https://doi.org/10.1002/ese3.70051>