

A Generalized Port-Hamiltonian Approach to Modeling Losses in DC-DC Converters ^{*}

Víctor Pérez-Galicia ^{*} Fernanda Ramos-García ^{*}
Víctor Cárdenas ^{**} Gerardo Espinosa-Pérez ^{*}

^{*} *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 04510, Ciudad de México, México (e-mail: victor.armando@hotmail.com, ferramosgarcia03@gmail.com, gerardoe@unam.mx).*

^{**} *Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Dr. Manuel Nava, 8. Zona Universitaria – 78290 San Luis Potosí (México) (e-mail: vcardena@uaslp.mx).*

Abstract: This paper presents a systematic methodology to model conduction losses of passive and active elements of power converters within the Port Controlled Hamiltonian (PCH) framework. The motivation behind this approach is not only to achieve a more realistic system representation, preserving the Hamiltonian structure, but also to enable the development and analysis of control schemes that optimize transient performance. The Port-Hamiltonian models for the two basic DC-DC converter topologies, Buck and Boost, are unified into a generalized structure. Finally, the proposed model is validated numerically through MATLAB[®]-Simulink[®] simulation comparing the ideal model, the proposed PCH model, with a reference in a Simscape implementation.

Keywords: Power Converters, Modeling Losses, Port-Controlled Hamiltonian Systems, Passivity Based Control.

1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores de electrónica de potencia (CEP) son dispositivos electrónicos que permiten transformar la energía eléctrica mediante el uso de interruptores semiconductores (*e.g.* MOSFETs o IGBTs), los cuales operan en modo conmutado. A diferencia de los convertidores lineales, los convertidores conmutados no regulan el suministro de energía a través de la disipación, sino que la ajustan mediante técnicas de modulación (*e.g.* PWM) que permiten una conversión más versátil. Una de las principales ventajas de estos convertidores radica en su alta eficiencia, que típicamente supera el 90 % bajo un diseño adecuado, así como en su capacidad para operar a frecuencias elevadas, lo que permite menor tamaño de los componentes y diseños más compactos. Convirtiéndose en la elección preferente para aplicaciones que demandan máxima eficiencia energética, con un tamaño reducido como energías renovables (Sivakumar et al., 2016), movilidad eléctrica (Nkembi et al., 2023) y telecomunicaciones (Ravindran and Massoud, 2025), por mencionar algunas.

A pesar de su alta eficiencia, inevitablemente presentan ciertas pérdidas energéticas que afectan su desempeño global. Estas dependen de múltiples factores, como el diseño del convertidor, los dispositivos empleados y las

condiciones de operación. De forma general, se pueden agrupar en dos categorías principales:

- **Pérdidas en los elementos pasivos:** Asociadas principalmente a los inductores y capacitores, los cuales forman parte fundamental de las distintas topologías. Estas pérdidas suelen modelarse como resistencias equivalentes, ya sea en serie o en paralelo, con el fin de representar fenómenos inherentes como la resistencia óhmica del devanado en los inductores o las pérdidas dieléctricas en los capacitores.
- **Pérdidas en los elementos de conmutación:** Se originan en los interruptores electrónicos controlados y no controlados (como transistores y diodos) y están relacionadas con su comportamiento durante los ciclos de encendido y apagado. Entre las más relevantes se encuentran las pérdidas por conducción, por conmutación y por estados no conductivos, cuya magnitud depende de parámetros como la frecuencia de operación, el tipo de semiconductor, la velocidad de conmutación y la calidad del control aplicado.

La clasificación de los CEP radica en el tipo de conversión que realicen: convertidores DC-DC, AC-DC (rectificadores), DC-AC (inversores) y AC-AC (cicloconvertidores). Los convertidores de DC-DC sin aislamiento galvánico han cobrado una gran relevancia en una gran cantidad de aplicaciones, como en baterías o sistemas fotovoltaicos. La categoría DC-DC se divide en dos topologías fundamentales: el convertidor Buck (reductor), el cual disminuye el voltaje de salida respecto a la en-

^{*} Los autores agradecen el apoyo dado por PAPITT-UNAM (Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica): Proyecto IN118125.

trada, y el convertidor Boost (elevador) el cual incrementa el voltaje de salida sobre el de entrada. Estas configuraciones básicas pueden combinarse en diseños como el Buck-Boost, SEPIC y CUK que permiten tanto aumentar como reducir el voltaje según los requisitos de la aplicación. Existen una gran cantidad de resultados tanto para diseño y modelado como para el control de los convertidores DC-DC, como se sintetiza en (Hossain et al., 2018). Sin embargo, estos resultados emplean el modelo ideal, donde ninguna de las pérdidas mencionadas anteriormente es considerada, como en (El Fadil et al., 2003) donde emplean el modelo del convertidor Buck ideal para controlarlo a través de la técnica de *backstepping* y en (Zambrano-Prada et al., 2025) emplean ese mismo modelo pero utilizan la técnica de modos deslizantes para resolver el problema de carga constante desconocida. En (Lakomy et al., 2022) usan el modelo del convertidor Buck sin pérdidas para suprimir perturbaciones debido al ruido, y en (Hassan et al., 2019) emplean la metodología del control basado en pasividad para el rechazo a las perturbaciones de micro-redes.

Considerando el panorama planteado, el objetivo de este trabajo es modelar pérdidas en convertidores DC-DC mediante la formulación Hamiltoniana controlada por puerto (PCH, por sus siglas en inglés), la cual permite obtener una descripción energética clara del sistema. Esto se realiza teniendo en cuenta la metodología de Control Basado en Pasividad (PBC, por sus siglas en inglés), para el futuro diseño del esquema de control no lineal, aprovechando el buen desempeño y eficiencia energética que esta metodología ha demostrado. La formulación de los modelos que incorporan pérdidas en elementos pasivos y dispositivos de conmutación conserva una representación estructurada en el marco PCH. Por lo tanto, se introduce explícitamente el efecto de las pérdidas dentro de las topologías típicas de convertidores de potencia, con el propósito de que, en el futuro, el esquema de control pueda garantizar la máxima eficiencia en los regímenes transitorios.

El resto del trabajo se encuentra distribuido de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe el modelo general ideal de los convertidores, se describen las pérdidas consideradas, así como el modelado de dos topologías de los convertidores de DC-DC: Buck y Boost con las pérdidas consideradas en el modelado. En la Sección 3 se desarrolla la validación numérica de los modelos a través de simulaciones en MATLAB® Simulink®, para comparar el desempeño del modelo ideal y del modelo propuesto respecto a un circuito realista en Simscape. Finalizando en la Sección 4 con las conclusiones del trabajo.

2. MODELO MATEMÁTICO

Un modelo empleado comúnmente en el área de electrónica de potencia es el modelo promediado, mediante el cual se obtiene una representación continua del comportamiento dinámico de los CEP, considerando las dos configuraciones posibles del interruptor controlado: abierto y cerrado. Al analizar por separado estas dos etapas de conmutación, se construyen modelos que describen la dinámica en cada estado y, posteriormente, se realiza un

proceso de promediado, ponderado por el ciclo de trabajo del interruptor. Esta representación continua es válida siempre que se opere a altas frecuencias de conmutación, ya que, bajo esas condiciones, las variaciones dentro de un solo período de conmutación son pequeñas en comparación con sus valores promedio. Este procedimiento facilita la obtención de un modelo equivalente continuo que aproxima de forma adecuada el comportamiento real del convertidor a lo largo del tiempo y permite aplicar técnicas de control continuo bien establecidas.

El modelo promediado de un CEP descrito en (Sandoval Rodríguez, 2010) es

$$\bar{x}(t) = D(t)x_{\text{on}}(t) + (1 - D(t))x_{\text{off}}(t),$$

donde $D(t)$ es el ciclo de trabajo y considerando que $D \in [0, 1]$, $x_{\text{on}}(t)$ es el comportamiento del sistema cuando el interruptor está cerrado, y $x_{\text{off}}(t)$ cuando está abierto.

Un modelo general que usa esta metodología para los convertidores de potencia conmutados sin pérdidas, que puede describir la topología Buck y Boost bajo el enfoque PCH, se encuentra en (Hernandez-Gomez et al., 2010) y está dado por

$$\dot{x} = \left(J_0 + \sum_{i=1}^m J_i u_i - R \right) \nabla H(x) + \left(G_0 + \sum_{i=1}^m G_i u_i \right) E, \quad (1)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, u_i es la componente i , para $i = 1, \dots, m$ del vector de entradas $u \in \mathbb{R}^m$ y $E \in \mathbb{R}^f$ es el vector de fuentes. Las matrices de interconexión constantes $J_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ están dadas por matrices antisimétricas $J_i = -J_i^\top$, para $i = 1, \dots, m$. La matriz de disipación simétrica $R = R^\top \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Las matrices de incidencias de entradas constantes $G_i \in \mathbb{R}^{n \times f}$ desde $i = 1, \dots, m$. La función Hamiltoniana $H(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ es una función cuadrática $H(x) = \frac{1}{2}x^\top P x$ donde $P = P^\top > 0$; $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y por lo tanto su gradiente es $\nabla H(x) = P x$.

Inspirados en este modelo general, se propone derivar un modelo equivalente considerando las pérdidas en los elementos pasivos y activos, con el fin de representar el sistema de forma más precisa.

2.1 Modelado de pérdidas

Modelado de los elementos pasivos: Las pérdidas asociadas a los elementos almacenadores de energía, como inductores y capacitores, pueden modelarse de dos maneras principales:

- (1) **Resistencia en serie:** Representa la disipación de energía mientras el elemento está en operación, es decir, cuando circula corriente a través de él.
- (2) **Resistencia en paralelo:** Refleja la pérdida de energía almacenada en el elemento cuando se encuentra en reposo, simulando fugas o disipaciones internas.

A lo largo de este trabajo se consideran las pérdidas durante la operación, que son las más relevantes en términos de eficiencia y confiabilidad del sistema.

Modelado de interruptores: Para el modelado de las pérdidas en los dispositivos activos de conmutación, se emplea un modelo que consiste en una resistencia en serie

con una fuente de voltaje, con el objetivo de capturar la caída de voltaje entre los terminales del interruptor durante su conducción, así como la potencia disipada como función de la corriente.

Adicionalmente, una forma simplificada de incluir las pérdidas por conmutación es mediante la adición de una resistencia en serie. Sin embargo, dicho término resulta redundante, ya que su efecto puede incluirse en la resistencia de conducción. Este enfoque deja abierta la posibilidad de refinar el modelo en futuras etapas.¹

Se seleccionan las variables de estado como

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_L \\ q_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Li_L \\ CV_C \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{x} = \begin{bmatrix} L \frac{d}{dt} i_L \\ C \frac{d}{dt} V_C \end{bmatrix}, (2)$$

donde λ_L es el flujo del inductor y q_C es la carga del capacitor. Se considera el interruptor controlado Q cuando está cerrado con $u = 1$ y abierto con $u = 0$.

2.2 Convertidor Buck

El diagrama electrónico donde se consideran las pérdidas en los elementos pasivos con voltajes y corrientes propuestos del convertidor Buck está ilustrado en la Figura 1, donde se identifican las resistencias en serie del inductor y del capacitor, así como los elementos semiconductores como el diodo D y el interruptor Q.

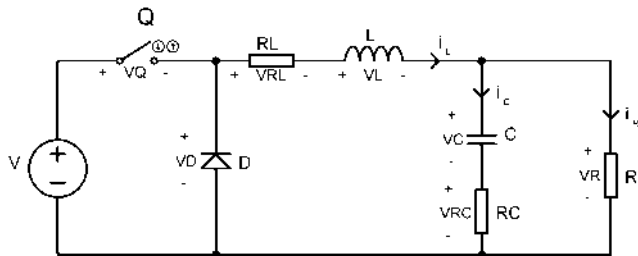


Figura 1. Diagrama del convertidor Buck.

En la Figura 1, se identifica V como la fuente de alimentación DC, R es la resistencia de carga, C y R_C representan el capacitor con capacitancia C y sus pérdidas R_C , L y R_L es el inductor con inductancia L y sus correspondientes pérdidas R_L . Finalmente, D es el semiconductor no controlado (diodo) y Q es el conmutador (*e.g.* IGBT o MOSFET). Se asume que el convertidor se encuentra en modo de conducción continua $i_L > 0$.

Para tener un análisis detallado de las dos configuraciones posibles bajo el estado del interruptor, se analiza cada una por separado:

- (1) **Interruptor Q cerrado:** Se modela el efecto de las pérdidas de conducción en Q mediante una resistencia R_Q con una fuente de voltaje V_{CE} en serie, como se ilustra en la Figura 2.

¹ Nótese que la inclusión de las pérdidas no rompe las propiedades de estabilidad del sistema, dado que para todo valor de las resistencias la matriz de disipación sigue siendo positiva semidefinida, es decir, $R > 0$.

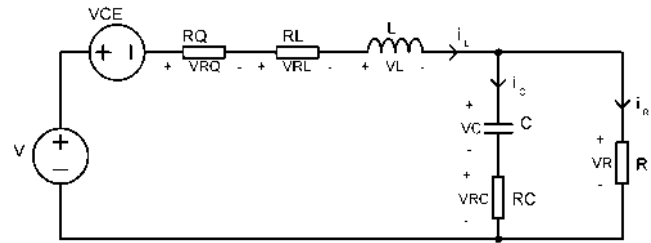


Figura 2. Diagrama del convertidor Buck con Q cerrado.

- (2) **Interruptor Q abierto:** Se modela el efecto de las pérdidas por conducción en el diodo no controlado D, como R_D en serie con una fuente V_{AK} como se ilustra en la Figura 3.

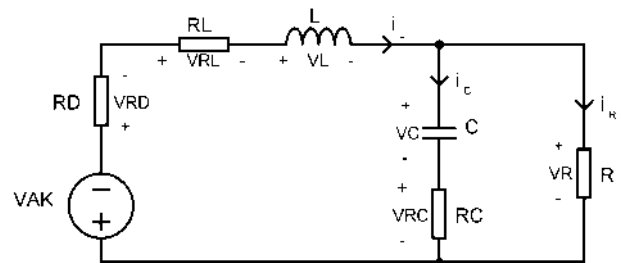


Figura 3. Diagrama del convertidor Buck con Q abierto.

Usando la herramienta de promediación se obtiene el siguiente modelo matemático

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \left(-R_L - R_D - \frac{RR_C}{R+R_C}\right) \frac{1}{L} x_1 + \left(\frac{R_C}{R+R_C} - 1\right) \frac{1}{C} x_2 \\ &\quad + (V - V_{CE} + V_{AK})u + (R_D - R_Q) \frac{1}{L} x_1 u - V_{AK} ; \\ \dot{x}_2 &= \frac{R}{R+R_C} \frac{1}{L} x_1 - \frac{1}{R+R_C} \frac{1}{C} x_2 ;\end{aligned}$$

donde los estados x se definieron en (2), y los parámetros son los descritos en los diagramas de las Figuras 1-3.

Este modelo se puede escribir de forma general en una estructura Hamiltoniana usual

$$\dot{x} = (J_0 - R(u))\nabla H(x) + G_0 E + G_1 E u \ ,$$

donde

$$\begin{aligned}
J_0 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 + \frac{R_C}{R + R_C} \\ 1 - \frac{R_C}{R + R_C} & 0 \end{bmatrix}; \\
R(u) &= \begin{bmatrix} R_L + R_D + \frac{RR_C}{R + R_C} - (R_D - R_Q)u & 0 \\ 0 & \frac{1}{R + R_C} \end{bmatrix}; \\
\nabla H(x) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L}x_1 \\ \frac{1}{C}x_2 \end{bmatrix}; \quad G_0 E = \begin{bmatrix} -V_{AK} \\ 0 \end{bmatrix}; \\
G_1 E &= \begin{bmatrix} V + V_{AK} - V_{CE} \\ 0 \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

2.3 Convertidor Boost

El diagrama electrónico donde se consideran las pérdidas en los elementos pasivos con voltajes y corrientes propuestos del convertidor Boost está ilustrado en la Figura 4, donde, de manera equivalente al caso del convertidor Buck, se identifican las resistencias de los elementos pasivos, así como los conmutadores Q y D , empleando la misma nomenclatura que en el convertidor descrito anteriormente.

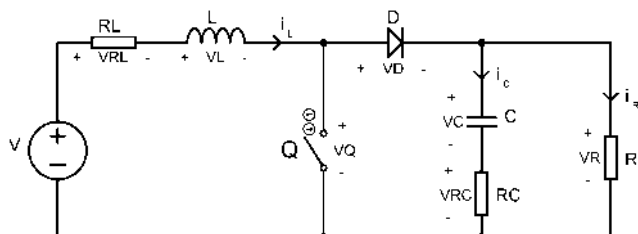


Figura 4. Diagrama del convertidor Boost.

Al igual que en el caso anterior, se describen las dos configuraciones posibles del circuito dependiendo del modo de operación del interruptor controlado Q :

- (1) **Interruptor Q cerrado:** Esta configuración modela el efecto de las pérdidas de conducción en Q mediante una resistencia R_Q con una fuente de voltaje V_{CE} en serie, como se muestra en la Figura 5.

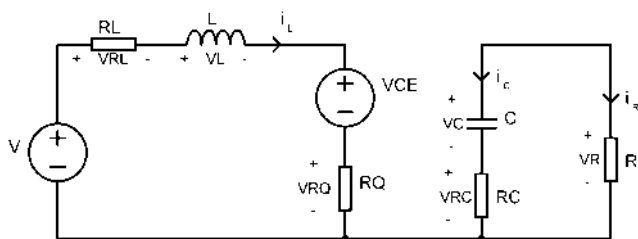


Figura 5. Diagrama del convertidor Boost con Q cerrado.

- (2) **Interruptor Q abierto:** Esta configuración modela el efecto de las pérdidas en D como R_D con su fuente en serie V_{AK} ilustrado en la Figura 6.

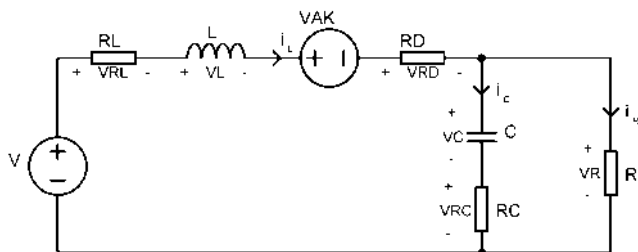


Figura 6. Diagrama del convertidor Boost con Q abierto.

Nuevamente, con la herramienta de promediación se obtiene la siguiente representación matemática

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\left(R_L + R_D + \frac{R_C R}{R + R_C} - \left(R_D - R_Q + \frac{R_C R}{R + R_C}\right)u\right) \frac{1}{L} x_1 \\ &\quad + (1-u) \left(\frac{R_C}{R + R_C} - 1\right) \frac{1}{C} x_2 + (V_{AK} - V_{CE})u + V - V_{AK}; \\ \dot{x}_2 &= -(1-u) \left(\frac{R_C}{R + R_C} - 1\right) \frac{1}{L} x_1 - \frac{1}{R + R_C} \frac{1}{C} x_2.\end{aligned}$$

La cual también se puede expresar bajo el formalismo PCH

$$\dot{x} = (J_0 + J_1 u - R(u)) \nabla H(x) + G_0 E + G_1 E u,$$

donde

$$\begin{aligned}J_0 + J_1 u &= \begin{bmatrix} 0 & (1-u) \left(\frac{R_C}{R + R_C} - 1\right) \\ -(1-u) \left(\frac{R_C}{R + R_C} - 1\right) & 0 \end{bmatrix}; \\ R(u) &= \begin{bmatrix} R_L + R_D + \frac{R_C R}{R + R_C} - (R_D - R_Q + \frac{R_C R}{R + R_C})u & 0 \\ 0 & \frac{1}{R + R_C} \end{bmatrix}; \\ \nabla H(x) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} x_1 \\ \frac{1}{C} x_2 \end{bmatrix}; \quad G_0 E = \begin{bmatrix} V - V_{AK} \\ 0 \end{bmatrix}; \\ G_1 E &= \begin{bmatrix} V_{AK} - V_{CE} \\ 0 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

Con estos modelos obtenidos se puede observar que esta nueva propuesta se apega a la estructura Hamiltoniana conocida para los convertidores de potencia. Ambas topologías pueden ser representadas mediante el siguiente modelo unificado

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \left(J_0 + \sum_{i=1}^m J_i u_i - R_0 - \sum_{i=1}^m R_i u_i\right) \nabla H(x) \\ &\quad + \left(G_0 + \sum_{i=1}^m G_i u_i\right) E.\end{aligned}\quad (3)$$

3. VALIDACIÓN NUMÉRICA DE LOS MODELOS

Una vez obtenida la representación PCH para las topologías estudiadas, en esta sección se presenta el procedimiento para validar los modelos obtenidos. La validación se llevó a cabo mediante simulaciones en el entorno MATLAB®/ Simulink® - Simscape, esta última es una herramienta que permite la construcción y simulación de sistemas físicos. Para este propósito, se diseñaron los convertidores bajo estudio, configurando los parámetros disponibles con valores representativos del sistema real. El objetivo fue reproducir su comportamiento dinámico de la forma más realista para considerarlo como el modelo real de referencia y así comparar su respuesta con los modelos matemáticos (ideal y propuesto). Tomar como referencia el modelo real de Simscape permite visualizar la dinámica de las pérdidas por conducción en el modelo propuesto a diferencia del modelo ideal, comúnmente usado en el diseño de controladores.

Para realizar una comparación más precisa, en cada configuración se utilizó el índice de desempeño conocido como Integral del Error Cuadrado (ISE, por sus siglas en inglés). Este índice penaliza en mayor medida los errores grandes y acumula su efecto a lo largo del tiempo, proporcionando una medida cuantitativa del desempeño de los

modelos respecto al comportamiento real. Los errores e se obtienen de cada modelo con respecto a la referencia del comportamiento real obtenida por Simscape, en voltaje y corriente, para cada configuración (Buck y Boost).

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt,$$

3.1 Validación del modelo para el convertidor Buck

Los valores en la Tabla 1 fueron obtenidos a través de la metodología descrita en (Jiménez de la Peña, 2019).

Parámetros	Valores
Fuente de Voltaje de entrada V	24 [V]
Voltaje de salida deseado V_R	12 [V]
Resistencia de carga R	10 [Ω]
Frecuencia de conmutación f_c	50 [kHz]
Inductancia L	470 [μ H]
Capacitancia C	4.4 [μ F]
Resistencia en el inductor R_L	0.24 [Ω]
Resistencia en el capacitor R_C	0.1 [Ω]
Resistencia de conducción del diodo R_D	0.083 [Ω]
Resistencia en conducción del MOSFET R_Q	0.026 [Ω]
Voltaje de activación del diodo V_{AK}	0.55 [V]
Voltaje de activación del MOSFET V_{CE}	0 [V]

Tabla 1. Parámetros del convertidor Buck

En la configuración del convertidor Buck, los resultados de las simulaciones están compuestos por el sistema real simulado a través de Simscape, el modelo ideal y el modelo propuesto, donde se les suministra una entrada con ciclo de trabajo del 50%. La Figura 7 muestra el comportamiento de los voltajes (a) y las corrientes (b) del sistema real, el modelo ideal y del modelo propuesto.

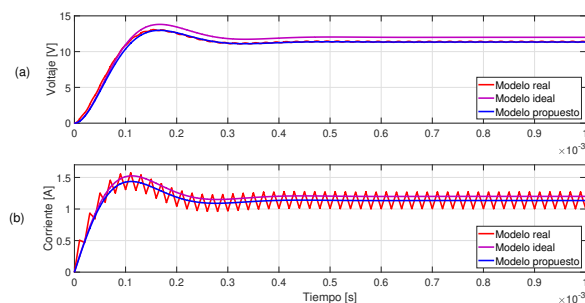


Figura 7. Comparación de los voltajes (a) y las corrientes (b) del convertidor Buck

Recordando que se toma como referencia el sistema real simulado en Simscape, los errores del modelo ideal y del modelo propuesto con el índice ISE se muestran en la Figura 8, donde se puede verificar que el error acumulado en voltaje por el modelo propuesto se mantiene, a simple vista, constante comparándola con la del modelo ideal que tiene una mayor pendiente. En el índice del error de corrientes, el error acumulado para ambos casos se incrementa, lo cual es razonable, ya que las dos aproximaciones se basan en una representación promediada; sin embargo, el error acumulado de corriente por el modelo con pérdidas es menor que el obtenido con el modelo ideal.

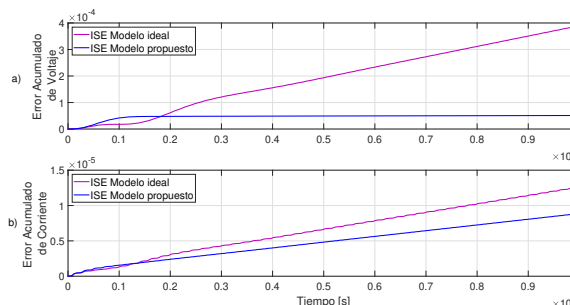


Figura 8. ISE de los voltajes (a) y las corrientes (b) del convertidor Buck

3.2 Validación del modelo para el convertidor Boost

Los parámetros usados para el convertidor Boost que se encuentran en la Tabla 2 se obtuvieron a través de la metodología descrita en (Díaz Rodríguez et al., 2024).

Parámetros	Valores
Fuente de Voltaje de entrada V	5 [V]
Voltaje de salida deseado V_R	10 [V]
Resistencia de carga R	10 [Ω]
Frecuencia de conmutación f_c	200 [kHz]
Inductancia L	470 [μ H]
Capacitancia C	9.4 [μ F]
Resistencia en el inductor R_L	0.24 [Ω]
Resistencia en el capacitor R_C	0.2 [Ω]
Resistencia de conducción del diodo R_D	0.083 [Ω]
Resistencia en conducción del MOSFET R_Q	0.026 [Ω]
Voltaje de activación del diodo V_{AK}	0.55 [V]
Voltaje de activación del MOSFET V_{CE}	0 [V]

Tabla 2. Parámetros del convertidor Boost

En la Figura 9 se comparan los comportamientos de voltaje (a) y corriente (b) del convertidor Boost del sistema real obtenido con Simscape, el modelo ideal y el modelo propuesto con una entrada con ciclo de trabajo del 50%.

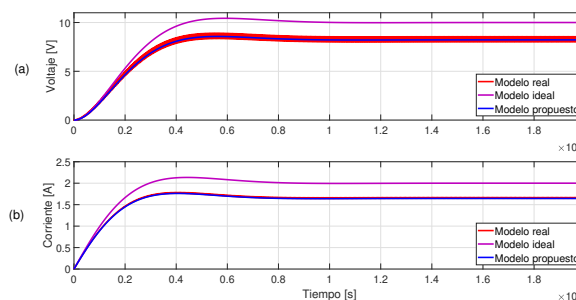


Figura 9. Comparación de los voltajes (a) y las corrientes (b) del convertidor Boost

Al igual que en la configuración del Boost, se aplicó el índice ISE tomando como referencia el comportamiento de la simulación real en Simscape. En la Figura 10 se presentan los resultados obtenidos y se observa que el error acumulado del modelo con pérdidas es drásticamente menor al error acumulado del modelo ideal, ya que tanto

para los errores acumulados de voltaje como para el de la corriente, las gráficas presentan una mayor pendiente, mientras que para el modelo con pérdidas esta pendiente es cercana a cero.

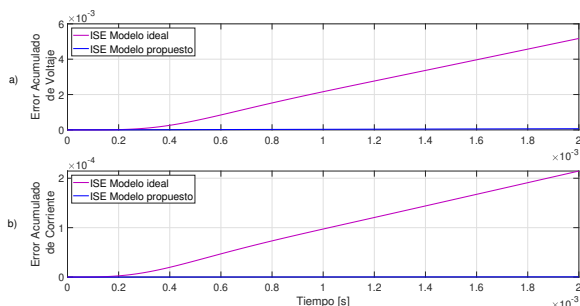


Figura 10. ISE de los voltajes (a) y las corrientes (b) del convertidor Boost

3.3 Análisis de Resultados

A lo largo de las Figuras (7-10) correspondientes a cada configuración, se observa que los modelos propuestos, los cuales incluyen pérdidas por conducción en los elementos pasivos y en los elementos semiconductores, coinciden con el comportamiento, en voltaje y corriente, del sistema de referencia real de Simscape, en contraposición con los modelos ideales. Esta comparación se puede ver claramente a través del índice ISE, donde al tomar como referencia los comportamientos de Simscape, se observa que las de los modelos ideales presentan una pendiente mayor a las que se obtienen con los modelos propuestos, lo que indica que hay una mayor discrepancia entre los modelos ideales y los reales a comparación de los modelos propuestos, describiendo de manera más fidedigna el comportamiento real del sistema.

4. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se incorporó el efecto de las pérdidas en el modelado de las topologías más comunes de CEP no aislados del tipo DC-DC; el convertidor Buck y el convertidor Boost. Primero, se consideraron las pérdidas en los elementos pasivos a través de resistencias equivalentes en los inductores y capacitores, con un enfoque centrado en las condiciones de operación. Asimismo, se incluyeron las pérdidas por conducción en los dispositivos de conmutación, al ser las principales fuentes de pérdidas en estos elementos. El modelo obtenido preserva una estructura PCH lo que permite analizar el sistema desde una perspectiva energética y facilita la aplicación futura de estrategias de control fundamentadas en la teoría del control basado en pasividad. La validez de los modelos propuestos se comprobó mediante simulaciones numéricas, donde se observó una mayor correspondencia con el comportamiento de un sistema real en comparación con los modelos ideales. La obtención de estos modelos representa un avance hacia una descripción más realista del comportamiento de los convertidores en condiciones no ideales y ofrece una base para diseñar controladores que optimicen y que respondan mejor a las pérdidas reales del sistema.

REFERENCES

- Díaz Rodríguez, C.A., Romano Torres, W.N., and Gallego Rodríguez, G.E. (2024). Diseño e implementación de un convertidor Boost regulado empleando una estrategia de control PI. *Scientia et Technica*, 29(02), 73–88. doi:10.22517/23447214.25452.
- El Fadil, H., Giri, F., Haloua, M., and Ouadi, H. (2003). Nonlinear and adaptive control of buck power converters. In *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475)*, 4475–4480. IEEE, Maui, HI, USA. doi:10.1109/CDC.2003.1272244.
- Hassan, M.A., Li, E.p., Li, X., Li, T., Duan, C., and Chi, S. (2019). Adaptive Passivity-Based Control of dc–dc Buck Power Converter With Constant Power Load in DC Microgrid Systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(3), 2029–2040. doi:10.1109/JESTPE.2018.2874449.
- Hernandez-Gomez, M., Ortega, R., Lamnabhi-Lagarrigue, F., and Escobar, G. (2010). Adaptive PI Stabilization of Switched Power Converters. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(3), 688–698. doi:10.1109/TCST.2009.2023669.
- Hossain, M., Rahim, N., and Selvaraj, J.A. (2018). Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 205–230. doi:10.1016/j.rser.2017.07.017.
- Jiménez de la Peña, A. (2019). *Diseño de convertidor dc/dc con control remoto para smartgrids*. Ph.D. thesis.
- Lakomy, K., Madonski, R., Dai, B., Yang, J., Kicki, P., Ansari, M., and Li, S. (2022). Active Disturbance Rejection Control Design With Suppression of Sensor Noise Effects in Application to DC–DC Buck Power Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(1), 816–824. doi:10.1109/TIE.2021.3055187.
- Nkembi, A.A., Cova, P., Sacchi, E., Coraggioso, E., and Delmonte, N. (2023). A Comprehensive Review of Power Converters for E-Mobility. *Energies*, 16(4), 1888. doi:10.3390/en16041888.
- Ravindran, R. and Massoud, A.M. (2025). State-of-the-Art DC-DC Converters for Satellite Applications: A Comprehensive Review. *Aerospace*, 12(2), 97. doi:10.3390/aerospace12020097.
- Sandoval Rodriguez, G. (2010). *Compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos de potencia*. Ph.D. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Sivakumar, S., Sathik, M.J., Manoj, P., and Sundararajan, G. (2016). An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1475–1485. doi:10.1016/j.rser.2015.12.057.
- Zambrano-Prada, D.A., Aroudi, A.E., López-Santos, O., Vázquez-Seisdedos, L., and Martí-Nez-Salamero, L. (2025). Adaptive Sliding Mode Control of a Boost Converter With Unknown Constant Power Load. *IEEE Access*, 13, 33714–33732. doi:10.1109/ACCESS.2025.3543659.