



# Diseño y simulación de un regulador difuso para un convertidor C.D.-C.D. Elevador

Ing. Leonardo Llanes Correa.  
Ing. Javier Muñoz Alvarez.  
Dr. Mario Morera Hernández

## Resumen / Abstract

Este artículo expone el diseño de un regulador difuso para un convertidor C.D.-C.D. Elevador y los resultados de las simulaciones realizadas con el uso de Matlab y Simulink. Dichos resultados muestran como el regulador difuso es capaz de mantener estable la tensión de salida del convertidor ante variaciones de carga de alrededor de un 50%.

### Palabras claves.

Diseño, simulación, regulador difuso, convertidor Elevador.

*This article shows the design of fuzzy regulator for a DC-DC Boost converter and the results of simulations using Matlab and Simulink. That results displays how fuzzy regulator keep stable the converter output voltage for load variation of 50%.*

### Keywords.

*Design, simulation, fuzzy regulator, Boost converter.*

## Introducción.

El acelerado proceso de desarrollo, alcanzado en la ciencia y la tecnología a escala mundial, ha arribado a la creación de métodos de control que permiten la regulación de procesos de todo tipo, siendo la electrónica de potencia una de las ramas en la que se han obtenido grandes avances. La lógica difusa (Fuzzy Logic.) es una herramienta muy fuerte para el control de procesos eléctricos, que adquiere singular importancia en sistemas de modelos matemáticos desconocidos, muy complejos o variantes en el tiempo. Esto ha motivado la realización del presente trabajo titulado “Diseño y simulación de un regulador difuso para un convertidor C.D.-C.D. Elevador”. El objetivo propuesto para este proyecto, es el diseño y la simulación de un regulador difuso capaz de estabilizar eficientemente la tensión de salida de un convertidor C.D.-C.D. Elevador (Boost), ante fluctuacio-

nes de carga que se presenten, actuando para ello sobre el valor del ciclo útil de la señal a la entrada del convertidor. El diseño de un regulador difuso no es tarea que dependa del desarrollo de una compleja teoría analítica, sino de la experiencia que pueda ser recopilada a partir de entrevistas a personas expertas en el proceso que se desee automatizar. Esta labor comienza adquirir matices de compleja cuando se carece de una “fuente de experiencia” sólida o confiable. Se hace entonces necesario obtener dicha experiencia sacando conclusiones sobre la marcha. Las decisiones de diseño que en este artículo son expuestas, están basadas en la experiencia adquirida mediante el uso del Matlab que fue el simulador usado para analizar la efectividad en el trabajo del regulador diseñado.

## Diseño del regulador difuso.

Con el objetivo de diseñar el regulador difuso se hizo un análisis del funcionamiento del elemento bajo control para establecer puntos que pudieran ser usados en la regulación. En el convertidor elevador la acción reguladora consiste en variar el ancho de pulso que regula la conmutación del semiconductor. Además, con el aumento del ancho del pulso se obtiene un aumento en el voltaje de salida del convertidor.

El proceso de aumentar el ancho de pulso para lograr un aumento de voltaje o viceversa, resulta extremadamente sencillo de representar, partiendo de la forma inexacta en que se produce el razonamiento humano que está basado en el conocimiento empírico del proceso, en la creación intuitiva de un número de reglas que lo rijan y en el tratamiento de valores aproximados que son representados por las variables lingüísticas.

El propósito que se sigue con el diseño del regulador fuzzy es la estabilización del voltaje alrededor del valor fijado en la referencia con un error lo más bajo posible (menor que el 5%). Este regulador debe ser capaz de absorber las variaciones que puedan aparecer, previstas o imprevistas, en la carga y las fluctuaciones del voltaje de entrada producto de las condiciones de operación de la red.

Esto se logra actuando de la siguiente manera: Siempre que el voltaje se encuentre por debajo de la referencia se aumentará el ancho del pulso en mayor o menor escala

de acuerdo con la magnitud del error y viceversa. Debido a la constante eléctrica del circuito la rapidez de cambio del error es finita y no se pueden obtener valores de variación de forma arbitraria. O sea que a partir de un valor específico de ancho de pulso no se obtienen decrecimientos más veloces del error por lo que se hace innecesario seguir aumentándolo. Por esta razón se determinó sensar también la rapidez de cambio del error.

Con estas dos variables a sensar se obtiene una acción reguladora más fuerte, que dominará mejor al elemento bajo control. El regulador entonces funcionará de la siguiente forma:

Siempre que el voltaje se encuentre por debajo de la referencia y el crecimiento del error no sea lo suficientemente grande o el deseado, la orden que dará el regulador será la de aumentar el ancho de pulso. Si este crecimiento es el deseado la salida del regulador será mantener el ancho de pulso anterior. De la misma manera funcionará para los casos opuestos.

Es necesario garantizar que el sistema se encuentre continuamente procesando reglas. Esto se logra con la creación de los dominios difusos asociados a las variables de entrada (Error de Voltaje y Crecimiento del Error de Voltaje) de forma tal que estos abarquen todo el rango de valores en que variarán dichas variables de entrada. Serán emitidas además tantas reglas como combinaciones de

conjuntos de entradas existan. En el caso particular de este regulador serán usados cinco dominios por cada entrada lo que presupone la confección de 25 reglas. El esquema del regulador se puede apreciar a continuación

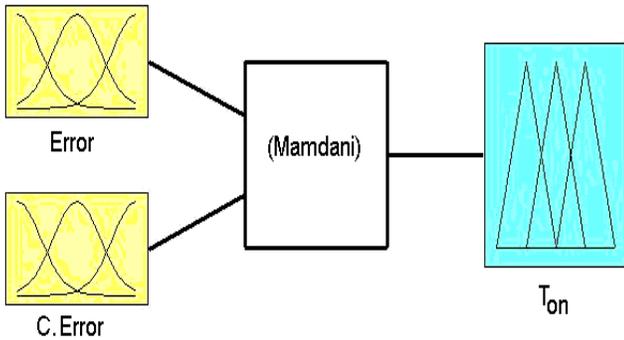


Figura1. Esquema del regulador difuso en bloques.

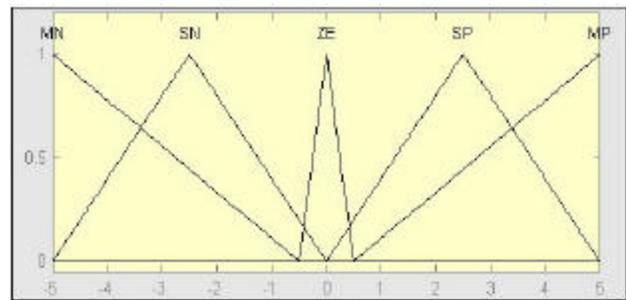
El método de inferencia a utilizar será el Mandani ya que está más relacionado con la filosofía de la operación del regulador que se hacía necesario lograr. O sea variaciones lo más continuas posibles. En caso de usar Sugeno solo es posible trabajar con nueve valores de salida para la acción del regulador. Por otra parte el método de defusificación utilizado es el centroide ya que propicia un valor real de salida asociado con el centro del conjunto difuso de salida que se obtiene con la inferencia. Esto permite hacer un análisis más sencillo del posible resultado del proceso fuzzy.

Para garantizar que ante la existencia de cualquier estímulo exista una regla que lo procese, es necesario la confección de 25 de estas las que serán del tipo If-Then. Dichas reglas se enuncian a continuación

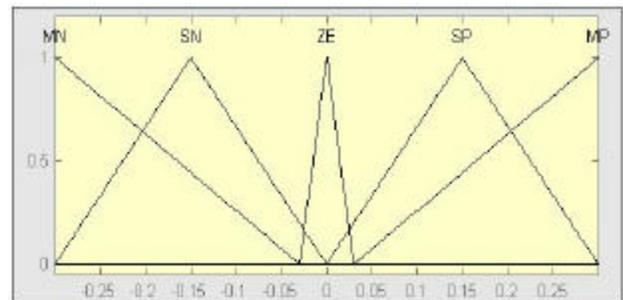
E \ CE	MP	SP	ZE	SN	MN
MN	ZE	SN	MN	MN	MN
SN	SP	ZE	SN	SN	MN
ZE	MP	SP	ZE	SN	MN
SP	MP	SP	SP	ZE	SN
MP	MP	MP	MP	SP	ZE

Figura2. Reglas.

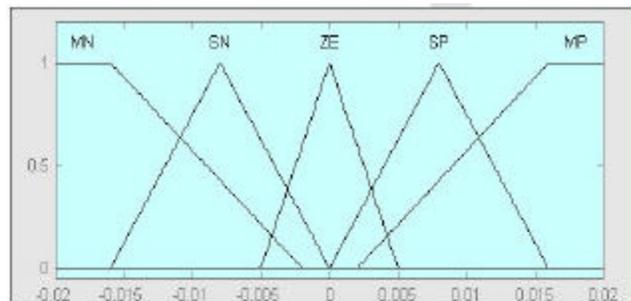
En el sistema diseñado se usaron funciones de membresía de tipo triangular solapadas y trapezoidales en los extremos. Por la necesidad de obtener una regulación más exacta en las proximidades de la referencia, los dominios difusos son más estrechos a medida que se acercan al valor cero y son simétricas a ambos lados de este valor. A continuación se muestran los dominios difusos en las siguientes ilustraciones y el diagrama en tres dimensiones que se obtiene a partir de los dominios difusos diseñados y las reglas.



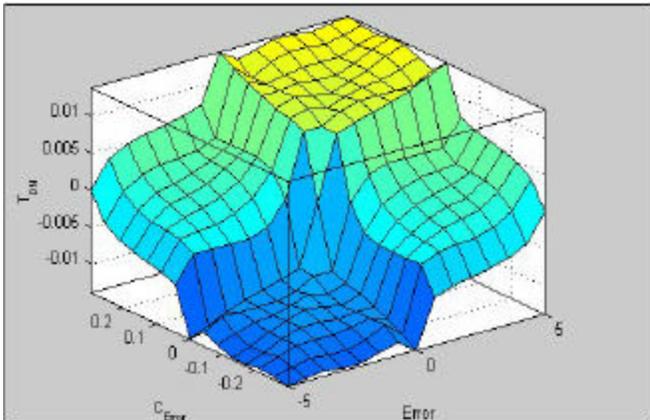
a) Error



b) Crecimiento del Error.



c) Dominios de Salida.



d) Visor de Superficie.  
Figuras3a) b) y c).

Otros aspectos en el diseño del regulador.

Hasta aquí a quedado diseñada la unidad difusa del regulador pero por determinados motivo se hizo necesaria la implementación de otros mecanismos colaterales al proceso fuzzy. Estos otros requerimientos necesarios, vienen a complementar el trabajo de la unidad difusa y serán expuestos a continuación.

Para lograr un modo de operación adecuado, el regulador deberá trabajar de forma iterativa, o sea trabajar sobre el valor anterior de salida, de manera que su funcionamiento se acerque más a lo que puede ser el razonamiento inexacto e intuitivo del ser humano. Para entender un poco más este hecho se ejemplificará verbalmente a continuación como es que ocurre el proceso de variación de salida:

Siendo el error muy negativo(MN) y el crecimiento del error cero(ZE) que es la condición de la que parte el sistema en el arranque, la salida del regulador es aumentada

un poco(salida MP). Mientras esta condición se mantenga, la salida en valor real del regulador seguirá aumentando en cada iteración, sumándose cada vez un poco al valor que tenía la salida en la iteración anterior. Esto ocurre hasta que sea alcanzado un decrecimiento del error próximo al deseado. A partir de este momento el valor sumado en las iteraciones siguientes será cada vez menor.

Para evitar el efecto entorpecedor que produce el riple en el sensado de las variables y para capacitar al regulador para trabajar de la forma expuesta en el párrafo anterior se hizo necesario que el sistema trabaje de forma discreta siguiendo el criterio de realizar un muestreo

de las variables de entrada en un tiempo múltiplo del periodo de conmutación.(3Ts). El efecto entorpecedor que produce el riple de la onda sensada, consiste en introducir variaciones bruscas que desvían la atención de la unidad difusa hacia procesos que no tienen que ser regulados.

Después de haber realizado el análisis de los aspectos colaterales expuestos hasta aquí, se expone el esquema final del regulador difuso en Simulink en la siguiente figura.

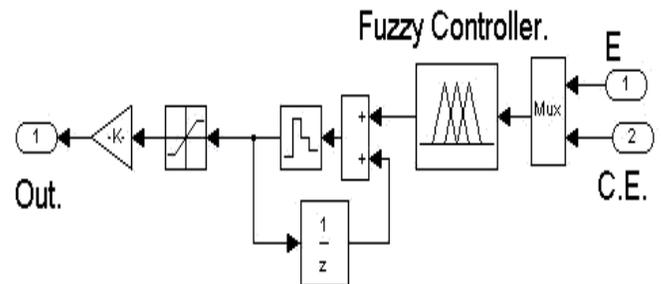


Figura4. Esquema en simulink del regulador.

La saturación que forma parte del esquema del regulador prevé que el conmutador tenga el tiempo necesario para el tránsito de corte a saturación y viceversa. Impide también que el inductor quede en cortocircuito durante varios periodos.

Simulación.

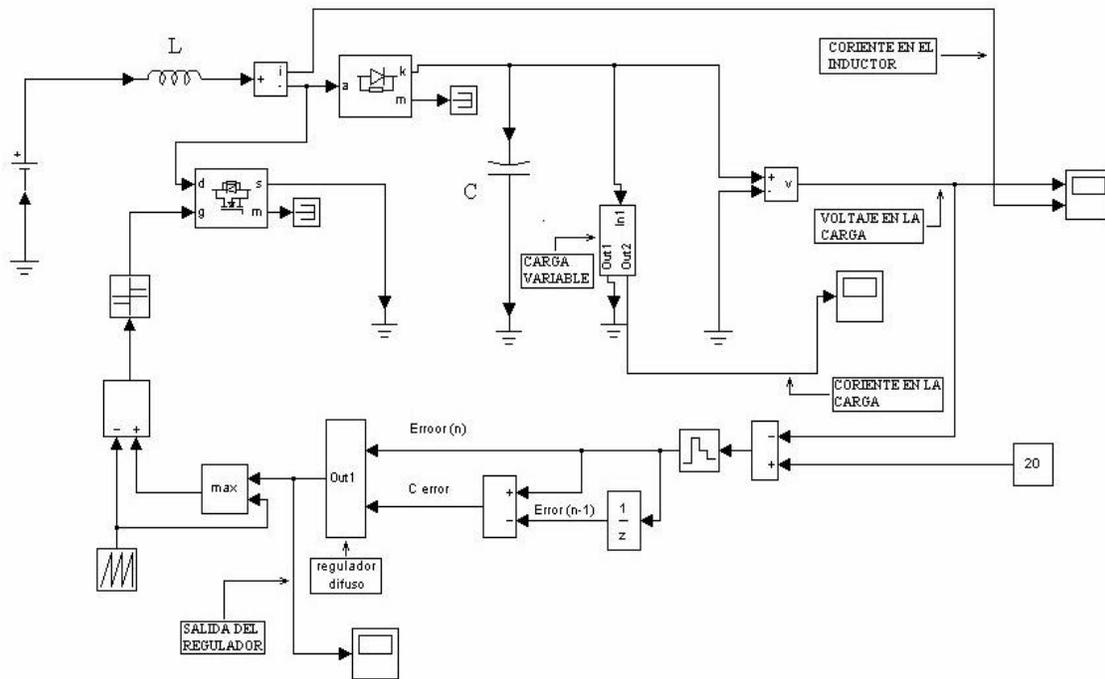
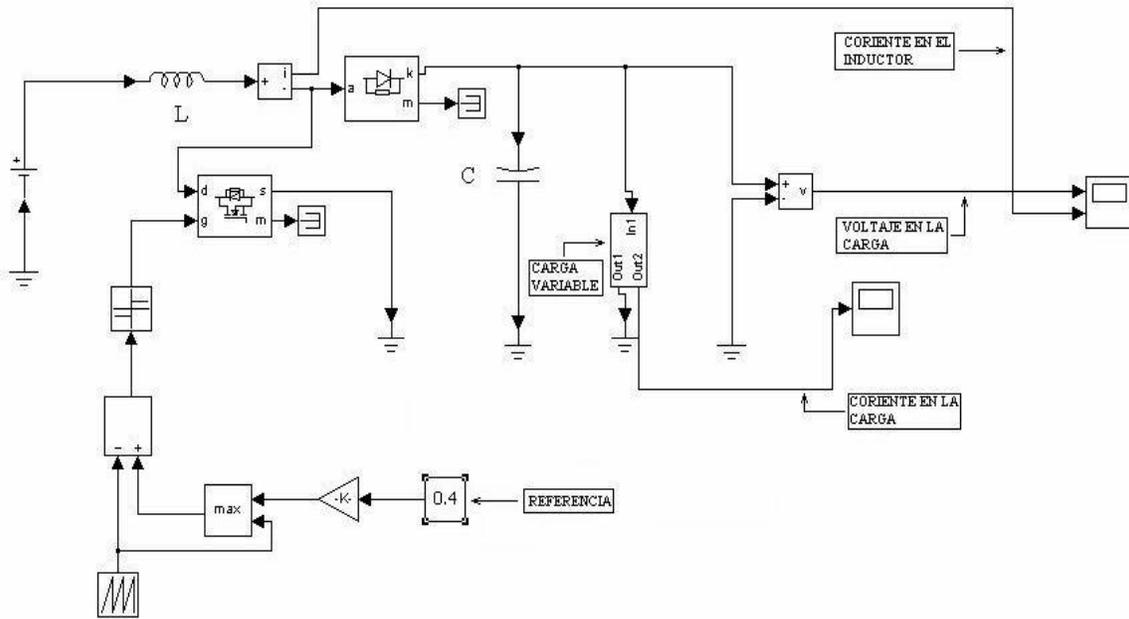
Los esquemas utilizados en la simulación a lazo abierto y a lazo cerrado son mostrados a continuación en la siguiente figura. Como elementos semiconductores son usados un MOSFET y un Diodo. Las componentes electrónicas del convertidor elevador para el cual fue diseñado este regulador así como el período de conmutación y la carga tienen los siguientes valores:

Figura5. Esquemas de simulación.

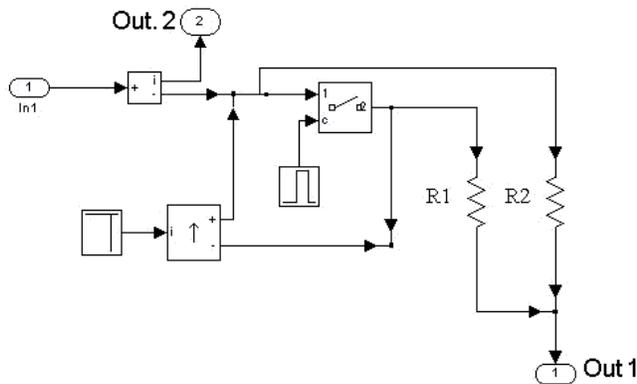
a) Lazo Abierto.

b) Lazo Cerrado.

- $L = 100 \mu\text{H}$ .
- $C = 630 \mu\text{F}$ .
- $V_s = 15 \text{ V}$ .
- $T_s = 33 \mu\text{seg}$ .
- $R_1 = R_2 = 6 \Omega$ .



En este esquema el convertidor elevador se encuentra suministrando energía a una carga variable cuyo circuito se puede observar también a continuación .



**Figura6. Carga Variable.**

Se puede apreciar a simple vista que R1 es conectada en paralelo con R2 por medio del interruptor. Con este circuito se logra que durante los primeros 20 mseg solamente esté conectada la resistencia R2 teniendo la carga un valor de 6W. En este instante será conectada R1 cerrando el interruptor durante los próximos 20 mseg tomando la carga un valor de 3W. Pasados los primeros 40 mseg de la simulación R1 será desconectada por el interruptor volviendo la carga al valor de 6W. Como se puede apreciar a simple vista, este circuito no está compuesto solamente, por resistencias que son conectadas o desconectadas por la acción de un interruptor gobernado por un pulso de voltaje. Esto se debe a que el interruptor utilizado en el esquema de Simulink solo pasa a la posición de abierto bajo la ocurrencia simultanea de dos condiciones:

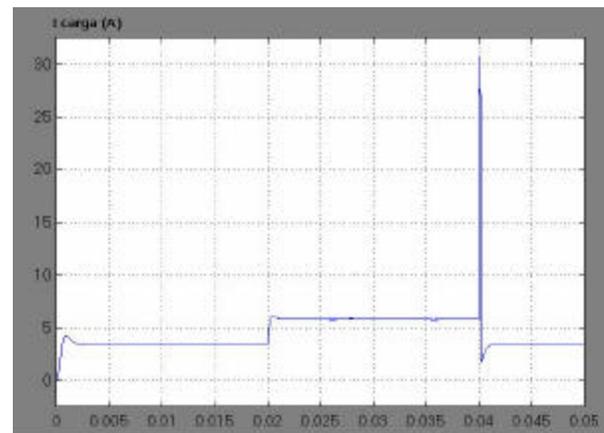
1. Nivel bajo en la señal de control del interruptor.
2. Corriente por el interruptor igual o menor que cero tomando como sentido positivo de referencia, la circulación de 1 a 2.

La segunda condición es lograda por medio de la inyección de un pico de corriente a través del interruptor y de sentido negativo de circulación. Por esto aparece una fuente controlada de corriente. Es necesario recordar que

la forma de onda de la corriente que genera esta fuente es igual a la forma de onda de la señal de control y es precisamente en el bloque de control donde se genera un pulso negativo de poca duración (0.2 mseg), y de magnitud 25 para lograr que sea cero la corriente circulante por el interruptor y con ello la apertura del mismo. Otro aspecto interesante es el esquema diseñado para lograr un generador de pulso que varíe el ancho del pulso en función de la variación de la referencia la cual oscila entre 0.1Ts hasta 0.9Ts. Mediante el uso de osciloscopios es posible observar las formas de onda de la corriente en el inductor, el voltaje y la corriente en la carga y la salida del regulador.

### Resultados de la simulación a lazo abierto.

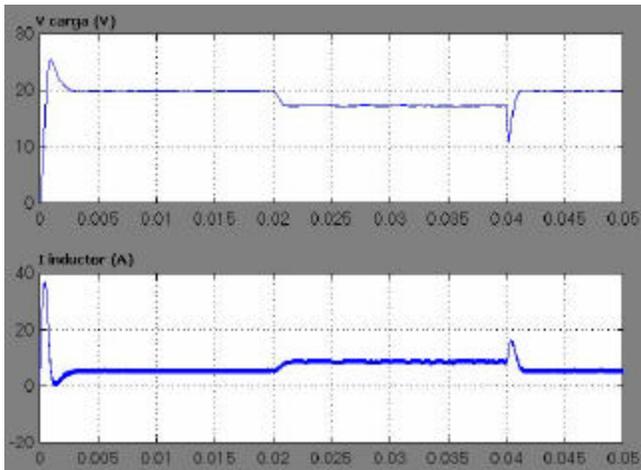
Los resultados de la simulación a lazo abierto del convertidor Boost serán mostrados a continuación en las siguientes figuras. En ellas se verán las formas de onda de la corriente en la carga y la corriente en el inductor y el voltaje en la carga respectivamente.



**Figura7. Corriente en la carga Lazo abierto**

En la figura anterior se pueden apreciar claramente la influencia de las dos variaciones de la carga en la corriente de carga. Durante los primeros 20 mseg la corriente estabiliza en el valor de 3.3A para un valor de resistencia en la carga de 6Ω. Por la conexión de R1 en paralelo con R2 el valor resistivo de la carga pasa a ser de 3Ω y la corriente se estabiliza en 5.8 A. A los 40 mseg

con la desconexión de la resistencia R1 la corriente de carga vuelve a tomar el valor de 3.3 A en estado estable puesto que la carga toma nuevamente un valor de  $6\Omega$  resistivo.

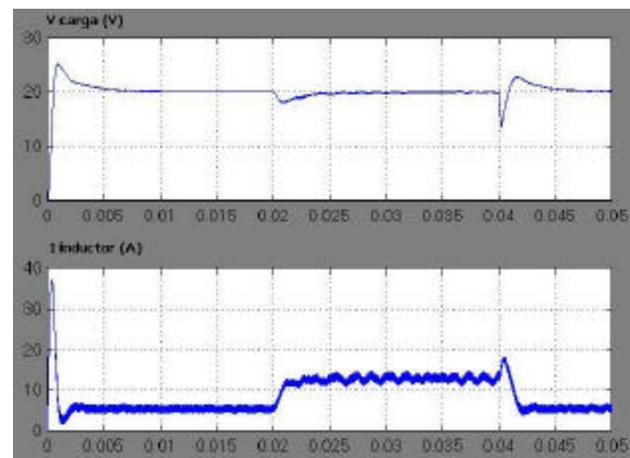
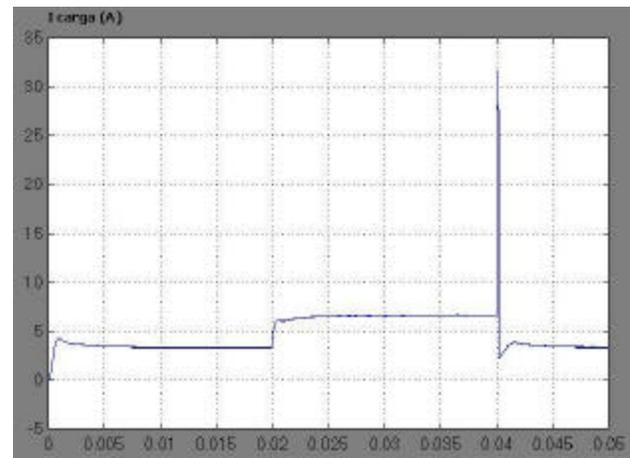


**Figura8. Corriente en el inductor y voltaje en la carga a lazo abierto.**

En la figura anterior se pueden apreciar las variaciones que sufren el Voltaje en la carga y la corriente en el inductor producto de las variaciones de la carga. Aquí se puede observar que el circuito alcanza de forma rápida (aproximadamente en 3 mS) su estabilidad alrededor de un valor de voltaje de 20V. **Este queda sujeto a variaciones notables (3V lo que representa un 15%) a causa de las fluctuaciones de un 50% en la carga como se había expuesto con anterioridad, lo que constituye la principal dificultad en la operación del convertidor. De hecho sobre este fenómeno se concentró la mayor atención cuando se diseñó el regulador.**

#### **Resultados de la simulación a lazo cerrado.**

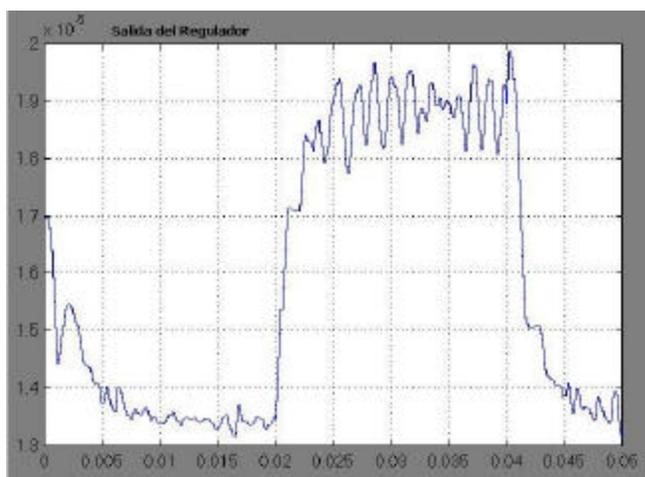
A continuación son expuestos los resultados obtenidos de la simulación a lazo cerrado para el convertidor elevador en las figuras siguientes. En estas imágenes de osciloscopios se pueden observar las formas de onda de corriente en la carga, voltaje en la carga y corriente en el inductor y la señal de salida del regulador difuso respectivamente.



**Figura9. Corriente en la carga ,corriente en el inductor y voltaje en la carga a lazo cerrado.**

Se puede observar claramente que el regulador es capaz de estabilizar la salida de voltaje alrededor del valor de referencia fijado (20V) para cualquier estado de carga. Logra además la estabilización en el comienzo del proceso, en un tiempo relativamente corto (5 mseg) aunque mayor que el tiempo de estabilización a lazo abierto que era de 3 mseg. Este aumento de 2mseg en el tiempo de estabilización de la señal de voltaje a lazo cerrado con respecto al tiempo de estabilización a lazo abierto, no representa una disminución sensible de la calidad de la respuesta en el proceso que se simula si se

tiene en cuenta que el error de voltaje obtenido a costa de este aumento es de  $\pm 0.2V$ . En el segundo estado de carga se aprecia como el regulador corrige la caída que sufre la tensión de salida con el aumento de la carga. Esto “lo logra el regulador” elevando el valor de la señal de referencia con respecto al valor que estaba dando en el estado de carga anterior. Las pequeñas oscilaciones que se aprecian en el segundo estado de carga son producto de la inductancia que introduce el interruptor de la carga y del punto de regulación que ya comienza a ser alto (alrededor de  $19 \text{ e-}6$  lo que representa un ciclo útil del 60%). Debido al hecho de que para valores más altos de regulación (mayor ancho de pulso) las variaciones producidas por el regulador provocan una variación mayor del voltaje a la salida, la regulación se hace más difícil. En figura que aparece a continuación, se muestra el trabajo del regulador y su forma de onda representa el valor de salida del mismo, igual en magnitud al tiempo de duración en un nivel alto del pulso.



**Figura10.Salida del regulador.**

Conclusiones.

El objetivo principal de este Trabajo consistió en el diseño de un regulador difuso capaz de estabilizar el voltaje a la salida de un convertidor C.D.-C.D Elevador (Boost). Quedó diseñado un regulador capaz de estabilizar la tensión de salida del convertidor, basado en el principio de hacerlo funcionar de manera que su operación se ase-

mejara lo más posible a las determinaciones imprecisas que pueda tomar cualquier operador humano basado en el conocimiento empírico del proceso. Con este fin se dotó al regulador de un mecanismo que fuera capaz de hacerlo funcionar iterativamente y de forma discreta. Se realizaron las simulaciones de los esquemas a lazo abierto y a lazo cerrado obteniendo resultados significativos en la regulación, que arrojó errores menores que un 2% y tiempos de estabilización menores de 5 mseg con lo que queda validado el funcionamiento del regulador diseñado.

### **Bibliografía.**

1. Mohamed H. Rashid, Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones, Tomo I, Segunda Edición.
2. Mohan N., Power Electronic Converter, Application and Design, Tomo I, Segunda Edición.
3. B-S Chen y otros, Fuzzy Systems, October 1999, Volumen 7, Número 5.
4. M Sugeno, Fuzzy Systems April 2000, Volumen 8, Número 2.
5. A-Roy, Fuzzy Systems April 2000, Volumen 8, Número 2.
6. Morera Mario, Curso de Lógica Difusa, Conferencias 1-9, curso 1997-1998.
7. Gomáriz S., Torralbo S y Guijoan F., Controlador Difuso para un convertidor Boost. Comparación con la técnica de corriente máxima, SAAEI 1999.

### **DATOS DEL AUTOR**

Ing. Leonardo Llanes Correa.

[leonardoll@inel.minbas.cu](mailto:leonardoll@inel.minbas.cu) INEL

Ing. Javier Muñoz Alvarez.

[javier@cipel.ispjae.edu.cu](mailto:javier@cipel.ispjae.edu.cu) I.S.P.J.A.E.

Dr. Mario Morera Hernández

[marmor@cipel.ispjae.edu.cu](mailto:marmor@cipel.ispjae.edu.cu) I.S.P.J.A.E.