

## **Regulación de voltaje de un convertidor *buck-boost* mediante su modelo difuso inverso**

Nadia S. Zúñiga-Peña<sup>1</sup>, Marco A. Márquez-Vera<sup>1</sup>, Julio C. Ramos-Fernández<sup>1</sup>,  
Luis F. Cerecero-Natale<sup>2</sup>, Filiberto Muñoz-Palacios<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Pachuca,  
Departamento de Mecatrónica, Pachuca,  
México

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica de Riviera Maya,  
Ingeniería en Mantenimiento, Quintana Roo,  
México

nasamzp@gmail.com, {marquez, jramos, mupafi}@upp.edu.mx  
luis.cerecero@utrivieramaya.edu.mx

**Resumen.** Se muestra la aplicación del modelo inverso difuso para la regulación de voltaje en un convertidor buck-boost, los convertidores dc-dc entregan un voltaje constante incluso cuando hay fluctuación en el voltaje de entrada o en la resistencia de carga, de manera que cuando existen perturbaciones de este tipo, el controlador debe regular el ciclo de trabajo para mantener el punto de operación especificado. Para lograr sobreponerse a las perturbaciones externas, el modelo difuso debe adaptar las reglas difusas que caracterizan al convertidor, con este fin se empleó un filtro digital y el algoritmo de mínimos cuadrados, dado que la frecuencia de operación es de 20KHz se requiere que la evaluación de la señal de control se obtenga rápidamente, por lo cual el modelo difuso debe emplear pocas reglas. Con el fin de cumplir con lo descrito, se propone usar un sistema difuso tipo Sugeno para evitar la fase de retirar la parte difusa del controlador, lo cual es a su vez conveniente si se emplean mínimos cuadrados recursivos para adaptar el modelo difuso.

**Palabras clave:** Lógica difusa, convertidor buck-boost, modelo inverso difuso.

### **Voltage regulation for a buck-boost converter by using its inverse fuzzy model**

**Abstract.** It is shown an application of an inverse fuzzy model for voltage regulation in a buck-boost converter, the dc-dc converter supply a constant voltage even with fluctuations in the power supply or disturbances in the resistance load, thus when disturbances are presented, the controller must change

the duty cycle to regulate the converter's output. To overcome the changes in the power input or load output, the fuzzy model can update the fuzzy rules with a digital filter and least squares, for real applications the control signal must be computed fast enough due the working frequency of 20KHz, for this reason this fuzzy model has only eight fuzzy rules. Also it is proposed a Sugeno fuzzy inference system to avoid the defuzzification, and this kind of fuzzy systems can be updated with the least squares proposed as well.

**Keywords:** Fuzzy logic, buck-boost converter, inverse fuzzy model.

## 1. Introducción

Los convertidores dc-dc son empleados en muchos aparatos eléctricos como hornos de microondas, computadoras, robots, aeronaves, equipo de telecomunicaciones etc. [1]. Un convertidos dc-dc emplea una fuente de voltaje y un sistema de conmutación que conecta la entrada de voltaje a un inductor, cada vez que el interruptor cambia de posición, el inductor entrega la energía que almacenó a la carga, la cual es comúnmente vista como una resistencia, en paralelo a la carga se conecta un capacitor de modo que el convertidor puede llegar a interpretarse como un filtro LC.

Existen diferentes tipos de convertidores, el tipo buck es un reductor de voltaje, donde el voltaje de salida es menor al voltaje de entrada, éste es el convertidor más sencillo de diseñar. Las variaciones en el voltaje de alimentación del convertidor se ven atenuadas en el voltaje de salida [2], dada su característica de reducir el voltaje de salida, la corriente que entrega es mayor a la corriente de alimentación del convertidor; además, si el interruptor se mantiene todo el tiempo encendido, el voltaje de salida sería igual al voltaje de entrada.

Para lograr una eficiencia cercana al 90% la frecuencia de operación se propone de al menos 20KHz [4] debido a que frecuencias menores pueden ser detectadas por el oído humano lo cual resulta desagradable, la intensidad del ruido depende de la corriente eléctrica en la bobina, por ejemplo el zumbido en algunos reguladores de voltaje es debido a si operación a 50 o 60 Hz, pero frecuencias mayores a 6.3 KHz pueden ser más molestas [5]; de cualquier modo, al usar frecuencias aún mayores, el filtro LC puede emplear valores de inductancia y capacitancia más pequeños pero para una corriente eléctrica cercana a lo máximo que pueda conducir el interruptor puede ocasionar que el interruptor no funcione correctamente, ya que de emplear un transistor BJT el efecto sería que el transistor se quedaría saturado debido al tiempo de apagado y a la energía almacenada debido a su capacitancia interna, por otro lado al emplear un MOSFET incremental como interruptor se notarían problemas para encender debido al tiempo requerido para formar el canal interno [3].

En el caso particular de un convertidor buck, si el interruptor se mantiene encendido, el voltaje de salida sería igual al voltaje de entrada, pero al emplear un convertidor tipo boost o uno buck-boost, si el ciclo de trabajo es cercano al 100%, la corriente en la bobina, en el interruptor y en el diodo crecería hasta sobrecalentar alguno de estos elementos, en la subsección 2.1 se describen los componentes propuestos para el convertidor a modelar.

El convertidor boost emplea otra configuración en la ubicación del interruptor y la bobina, ahora el voltaje de salida es mayor al de entrada, en esta configuración resulta más complicado reducir el efecto de perturbaciones externas, ya que se amplifica su efecto [4], en este tipo de convertidor, si el interruptor se mantiene abierto, el voltaje de salida sería igual al de entrada, pero si se mantiene cerrado, la corriente en el inductor sería muy alta ya que se tendría un corto-circuito en dc [6].

En este trabajo, se realiza el control de un convertidor buck-boost en el cual el voltaje de salida puede ser de mayor o menor amplitud que la entrada, presentando el mismo problema que el convertidor boost si el interruptor se mantiene cerrado, algo interesante del buck-boost es que el voltaje de salida presenta polaridad inversa a la entrada [7]. En el caso de un convertidor buck el circuito puede interpretarse como un filtro LC aplicado a una señal de PWM [3], pero para los otros dos la bobina es la encargada de entregar la corriente necesaria a la carga por lo que es importante evitar saturar su núcleo, para este fin, el inductor se carga cuando el interruptor está cerrado y entrega su energía a la carga cuando se abre el switch, el rizo de voltaje es filtrado por el capacitor en paralelo con la carga.

Existen algunas modificaciones para mejorar este tipo de convertidores, por ejemplo, existe el convertidor tipo Cuk que emplea una bobina más en la salida, logrando así un mejor filtrado en el voltaje y un comportamiento similar al del buck-boost, otro convertidor es el SEPIC que emplea dos inductores y dos capacitores, es similar al Cuk pero no invierte la polaridad de la salida [1].

Para controlar el voltaje de salida, manteniendo los parámetros del circuito constantes, se calcula el ciclo de trabajo para determinar los tiempos en que el interruptor de cierra, este diseño se realiza en lazo abierto sin retroalimentar la salida. En trabajo de Guldemir [8] se emplearon modos deslizantes en un convertidor buck-boost, esta aplicación fue debida a la naturaleza discontinua del modelo

Para simular al convertidor buck-boost se requiere evaluar el modelo suponiendo una frecuencia de conmutación de varios KHz, para esto se empleó el modelo propuesto por Sira-Ramírez y Silva-Ortigoza [9], uno similar fue presentado por Pawlak [10] empleando también modos deslizantes para controlar el voltaje. En trabajo de Mahery y Babaei [11] se presenta un modelo matemático y el análisis del transitorio y estado estacionario de convertidores de potencia.

En las simulaciones mostradas en la literatura se emplean interruptores ideales, además del interruptor se emplea un diodo para restringir la dirección de la corriente eléctrica también asumido ideal [9, 10, 16]. En este trabajo, se considera el efecto de dispositivos reales. El control difuso propuesto emplea el valor de la corriente eléctrica en la bobina para calcular el PWM a aplicar en el interruptor. Para medir la corriente eléctrica, se usa una resistencia en serie con el inductor, dado que la eficiencia se reduce por usar dicha resistencia [12] en la Fig. 6 de [1] se presenta como varía el voltaje de salida ante diferentes valores de la resistencia en serie con la bobina, en su Fig. 7 se muestra la eficiencia que suele ser entre 70 y 90% [1].

Dado que se trata de un sistema no-lineal invariante en el tiempo [12], no es suficiente con emplear teoría de control lineal [8], una alternativa son los modos deslizantes dado el modelo discontinuo del convertidor [13]. Una aplicación de este tipo de control en un convertidor tipo boost la presentó Guldemir [14]; algunos conceptos sobre la estabilidad de este controlador se dan en la Proposición 2 de [9], un

estudio sobre el convertidor buck se presentó por Guldemir [15], así como por Reddy y Banakar [16].

Dado que pueden presentarse perturbaciones externas, el modelo podría tratarse como variante en el tiempo, aunque los modos deslizantes presentan robustez y garantizan la estabilidad del sistema en lazo cerrado [17], existen también aplicaciones de control adaptable para mejorar el control ante perturbaciones o variación paramétrica de los componentes por calentamiento [18]. No obstante, no es posible determinar cómo cambiarán los parámetros o que perturbaciones se presentarán, para esto se puede emplear lógica difusa, la cual puede operar ante incertidumbre [2, 19].

Dadas las ventajas mencionadas de la lógica difusa se propone un controlador difuso a partir de la inversión del modelo del convertidor, este tipo de control puede operar en lazo abierto cancelando las dinámicas del sistema, pero si ocurren perturbaciones, se requiere ajustar el modelo difuso, lo cual se logra mediante mínimos cuadrados recursivo. El principal objetivo de este trabajo es usar información sobre el voltaje de salida y la corriente en la bobina para generar la señal de control a partir del modelo difuso aproximado adaptado en línea.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera, primero en la sección Materiales y Métodos se presenta el modelo matemático del convertidor buck-boost y el modelo difuso obtenido a partir de mínimos cuadrados teniendo como entradas el voltaje del capacitor, el voltaje de la resistencia en serie con la bobina para estimar su corriente, así como una señal analógica que representa el PWM en el interruptor. A continuación, se presentan los Resultados donde se aprecian las simulaciones cuando se tienen perturbaciones en la fuente de alimentación y en la resistencia de carga. Finalmente, se presentan las Conclusiones obtenidas.

## 2. Materiales y métodos

En esta sección se presentan el diseño del convertidor y algunos conceptos sobre lógica difusa, también se muestra el diagrama del convertidor y el esquema de control empleado.

### 2.1. Convertidor buck-boost

Para la implementación del convertidor, se propuso emplear un transistor MOSFET incremental de canal N como interruptor, donde un valor lógico 1 represente al interruptor cerrado evitando una lógica negada, el transistor es el IRFZ44 el cual puede operar a una frecuencia de hasta 2MHz soportando 60V entre la fuente y el drenaje ( $V_{DS}$ ) con una corriente de conducción de 36A ( $I_D$ ) a una temperatura de 25°C o 50A a 100°C, su resistencia interna es de  $0.028\Omega$  ( $R_{DS(on)}$ ) [20].

El diodo a su vez debe soportar la corriente de operación y la frecuencia del PWM empleado. La carga considerada es de  $10\Omega$  ( $R_L$ ) el voltaje de alimentación considerado es de 12 V ( $V_{in}$ ) sin perturbaciones y el voltaje de salida deseado es de 24V, por lo que la corriente en el diodo de al menos 2.4 A, para esto se propone usar el diodo RURD4120S9A [21], estos valores propuestos son debido a que las fuentes de alimentación en el laboratorio entregan hasta 5A, para el convertidor la corriente de entrada de alrededor de  $2(24V)/10\Omega=4.8A$ .

En este trabajo se propone emplear una frecuencia de conmutación de 20 KHz ya que no se desea un ruido audible para el usuario, la resistencia para conocer la corriente en el inductor debe ser lo suficientemente pequeña para no afectar la eficiencia del convertidor, según los comentarios de Erickson [1] si la resistencia es 100 menor a la resistencia de carga, la eficiencia puede superar el 90%, por lo que se propone una resistencia de precisión de  $0.1\Omega$ .

En la Fig. 1 se muestra el diagrama del convertidor buck-boost, el diagrama fue dibujado con el software libre Livewire, en el caso en que el voltaje de salida debe variar respecto al tiempo se dice que el convertidor es dc-ac [12].

La ganancia de voltaje del convertidor está dada por la ecuación 1:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{D}{1-D}, \quad (1)$$

donde  $D$  representa el ciclo de trabajo del interruptor siendo un número entre cero y uno. El Inductor se calcula para tener siembre conducción de corriente en el circuito sin que el diodo recorte el flujo, para esto el rizo de corriente no debe tener valores negativos evitando así reducir la eficiencia en un modo de conducción continua.

Asumiendo una eficiencia de 100%, y despreciando las no-linealidades de los componentes, ya que a 20KHz la deformación de los pulsos de PWM no es de consideración en los componentes electrónicos, se obtiene que:

$$\frac{v_{out}^2}{R_L} = v_{in}^2 I_L D, \quad (2)$$

donde  $I_L$  representa el valor medio de la corriente eléctrica en el inductor y  $R_L$  es la resistencia de carga, con esta idea y considerando la frecuencia de 20KHz y un ciclo de trabajo mínimo de  $D=0.2$ , ahora se obtiene:

$$i_L = \frac{v_{in} D}{R_L (1-D)^2}. \quad (3)$$

El ciclo de trabajo mínimo  $D=0.2$  se eligió para tener un voltaje en la salida mayor a cero para construir un modelo difuso a partir de datos de encendido, en este caso el valor mínimo de salida de voltaje sería alrededor de  $-3V$  asumiendo un diodo ideal en el circuito recordando que el convertidor empleado invierte la polaridad en la salida.

El rizo de la corriente  $\Delta i_L$  debe tener como valor mínimo cero para tener un estado de conducción continua siendo:

$$i_{Lmin} = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{v_{in} D}{R_L (1-D)^2} - \frac{v_{in} DT}{2L}, \quad (4)$$

donde  $T$  es el periodo de conmutación; para evitar valores negativos en la corriente con el fin de no recortar energía y no reducir reduciendo la eficiencia, se propone que siempre  $i_L > 0A$  [9], de modo que la inductancia mínima está dada por la ecuación 5:

$$L_{min} \geq \frac{R_L (1-D)^2}{2f} = 16mH, \quad (5)$$

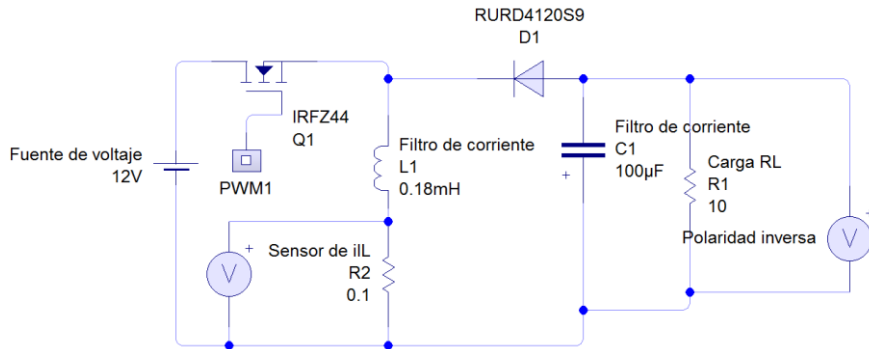


Fig. 1. Convertidor Buck-Boost.

para esto, se propuso emplear un inductor de 18mH. El voltaje de salida presenta un rizo  $\Delta v_{out}$  filtrado por el capacitor, siendo el rizo:

$$\Delta v_{out} = \frac{v_{out} DT}{R_L C}. \quad (6)$$

De este modo, la capacitancia mínima requerida para filtrar el voltaje con un rizo menor al 1% se obtiene mediante la ecuación 7:

$$C_{min} \geq \frac{D}{R_L f \frac{\Delta v_{out}}{v_{out}}} = 100 \mu F, \quad (7)$$

el cual es un valor comercial. El modelo matemático fue presentado en [8, 9], donde la señal  $u$  toma los valores 0 ó 1, indicando la conmutación entre dos modelos, uno para el caso cuando el transistor MOSFET está encendido (saturación) y para el caso de apagado (corte), dada la conmutación del transistor, éste no opera en la región lineal y la potencia que disipa es despreciable. El modelo matemático tiene dos variables de estado, la corriente eléctrica en la bobina  $i_L(t)$  y el voltaje en el capacitor  $v_C(t)$ , la señal de control está denominada como  $u_{in}(t)$  y la salida es el voltaje en la carga, el mismo que en el capacitor, el modelo está dado por la ecuación 8:

$$\begin{aligned} \frac{di_L(t)}{dt} &= (1-u) \frac{v_C(t) - 0.5}{L} + \frac{v_{out} - 0.1i_L(t)}{L} u_{in}, \\ \frac{dv_C(t)}{dt} &= -(1-u) \frac{i_L(t)}{C} - \frac{v_C(t)}{R_L C}, \end{aligned} \quad (8)$$

donde 0.5V es un voltaje que se resta debido al voltaje de conducción del diodo propuesto RURD4120S9A, otro diodo que puede emplearse es el BYW29-200 que logra operar a 28 KHz conduciendo 5A con una caída de voltaje de 0.8V o inclusive un diodo Schottky como el STPS1L40-Y que se emplea en la industria automotriz debido a su rápida respuesta;  $0.1i_L(t)$  representa el voltaje en la Resistencia propuesta como medio para estimar la corriente en la bobina, en la Fig. 1 se presenta el esquema del convertidor.

## 2.2. Control difuso

El control difuso emergió como una herramienta para tratar con información incompleta o imperfecta, la idea es trabajar con variables lingüísticas que son más fáciles de interpretar por algún operador que las variables numéricas [22]. Los sistemas difusos pueden ser interpretados como un filtro que absorbe los cambios en las mediciones debido a errores de modelado o incertidumbre paramétrica. Un control difuso es un mapeo de las entradas a las salidas del sistema mediante relaciones lingüísticas, ampliamente utilizado, incluso en electrodomésticos como hornos para arroz, lavavajillas o cámaras fotográficas, ahora la palabra fuzzy llega a ser sinónimo de “amigable con el usuario” o “buen desempeño”. Para construir el control difuso se empleó el modelo difuso obtenido con mediciones de un experimento anterior, la señal de entrada al convertidor es pseudo-aleatoria, misma que al ser comparada con una señal triangular para obtener una señal de PWM, tomando los valores  $i_L(t)$  y  $v_C(t)$  se construye un modelo reglas difusas de la forma:

$$R^i : \text{Si } i_L(kT) \text{ es } A^i \text{ y } v_C(kT) \text{ es } B_i \text{ y } u_c(kT) \text{ es } C_i, \\ \text{entonces } v_C((k+1)T) = \theta^i \quad (9)$$

donde  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$  son conjuntos difusos,  $\theta_i$  es un consecuente escalar para la  $i$ -ésima regla difusa dado que se trata de un sistema difuso tipo Sugeno, al tener una partición difusa con dos funciones de pertenencia para cada premisa, se cuenta con un modelo monótonico con lo que se puede garantizar la invertibilidad del modelo para obtener un controlador [23], además de tener la menor cantidad de reglas difusas posible [24],  $2^3 = 8$  reglas en esta aplicación.

El vector de estado está denotado por  $X$  y la salida deseada es  $y$ , los consecuentes escalares de las reglas difusas son obtenidos mediante mínimos cuadrados [23] usando la ecuación 10:

$$\theta_i = (X^T w_i X)^{-1} X^T w_i y_i, \quad (10)$$

donde  $X$  está formada por los valores de la corriente eléctrica en la bobina, el voltaje en el capacitor y el PWM de entrada,  $w_i$  es una matriz diagonal cuyos elementos son las pertenencias normalizadas obtenidas con las funciones de pertenencia.

Ahora, con los consecuentes de las reglas, se evalúa el modelo difuso con las mismas condiciones iniciales que el convertidor:

Para  $kT=0$

$$R^i : \text{Si } i_L(0) \text{ es } A^i \text{ y } v_C(0) \text{ es } B_i \text{ y } u_m(0) \text{ es } C_i, \\ \text{entonces } v_f(1) = \lambda_i^T(0)\theta_i; \quad (11)$$

Para  $kT > 0$

$$R^i : \text{Si } i_L(kT) \text{ es } A^i \text{ y } v_C(kT) \text{ es } B_i \text{ y } u_m(kT) \text{ es } C_i, \\ \text{entonces } v_f((k+1)T) = \lambda_i^T(kT)\theta_i,$$

donde  $\lambda_i(kT)$  es la pertenencia normalizada de las tres variables  $i_L(kT)$ ,  $v_C(kT)$  y  $u_c(kT)$ , por lo que se obtienen tres parámetros constantes para los consecuentes teniendo  $v_f$

$((k+1)T) = \lambda_i^T(kT)\theta_i$ , la agregación de las reglas difusas se realiza empleando la ecuación 12:

$$\lambda_i(kT) = \frac{\prod_{j=1}^8 \mu_{A_j}(x_i(kT))}{\sum_{i=1}^8 \prod_{j=1}^8 \mu_{A_j}(x_i(kT))}, \quad (12)$$

En (10)  $X$  representa las variables de estado, un esquema del modelo con las ocho reglas propuestas se muestra en la Fig. 2. La comparación entre la salida del modelo difuso y el voltaje de salida del convertidor se presenta en la Fig. 3 donde la línea azul es llamada "Real converter" denotando la salida real del convertidor, la línea roja es la salida del modelo difuso empleando la misma condición inicial que la del convertidor y es llamada "Fuzzy model".

En la Tabla 1 se presentan los consecuentes  $\theta$  de las reglas para el modelo difuso  $v_c((k+1)T) = f(i_L(kT), v_c(kT), u_{in}(kT))$ .

Con los límites entre  $[0, 1]$ , para el caso del voltaje del capacitor, la saturación está entre  $[-25, 0]$  y los límites de la corriente eléctrica en la bobina son  $[0, 8]$ ; el modelo difuso inverso mapea  $u_{in}(kT) = f^{-1}(x(kT), r((k+1)T))$ , siendo  $r$  la referencia deseada de voltaje, los centros  $C_j$  para calcular la señal de control se obtienen usando la ecuación 13:

$$C_j = \sum_{i=1}^2 \prod_{i=1}^2 \mu_{A_i}(x_i) \theta_i^j. \quad (13)$$

Para que el modelo difuso se monotónico es necesario que  $C_1 < C_2 < C_3 < \dots < C_n$  o  $C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_n$ , cada vez que se calcula los centros [23], al tener únicamente dos de ellos el modelo obtenido es monotónico; ahora la señal de control se calcula con la ecuación 14:

$$u_{in}(kT) = \sum_{j=1}^2 \mu_{C_j}(r(k+1)T) C_j, \quad (14)$$

donde  $C_j$  es el  $j$ -ésimo centro usado para calcular la señal de control. La simulación del control en lazo abierto usando el modelo difuso inverso se muestra en la Fig. 4, se usó un modelo de referencia para suavizar la señal de referencia, para usar un algoritmo de adaptación se requiere que la salida no cambie abruptamente si la referencia tiene discontinuidades [25]. El modelo de referencia es un filtro pasa-bajas dado por la función de transferencia en la ecuación 15:

$$\frac{Y_m(z)}{R(z)} = \frac{0.0198z}{z - 0.9802}, \quad (15)$$

Una forma más sencilla sería calcular el ciclo de trabajo  $D$  a partir de (1), obteniendo así la ecuación 16:



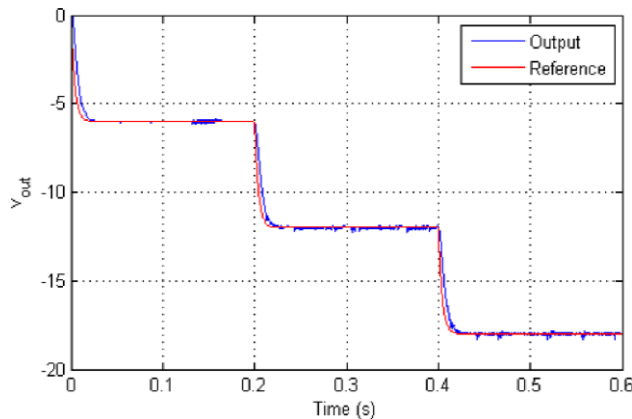


Fig. 4. Control difuso en lazo abierto

Tabla 1. Consecuentes de las reglas.

$X(kT)=(v_c(kT), i_L(kT))$	$u_{in}(kT)$	
	small	big
X1(small, small)	$\theta_1^1=-23.7358$	$\theta_1^2=-24.8571$
X2(small, big)	$\theta_3^1=-30.7124$	$\theta_4^2=-22.6584$
X3(big, small)	$\theta_5^1=-0.1096$	$\theta_6^2=-0.6775$
X4(big, big)	$\theta_7^1=12.4612$	$\theta_8^2=-3.7125$

$$D = \frac{v_{out}}{v_{out} + v_{in}} \tag{16}$$

Un problema ocurre cuando existen perturbaciones externas modificando la respuesta del convertidor, para contrarrestarlas se puede realizar el control en lazo cerrado con los sensores, para esto se calcula el error entre la salida del convertidor y la del modelo difuso para luego filtrarlo debido a la naturaleza discontinua del sistema; siendo la salida del modelo inverso la diferencia entre la señal de referencia y el error filtrado, además, mediante mínimos cuadrados recursivos se pueden actualizar los consecuentes de la reglas difusas del modelo en línea. Para obtener mejores resultados debe tomarse en cuenta el signo de la retroalimentación debido a que el convertidor buck-boost invierte la polaridad de la salida. Un esquema del controlador en lazo cerrado se muestra en la Fig. 5.

### 3. Resultados y discusión

Se simularon algunas variaciones en la resistencia de carga y en el voltaje de entrada a manera de perturbaciones. El controlador obtenido con el modelo difuso inverso puede operar en lazo abierto, pero ante las perturbaciones simuladas se realizó la adaptación del modelo difuso, se simuló un cambio en RL de 10 a 15Ω cuando el voltaje de referencia (set point) es menor a -8V en magnitud que el voltaje de entrada, de forma

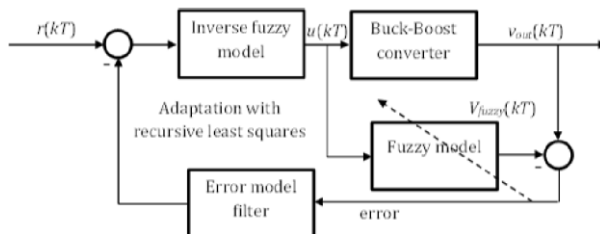


Fig. 5. Esquema de control en lazo cerrado.

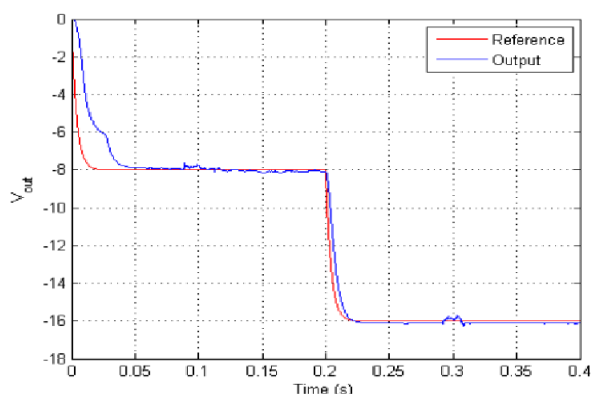


Fig. 6. Control en lazo cerrado con perturbaciones en la carga y voltaje de entrada.

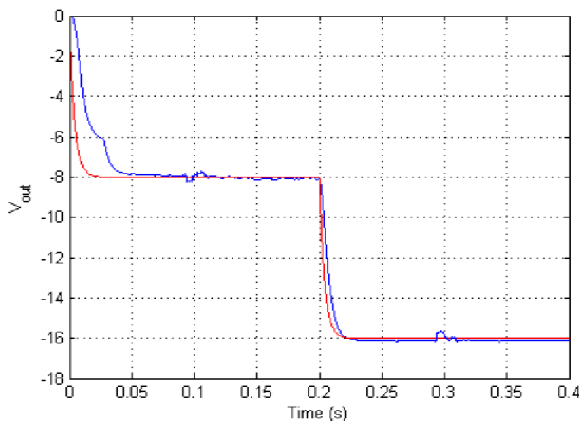


Fig. 7. Control en lazo cerrado con adaptación en los consecuentes de las reglas del modelo.

que el voltaje de salida podría incrementarse, esto se simuló entre los segundos [0.8s, 1.2s] Fig. 6; después se varió la carga de 10 a 5Ω cuando el voltaje deseado es -16V, el cual es más grande en magnitud que el voltaje de entrada, ahora la demanda de corriente en la carga es mayor lo que podría generar que el voltaje de salida sea menor que el esperado, esta perturbación se da en el intervalo [2.8s, 3.2s].

El resultado de emplear el control en lazo cerrado usando el modelo difuso inverso se presenta en la Fig. 7. Para mejorar el desempeño del controlador se emplearon

mínimos cuadrados recursivos con factor de olvido  $\eta$  usando una matriz inicial  $P(0)$  como se ve en la ecuación 17:

$$\theta(kT) = \theta((k-1)T) + \frac{P((k-1)T)\lambda(kT)}{\eta + \lambda^T(kT)P((k-1)T)\lambda(kT)}, \quad (17)$$

siendo:

$$P(kT) = \frac{1}{\eta} \left( P((k-1)T) - \frac{P((k-1)T)\lambda(kT)}{\eta\lambda^T(kT)P((k-1)T)\lambda(kT)} \right). \quad (18)$$

#### 4. Conclusiones

Se presentó un control mediante la inversión del modelo difuso del sistema para regular el voltaje de un convertidor de potencia Buck-Boost, este control tiene una buena respuesta incluso en lazo abierto, pero para reaccionar ante perturbaciones externas que modifiquen la respuesta del sistema se puede hacer la adaptación en línea del modelo difuso antes de invertirlo, de este modo se cierra el lazo de control atenuando los efectos de las perturbaciones o cambios paramétricos que puedan ocurrir en el convertidor, los consecuentes del modelo difuso se actualizan mediante mínimos cuadrados recursivos, siendo un punto interesante de diseño el factor de olvido, propuesto en este trabajo de 0.98 para evitar oscilaciones en el voltaje de salida.

Si bien este tipo de control limita la máxima salida posible del sistema, una mala elección del factor de olvido puede provocar oscilaciones no deseadas, por lo que la robustez es del control en lazo cerrado es un tema futuro a tratar, así como la aplicación de un control predictivo, dado que ya se cuenta con un modelo aproximado del sistema que además puede ser invertido.

Como trabajo futuro, se planea implementar esta ley de control en un convertidor tipo Cuk, el cual es similar al aquí utilizado, pero empleando control predictivo, además se piensa agregar un término integral para reducir aún más el error en estado estacionario.

**Agradecimientos.** Esta aplicación es con fines de regular el voltaje a aplicarse en vehículos autónomos manejados en el Laboratorio Nacional en Vehículos Autónomos y Exoesqueletos, proyecto 295536, al cual se le agradece el apoyo otorgado en la realización de esta implementación.

#### Referencias

1. Erickson, R.W.: Dc-dc power converters. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. DOI: 10.1002 /047134608X. W5808.pub2 (2001)
2. Marquez-Vera, Muñoz-Palacios, F., Farfán-García, J.M.: Fuzzy control type II in dc-dc converters. In: Proceeding of the IEEE Electronics, Robotics and Automotive Conference, pp. 272–276. DOI: 10.1109/CERMA.2012.51 (2012)
3. Rashid, M.H: Power Electronics: Circuits, Devices and Applications (2014)
4. Hart, D.W.: Introduction to Power Electronics (1996)

5. Lawton, B.W.: Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency. Institute of Sound and Vibration Research (2001)
6. Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P.: Power Electronics: Converters, Applications and Design (2009)
7. Ballester, E., Piqué, R.: Electrónica de Potencia: principios fundamentales y estructuras básicas (2012)
8. Guldemir, H.: Modeling and sliding mode control of dc-dc buck-boost converter. In: Proceedings of the International Advanced Technologies Symposium, pp. 475–480 (2011)
9. Sira-Ramírez, H., Silva-Ortigoza, R.: Modelling of dc-to-dc power converters in Control Design Techniques. In: Power Electronics Devices 2, pp. 11–58 (2006)
10. Pawlak, M.: Modeling and analysis of buck-boost dc-dc pulse converter. In: Proceedings of the International PhD Workshop, pp. 137–142 (2010)
11. Mahery, H.M., Babaei, E.: Mathematical modeling of buck-boost converter and investigation of converter elements on transient and steady state responses. Electrical Power and Energy Systems, 44, pp. 949–963 (2013)
12. Kiprianoff, M.: Prime dc-ac buck-boost converter: derivation of mathematical models and evaluation of lumped transmission lines with focus on size and efficiency. Master's thesis, Chalmers, University of Technology (2012)
13. Sira-Ramírez, H.: On the generalized pi sliding mode control of dc to dc power converters: A tutorial. International Journal of Control, 76, pp. 1018–1033 (2003)
14. Guldemir, H.: Sliding mode control of dc-dc boost converter. Journal of Applied Sciences, 5, pp. 588–592 (2005)
15. Guldemir, H.: Study of sliding mode control of dc-dc buck converter. Energy and Power Engineering, 3, pp. 401–406 (2011)
16. Reddy, P.D., Banakar, B.: Sliding mode control technique for dc-dc buck converter with improved performance. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 3, pp. 271–280 (2015)
17. Mattavelli, P., Rosetto, L., Spiazzi, G.: Small-signal analysis of dc-dc converters with sliding mode control. IEEE Transactions on Power Electronics, 12, pp. 96–102 (1997)
18. Nizami, T.K., Mahanta, C.: An intelligent adaptive control of dc-dc buck converters, Journal of the Franklin Institute. 353, pp. 2588–2613 (2016)
19. Solano-Martínez, J., Hissel, D., Péra, M.C.: Type-2 fuzzy logic control of a dc-dc buck converter. (IFAC) Proceeding, 45, pp. 103–108 (2012)
20. Siliconix, V.: Power mosfet irfz44 (2011)
21. Semiconductor, F.: Rurd4120s9a (2010)
22. Ross, T.: Fuzzy Logic with Engineering Applications, John Wiley & Sons (2008)
23. Babuska, R.: Fuzzy modeling for control (1998)
24. Márquez-Vera, M.A., Ramos-Fernández, J.C., Cerecero-Natale, L.F., Lafont, F., Balmat, J.F., Esparza-Villanueva, J.I.: Temperature control in a miso greenhouse by inverting its fuzzy model. Computers and electronics in Agriculture, 124, pp. 168–174 (2016)
25. Passino, K., Yurkovich, S.: Fuzzy Control, Addison Wesley Longman Inc. (1998)
26. Coughlin, R.F., Driscoll, F. F.: Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits (2001)