

CONTROL DIFUSO PARA UN CONVERTIDOR DC – DC REDUCTOR ELEVADOR SINTONIZADO A PARTIR DE UN ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE

BUCK-BOOST CONVERTER FUZZY CONTROL TUNED USING A SIMPLE GENETIC ALGORITHM

Abstract

This paper presents the construction of a Fuzzy Control System intended for a non-linear converter. The following is a detailed report on the procedure followed in order to achieve the optimal controller according to ISE performance (Integral Square Error).

Keywords: ISE criterion, simple genetic algorithm, fuzzy control, buck-boost made.

Resumen

En este documento se realiza un control difuso para un convertidor, que tiene un comportamiento no lineal. A continuación se detalla el procedimiento realizado para llegar al controlador óptimo de acuerdo al desempeño ISE (Integral Square Error).

Palabras clave: Criterio ISE, algoritmo genético simple, control difuso, convertido reductor-elevador.

Cynthia Ochoa

Ingeniera Electrónica, investigadora de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
cmochoar@correo.udistrital.edu.co

José Alejandro Avellaneda

Ingeniero Electrónico, investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
jaavellanedag@correo.udistrital.edu.co

Tipo: Artículo reporte de caso

Fecha de Recepción: Febrero 18 de 2011

Fecha de Aceptación: Mayo 10 de 2011

1. INTRODUCCIÓN

En aplicaciones industriales se requiere convertir un voltaje fijo de una fuente de corriente directa en un voltaje variable de suministro de corriente directa; un convertidor cd-cd convierte en forma directa de cd a cd, se puede considerar que un convertidor cd-cd es el equivalente en cd de un transformador de ca; al igual que el transformador se puede usar para subir o bajar el voltaje de una fuente.

Los convertidores de cd se usan para el control de motores de tracción de auto-

móviles eléctricos, tranvías, montacargas, entre otros [1].

El circuito tratado en este documento es reductor elevador (buck boost), éste se clasifica como convertidor cd-cd en modo conmutado; estos circuitos se caracterizan por su comportamiento no lineal puesto que sus variables de estado dependen de la entrada, que es el ciclo útil. Es precisamente por esta no linealidad y la complejidad matemática que amerita un control convencional para este tipo de planta, que un controlador difuso basado en reglas Si – Entonces que relacionan

la dinámica de la planta, simplifican el problema.

Este tipo de controladores no tiene en cuenta el modelo matemático de la planta pero utiliza el conocimiento de un experto que describa su comportamiento [2], es este el controlador que se describe en las siguientes páginas.

2. DISEÑO DEL CONVERTIDOR REDUCTOR ELEVADOR

Un regulador reductor elevador proporciona un voltaje que puede ser menor o mayor que el voltaje de entrada, de ahí su nombre reductor-elevador; la polaridad del voltaje de salida es contraria a la del voltaje de entrada.

El funcionamiento del circuito se divide en dos modos; durante el modo 1, el transistor está encendido y el diodo tiene polarización inversa. La corriente de entrada que aumenta pasa por el inductor y el transistor. Durante el modo 2, el transistor se apaga y la corriente pasa a través de la bobina, el condensador, el diodo y la carga. La energía almacenada en el inductor pasa a la carga y la corriente en el inductor disminuye hasta que el transistor se enciende de nuevo en el ciclo siguiente. En la siguiente figura se ve el circuito completo y los circuitos equivalentes de los modos [1].

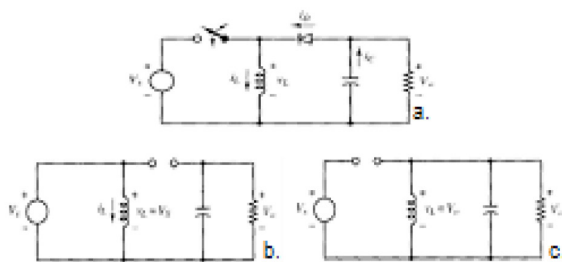


Fig. 1. a. Circuito reductor elevador donde el interruptor representa el transistor. b. Circuito equivalente del modo 1. c. Circuito equivalente del modo 2 [5]

De estos dos modos se derivan las ecuaciones que permiten obtener los valores adecuados para la bobina (L) y el condensador (C), en estas ecuaciones se

debe conocer los valores de ciclo útil (δ), la frecuencia de conmutación (f), el voltaje de entrada (E) y el factor de rizo (R), como se describe a continuación:

$$V_o = -\frac{E \cdot \delta}{1 - \delta} \quad (1)$$

$$L_{\min} = \frac{E \cdot \delta \cdot (1 - \delta)}{V_o \cdot (2) \cdot f} \quad (2)$$

$$C = \frac{\delta \cdot (1 - \delta)}{(2) \cdot L \cdot F^2 \cdot (\%R)} \quad (3)$$

Teniendo como voltaje de entrada 12V, el voltaje máximo en el que va a operar el convertidor que es 24V, se tiene un ciclo útil de 0.666, con este valor máximo de voltaje de salida se tiene el menor valor de bobina que puede tenerse para tener que el convertidor esté en modo continuo y con frecuencia de conmutación de 30 KHz se obtiene de la ecuación 18.518 μ H que para no estar en el margen se coloca una bobina de 200 μ H. Por último el condensador se escogió de 470 μ F para tener un porcentaje de rizo de 1.05% cuando el voltaje es de 24V.

De acuerdo a los valores obtenidos el circuito que se va a controlar se muestra en la Fig. 2.

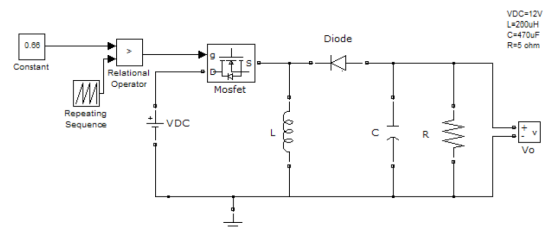


Fig. 2. Circuito del convertidor elevador-reductor diseñado.

3. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE

3.1 Diseño del controlador difuso

Para diseñar el control difuso se establecieron como señales de entrada al controlador la integral del error y el error, puesto que

con estas señales se puede saber cuál debería ser la acción de control para obtener la salida requerida [3]. El universo de discurso del error va de -25V a 25V y el universo de discurso de la integral del error va de -0.5V a 0.5V.

Por otro lado la señal de salida del controlador es un valor de ciclo útil, que en realidad es un voltaje de 0V a 1V, (representa 0% a 100% de ciclo útil) el cual es comparado con una señal rampa de 0V a 1V y a partir de esta comparación se obtiene una señal cuadrada de 1V; para efectos de montaje, este voltaje debe ser de 3V a 15V puesto que para la tecnología CMOS, en este rango se considera un uno lógico.

Para un controlador difuso, las entradas son los conjuntos antecedentes y las salidas son conjuntos consecuentes debido a la estructura de la regla si antecedente entonces consecuente, para este caso el antecedente es una proposición difusa compuesta puesto que se tienen dos conjuntos antecedentes el error y su integral, el consecuente es una proposición difusa atómica cuya variable lingüística es ciclo útil. De esta forma la base de reglas propuesta a partir del comportamiento de la planta es:

Regla 1: Si el error es grande negativo (ENG) y la integral es negativa (IN) entonces el ciclo útil es alto (CuA).

Regla 2: Si el error es negativo pequeño (ENP) y la integral es negativa (IN) entonces el ciclo útil es medio alto (CuMA).

Regla 3: Si el error es pequeño positivo (EPP) y la integral es negativa (IN) entonces el ciclo útil es medio bajo (CuMB).

Regla 4: Si el error es grande positivo (EPG) y la integral es negativa (IN) entonces el ciclo útil es bajo (CuB).

Regla 5: Si el error es grande negativo (ENG) y la integral es positiva (IP) entonces el ciclo útil es alto (CuA).

Regla 6: Si el error es negativo pequeño (ENP) y la integral es positiva (IP) entonces el ciclo útil es medio alto (CuMA).

Regla 7: Si el error es pequeño positivo

(EPP) y la integral es positiva (IP) entonces el ciclo útil es medio bajo (CuMB).

Regla 8: Si el error es grande positivo (EPG) y la integral es positiva (IP) entonces el ciclo útil es bajo (CuB).

De esta base de reglas se observa que si la integral del error es positiva o negativa, la regla apunta al mismo consecuente, sin embargo no se puede omitir esta variable lingüística pues los conjuntos error positivo y negativo no son particiones Ruspinni. Ya que hay más de una regla que apunta a un mismo consecuente, la base de reglas no es completa; la operación que se efectúa entre los valores de activación de las dos reglas que apuntan al mismo consecuente es el máximo entre las dos.

El sistema difuso tiene las siguientes características en su estructura:

- Fusificación: singleton.
- Norma S: máximo.
- Norma T: producto.
- Implicación: mamdani.
- Defusificación: promedio centro ponderado.

Definiendo unos primeros conjuntos antecedentes y consecuentes, el ISE que se obtuvo no fue el más bajo y de las experiencias hechas se concluyó que la variación en los conjuntos afecta notablemente la salida del convertidor, por este motivo se decidió realizar un controlador para un punto de operación y ajustar los parámetros de los conjuntos por medio de un algoritmo inteligente.

3.2 Implementación del algoritmo genético simple

Los Algoritmos Genéticos (AGs) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos, en este proceso a lo largo de las generaciones, donde las poblaciones evolucionan en la naturaleza

de acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulado por Darwin. Por imitación de este proceso, los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real y la evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende de una adecuada codificación de las mismas.

El algoritmo genético implementado a grandes rasgos, consiste en una rutina de software que toma como entradas a los ejemplares y retorna como salidas los que deben generar descendencia para la nueva generación. A este proceso se llama ciclo de evolución, que comienza con una población de posibles soluciones, de la cual se seleccionan unos padres, los cuales son las mejores soluciones, las cuales pueden dar nuevos individuos mediante el cruce o la mutación, de esta forma se crea una nueva población de la que nuevamente se van a obtener padres.

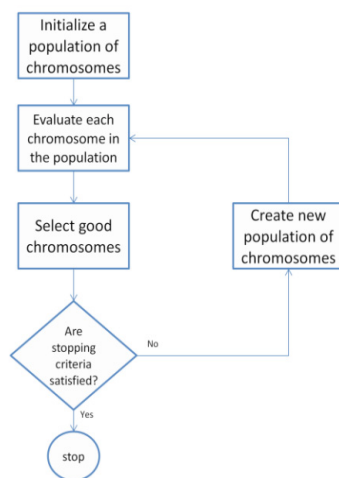


Fig. 3. Descripción de alto nivel de un algoritmo genético [4].

En este problema el número de individuos es 30 cada uno es un cromosoma, con valores aleatorios para la primera población, el cual está representado como un vector de la forma:

[md11, md12, md13, md14, dv11, dv12, dv13, dv14, md21, md22, dv21, dv22, ys11,

ys12, ys13, ys14]

Estos parámetros son escalados de tal manera que los valores estén concuerden con los universos de discurso de los conjuntos a los cuales son asignados.

Del cromosoma, md11, md12, md13 y md14 son las medias de los conjuntos del error, es decir, de ENG, ENP, EPP y EPG respectivamente; el algoritmo arroja estos valores al azar, pero para poderlos asignar al conjunto deben ser puestos en orden, para que cumplan con la regla y con su sentido lingüístico. Los valores dv11, dv12, dv13 y dv14 hacen referencia a las desviaciones estándar de los conjuntos del error, los cuales son asignados a las medias que inicialmente arrojó el algoritmo. Los parámetros md21, md22, dv21 y dv22 corresponden a las medias y las desviaciones de la integral del error IN, IP respectivamente, las desviaciones también son organizadas, respetando las desviaciones estándar asignadas por el algoritmo como se realiza para los conjuntos del error; por último ys11, ys12, ys13 y ys14 son los centros de los conjuntos consecuentes que también son organizados para que tengan un sentido lingüístico.

Esta población se prueba en el circuito del convertidor, obteniendo el criterio de desempeño ISE (Integral Square Error), es decir, la integral del error cuadrático; de acuerdo a este valor los individuos son organizados del mejor al peor.

Para determinar que individuos deben ser mutados o cruzados, se hace de forma aleatoria, comparando un número aleatorio con el índice de cruce o mutación. El cruce se realiza sumando cada parámetro del cromosoma y se divide en la mitad. La mutación cambia un parámetro aleatorio del cromosoma por un valor también aleatorio.

Del producto del cruce y la mutación se tiene una nueva población mayor a la inicial de 120 individuos, de los cuales se escogen 30 al azar, que se suponen mejores que los

de la generación anterior. Nuevamente estos se prueban, se cruzan o mutan y se repite el proceso, como se muestra en la Fig. 3. El criterio de parada del algoritmo puede ser de dos formas: la primera es por el número de generaciones establecidas desde el comienzo, o la segunda hasta que se obtenga un umbral de ISE predeterminado. Para este caso, se seleccionó detener el algoritmo de acuerdo con un número de generaciones.

El algoritmo que se utilizó tiene las siguientes características:

- N° de individuos por población: 30.
- N° de individuos por población intermedia (parejas): 60.
- Presión selectiva: 0.01.
- Probabilidad de cruce: 0.7.
- Probabilidad de mutación: 0.03.

4. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

De la primera prueba realizada se evidenció que la no linealidad hace que el comportamiento ante un cambio de una referencia a otra, sea muy abrupto; por otro lado entre más grande sea la referencia, más energía se va a necesitar y de igual manera el ISE va a ser mayor, por este motivo, no se puede generalizar el criterio a toda la región de trabajo se 0V a 24V, pues como se va a mostrar en las siguientes pruebas, el menor ISE que se va a obtener depende del punto de operación. Estas razones hacen que se haya escogido 5 puntos de operación donde se muestran diferentes comportamientos, estos son -4V, -8V, -12V, -16V y -24V como referencia.

Aunque el algoritmo genético sirve para buscar soluciones óptimas, al iniciarlo con valores al azar, puede quedarse en óptimos locales, por este motivo es necesario correr el algoritmo varias veces para asegurarse de tener el mejor individuo; por este motivo se hicieron varias pruebas con 30, 50 y 100 generaciones como condición de parada del algoritmo, para cada uno de los puntos de operación.

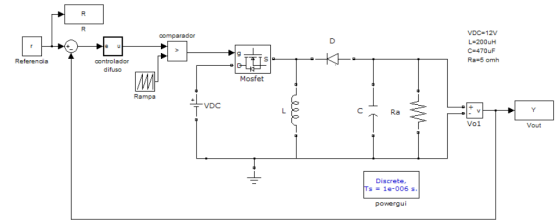


Fig. 4. Esquema del circuito en lazo cerrado con el controlador difuso.

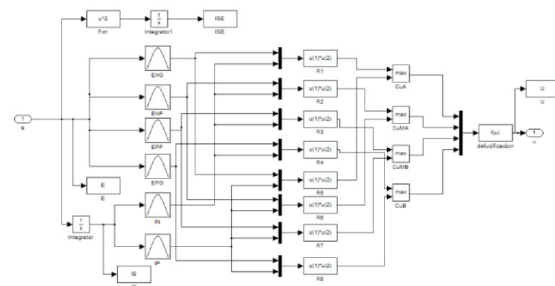


Fig. 5. Estructura interna del controlador difuso.

Las gráficas anteriores muestran el circuito implementado en Matlab, en la Fig. 4, se muestra el esquema en lazo cerrado y la Fig. 5, el esquema interno del controlador, es decir, los conjuntos antecedentes y consecuentes, reglas, inferencia y defusificación.

La tablas que se muestran a continuación son los valores de ISE del mejor y el peor individuo obtenido, junto con la desviación estándar y la media obtenida de los datos obtenidos para cada referencia. Las gráficas mostradas señalan los conjuntos del sistema difuso del mejor individuo, junto con la respuesta en el tiempo de la planta para cada referencia.

4.1 Referencia de -24V

Tabla 1. Datos Estadísticos para -24V

	ISE	Generaciones
Mejor	0.6816	30
Peor	1.75	20
Desviación Estándar:	0.328360368	
Media:	1.024645455	

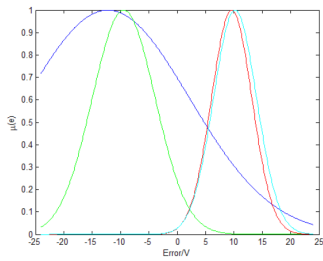


Fig. 6. Conjuntos del error para referencia de -24V.

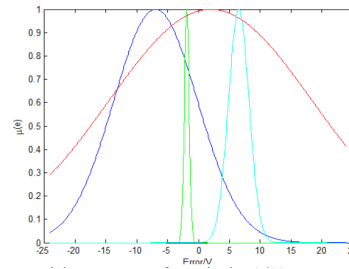


Fig. 10. Conjuntos del error para referencia de -16V.

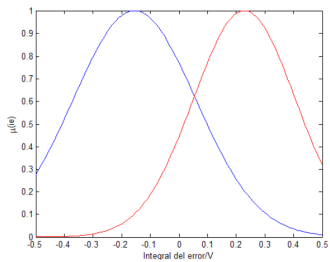


Fig. 7. Conjuntos de la integral del error para referencia de -24V.

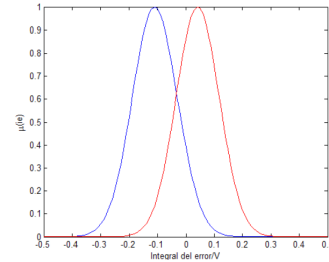


Fig. 11. Conjuntos de la integral del error para referencia de -16V.

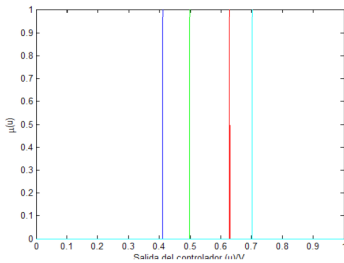


Fig. 8. Conjuntos consecuentes del ciclo útil para referencia de -24V.

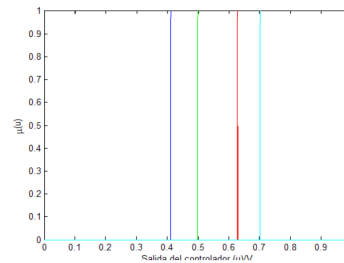


Fig. 12. Conjuntos consecuentes del ciclo útil para referencia de -16V.

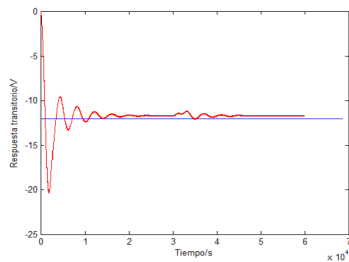


Fig. 9. Respuesta transitoria del mejor individuo para referencia de -24V.

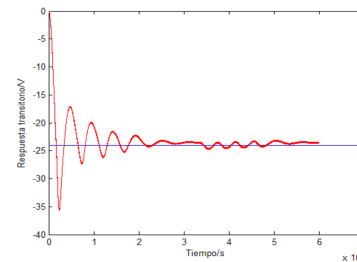


Fig. 13. Respuesta transitoria del mejor individuo para referencia de -16V.

4.2 Referencia de -16V

Tabla 2. Datos Estadísticos para -16V

	ISE	Generaciones
Mejor	0.2657	50
Peor	0.8177	30
Desviación Estándar:	0.167872452	
Media:	0.388566667	

4.3 Referencia de -12V

Tabla 3. Datos Estadísticos para -12V

	ISE	Generaciones
Mejor	0.1564	30
Peor	0.1566	30
Desviación Estándar:	0.013378789	
Media:	0.14598	

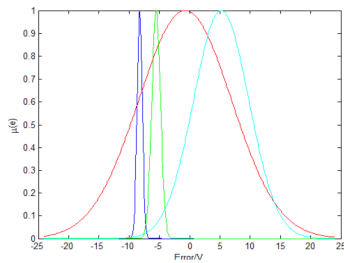


Fig. 14. Conjuntos del error para referencia de -12V.

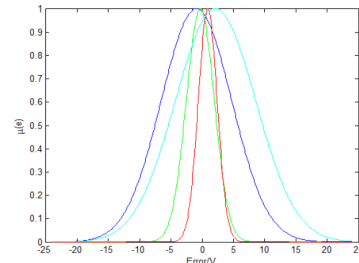


Fig. 18. Conjuntos del error para referencia de -8V.

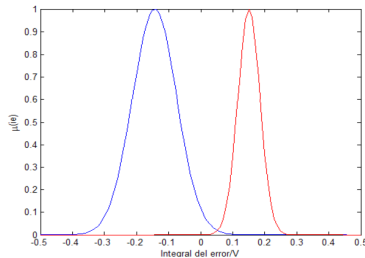


Fig. 15. Conjuntos de la integral del error para referencia de -12V.

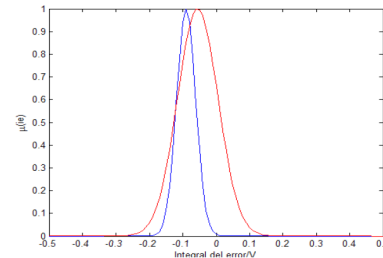


Fig. 19. Conjuntos de la integral del error para referencia de -8V.

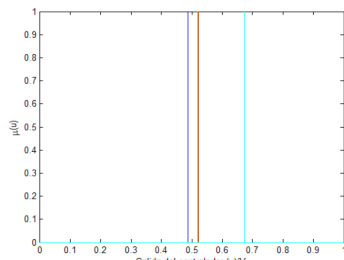


Fig. 16. Conjuntos consecuentes del ciclo útil para referencia de -12V.

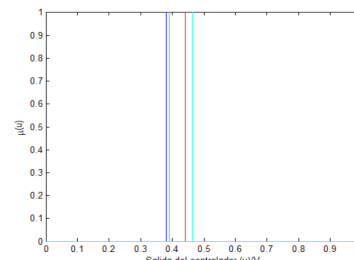


Fig. 20. Conjuntos consecuentes del ciclo útil para referencia de -8V.

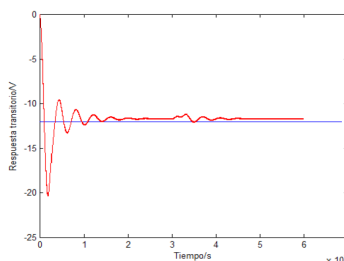


Fig. 17. Respuesta transitoria del mejor individuo para referencia de -12V.

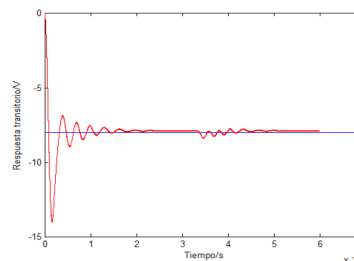


Fig. 21. Respuesta transitoria del mejor individuo para referencia de -8V.

4.4 Referencia de -8V

Tabla 4. Datos Estadísticos para -8V

	ISE	Generaciones
Mejor	0.0632	30
Peor	0.1722	30
Desviación Estandar:	0.047043595	
Media:	0.0966375	

4.5 Referencia de -4V

Tabla 5. Datos Estadísticos para -4V

	ISE	Generaciones
Mejor	0.0632	50
Peor	0.1722	50
Desviación Estandar:	0.240590451	
Media:	0.126485	

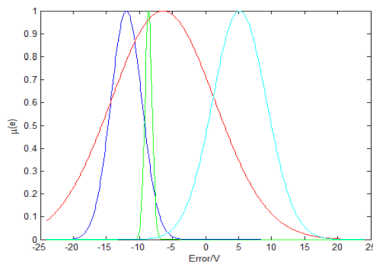


Fig. 22. Conjuntos del error para referencia de -4V.

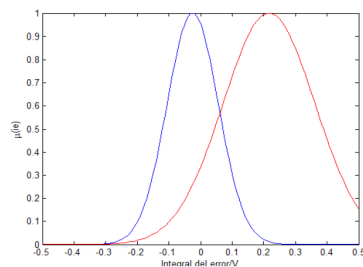


Fig. 23. Conjuntos de la integral del error para referencia de -4V.

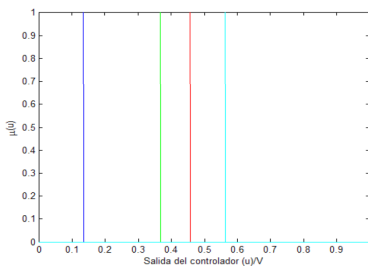


Fig. 24. Conjuntos consecuentes del ciclo útil para referencia de -4V.

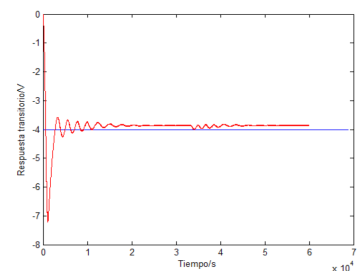


Fig. 25. Respuesta transitoria del mejor individuo para referencia de -4V.

De las pruebas que se hicieron, se tiene que el controlador propuesto sólo funciona para los puntos definidos, ya que los parámetros de los conjuntos se optimizaron a

éstos valores. Si para una aplicación se necesita un punto de operación diferente, el procedimiento que se debe seguir para obtener el controlador, debe empezar con el cambio de la referencia al punto de interés e iterar el algoritmo hasta que se llegue a una respuesta aceptable.

Se observa de acuerdo a las pruebas recopiladas, que los datos son más dispersos a medida que se aumenta la referencia, puesto que se recoge más energía y el sistema se vuelve sensible a pequeños cambios en este sentido, esto explica la dispersión de los datos y la tendencia a ser un poco más oscilatorio en referencias altas.

5. CONCLUSIONES

Al no tener en cuenta el modelo matemático de la planta debido a su complejidad, el controlador difuso basado en un modelo lingüístico es muy conveniente, sin embargo, es necesario optimizarlo mediante un algoritmo de búsqueda, para obtener respuestas con un mejor desempeño.

Para el tipo de controlador propuesto, en el que la entrada es el error y su integral, no permite que se recorra todo el rango de trabajo con los mismos conjuntos, lo que se pudo evidenciar con los resultados obtenidos antes y después del uso del algoritmo genético.

Es probable que si la referencia fuera también una entrada del controlador, las nuevas reglas permitieran que el controlador difuso fuera más versátil, permitiendo el trabajo en un rango más amplio o porque no en todo el rango; sin embargo, si se mantiene los conjuntos consecuentes el número de reglas se incrementa considerablemente (hasta 5 veces más), elevando los costos computacionales dificultando el uso de un algoritmo genético simple por el tiempo invertido que este utilizaría.

Referencias Bibliográficas

- [1] M. H. Rashid. Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones. México: Pearson Education, 2004, pp. 166, 194-198.
- [2] L. X. Wang. A course in fuzzy systems and control. Estados Unidos: Prentice-Hall, 1997, pp. 206.
- [3] L. Morales, H. Chamorro, J. Soriano. Análisis y comparación entre un controlador PI difuso y un controlador PI óptico convencional para un converso reductor. *Revista Ingeniería e investigación*. Vol. 29. 2009.
- [4] G. J. Klir. B. Yuang. Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and applications. Estados Unidos: Prentice Hall, 1995, pp. 477.
- [5] Hart, D., *Electrónica de Potencia.*, Pearson, 2001, pp. 201.