

Análisis Comparativo de los Softwares MATLAB /Simulink y PLECS

Para Electrónica de Potencia

Sneyder Arley Jurado Espinosa y Wendy Katherine Guerrero Ruiz

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director:

Javier Enrique Solano Martínez

Ingeniero Electricista, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Convertidores DC/DC.....	15
2.1 Suposiciones Para la Analogía de los Tres Convertidores.....	16
2.2 Convertidor Reductor (Buck Converter).....	17
2.3 Propiedades de Operación en Estado Estable Para los Tres Convertidores.....	22
2.4 Convertidor Elevador (Boost Converter).....	24
2.5 Convertidor Reductor-Elevador (Buck-Boost Converter)	30
3. Lógica Difusa.....	36
3.1 Control Difuso.....	36
3.2 Sistemas de Inferencia Difusa (SID).....	36
3.3 Tipos de SID	37
3.3.1 Mamdani	37
3.3.2 Sugeno.....	37
3.3.3 Tsukamoto.....	38
3.4 Arquitectura del Controlador	39
4. Softwares.....	45
4.1 MATLAB.....	45
4.1.1 Uso en Sistemas de Control	45
4.2 PLECS.....	46

4.2.1 Herramientas de Diseño Funcional	47
4.2.3 PLECS-Standalone.....	47
4.2.4 PLECS-Blockset	48
5. Simulación	49
5.1 Convertidor Reductor.....	51
5.2 Convertidor Elevador.....	52
5.3 Convertidor reductor-elevador	53
6. Resultados Para lo Diferentes Equipos de Computo	54
7. Conclusiones	57
Referencias Bibliográficas	58
Apéndices.....	60

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tipos de convertidores DC/DC.....	15
Tabla 2. Reglas de control difuso	41
Tabla 3. Representación de las reglas por medio de índices.....	41
Tabla 4. Tiempo de Simulación	54
Tabla 5. Memoria RAM.....	55

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema básico de un convertidor reductor (Buck Converter).....	17
Figura 2. Convertidor reductor con el diodo en “circuito abierto”	17
Figura 3. Señal del interruptor electrónico	18
Figura 4. Convertidor reductor con el diodo en “circuito abierto”	20
Figura 5. Señales de tensión y corriente en la bobina del convertidor reductor	21
Figura 6. Esquema básico del convertidor elevador (Boost Converter)	24
Figura 7. Convertidor con el diodo operando en “circuito abierto”	25
Figura 8. Señal de conmutación para el convertidor elevador (Boost Converter).....	26
Figura 9. Esquema del convertidor elevador con el diodo en “corto circuito”	27
Figura 10. Señal de carga y descarga de la bobina en el convertidor elevador	28
Figura 11. Tensión de salida en función del ciclo de trabajo en el convertidor elevador	29
Figura 12. Esquema general del convertidor reductor - elevador	30
Figura 13. Esquema del convertidor reductor-elevador en “circuito abierto”	31
Figura 14. Corriente que circula por la bobina en el convertidor reductor-elevador.....	32
Figura 15. Circuito del convertidor reductor elevador con el diodo en “corto circuito”. 33	
Figura 16. Tensión en la bobina y corriente en el diodo en estado estable.....	34
Figura 17. Relación de la tensión V_o respecto la tensión V_i en el convertidor	35
Figura 18. Estructura tipo Mamdani	37
Figura 19. Estructura tipo Sugeno	38
Figura 20. Estructura tipo Tsukamoto	39

Figura 21. Módulos del controlador difuso.....	40
Figura 22. Superficie de las reglas del controlador establecidas en la Tabla 3.	42
Figura 23. Simetría en las reglas del controlador.	42
Figura 24. Funciones de pertenencia del error.....	43
Figura 25. Funciones de pertenencia de la derivada del error	43
Figura 26. Funciones de pertenencia de la salida	44
Figura 27. Estructura del controlador para la simulación.....	49
Figura 28. Tensión de salida para el convertidor reductor en cada software.....	51
Figura 29. Tensión de salida para el convertidor elevador en cada software	52
Figura 30. Tensión de salida para el convertidor reductor-elevador cada software	53

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Topologías de los convertidores para el caso de estudio	60
Apéndice B. Requerimientos del sistema Software PLECS	61
Apéndice C. Requerimientos del sistema Software MATLAB /Simulink	61
Apéndice D. Especificaciones técnicas de los equipos de cómputo	62

Glosario

Cs: capacitancia de amortiguamiento del diodo, medida en Farads.

DC-DC: conversión de tensión continua, en tensión continua que puede ser mayor o menor que el valor de entrada.

FDIR: aplicación de detección, aislamiento y recuperación de fallas.

Lon: inductancia interna del diodo, medida en Henrys.

LQG: es una técnica moderna de espacio de estado para diseñar reguladores dinámicos óptimos y servo-controladores con acción integral (también conocidos como rastreadores de puntos de ajuste). Esta técnica le permite compensar el rendimiento de la regulación. Linear-Quadratic-Gaussian (LQG) por sus siglas en inglés.

LQR: Linear-Quadratic Regulator (LQR) por sus siglas en inglés. Es un operador de MATLAB que calcula la ganancia óptima de una matriz previamente ingresada.

MIMO: (Multiple-Input Multiple-Output) es un tipo de tecnología de comunicaciones inalámbricas en la que las estaciones base están equipadas con una gran cantidad de elementos de antena para mejorar la eficiencia espectral y energética.

PID: el control PID significa respectivamente control proporcional, integral y derivado, y es la técnica de control más utilizada en la industria.

Ron: resistencia interna del diodo medida en Ohms.

Rs: resistencia de amortiguamiento del diodo medida en Ohms.

SISO : es un sistema de radio donde ni el transmisor ni el receptor tiene antena múltiple. Single-output single-input (SISO por sus siglas en inglés)

V_f: tensión del diodo operando como corto circuito, medida en Volts.

Resumen

Título: Análisis comparativo de los softwares MATLAB /Simulink y PLECS para electrónica de potencia¹

Autores: Wendy Katherine Guerrero Ruiz, Sneyder Arley Jurado Espinosa²

Palabras Clave: Comparar, Simulación, Convertidores, Lógica Difusa, Software, PLECS, Simulink, MATLAB, Solver, Electrónica de Potencia.

Descripción:

Actualmente, existen diversas herramientas computacionales que son indispensables en el estudio de la electrónica de potencia, ya que permiten modelar, analizar, evaluar, diagnosticar problemas y optimizar diferentes aplicaciones, que son complejas y/o costosas de implementar físicamente. Dos softwares funcionales que cumplen a cabalidad con lo anteriormente mencionado son MATLAB /Simulink y PLECS (donado recientemente a la universidad), sin embargo, no procesan la información de la misma forma, lo cual puede verse reflejado en la respuesta del sistema y en el tiempo de simulación.

En vista de lo anterior, en el presente trabajo de grado se realizó un análisis comparativo de los softwares MATLAB /Simulink y PLECS (versiones: Standalone y Blockset) implementando tres topologías de convertidores DC-DC: Reductor, Elevador y Reductor-Elevador, controlados mediante lógica difusa. Además, se presentan las características básicas de los convertidores y del control utilizado para este caso de estudio. Posteriormente se replicaron las simulaciones presentadas en seis diferentes equipos de cómputo y con los resultados obtenidos se evaluó el tiempo y memoria RAM empleados por estos softwares. Como resultado el software PLECS-Standalone presentó un excelente rendimiento, siendo más eficiente que MATLAB /Simulink para aplicaciones de electrónica de potencia. Finalmente se dan las bases necesarias para la apropiación de los softwares en un manual de las simulaciones presentado en el anexo.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez, PhD.

Abstract

Title: Comparative Analysis Of MATLAB / Simulink And PLECS Softwares For Power Electronics³

Author: Wendy Katherine Guerrero Ruiz, Sneyder Arley Jurado Espinosa⁴

Key Words: Compare, Simulation, Converters, Fuzzy Logic, Software, PLECS, Simulink, MATLAB, Solver, Power Electronics.

Description:

Currently, there are several computational tools that are indispensable in the study of power electronics, since they allow to model, analyze, evaluate, diagnose problems and optimize different applications, which are complex and/or costly to physically implement. Two functional softwares that fully comply with the aforementioned are MATLAB /Simulink and PLECS (recently donated to the university), however, do not process the information in the same way, which can be reflected in the system response and in simulation time.

In view of the above, a comparative analysis of the MATLAB /Simulink and PLECS software (versions: Standalone and Blockset) was carried out in the present degree work, implementing three topologies of DC-DC converters: Buck, Boost and Buck-Boost, controlled by fuzzy logic. In addition, the basic characteristics of the converters and the control used for this case study are presented. Subsequently, the simulations presented in six different computing equipment were replicated and the results obtained evaluated the time and RAM memory used by these software. As a result, PLECS-Standalone software presented excellent performance, being more efficient than MATLAB /Simulink for power electronics applications. Finally, the necessary basis for the appropriation of the software is given in a simulation manual presented in the annex.

³ Degree Work

⁴ Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering, Director: Javier Enrique Solano Martínez, PhD.

Introducción

El avance de la electrónica de potencia en los últimos años se debe en gran parte al desarrollo de softwares especializados, que como herramientas de simulación brindan una aproximación al comportamiento real de un sistema (Jiménez-Rodríguez, 2018). Ciertamente ningún software procesa la información de la misma manera, lo que permite diferenciarlos por medio de parámetros como eficiencia, portabilidad, fiabilidad, capacidad, entre otros.

Actualmente, los convertidores DC-DC son parte fundamental de la electrónica de potencia y se encuentran en una amplia gama de aplicaciones como: vehículos eléctricos, aeronáutica, fuentes de alimentación conmutadas, etc., ante cambios abruptos en el sistema, requieren de estrategias de control para mantener la respuesta requerida, entre estas se encuentra el control mediante lógica difusa.

En este marco de ideas, esta investigación realizó un análisis comparativo en 6 equipos de cómputo para los softwares MATLAB /Simulink R2019b y PLECS 4.4.5 (Standalone y Blockset), implementando un sistema de control basado en lógica difusa tipo Sugeno, para los convertidores Reductor, Elevador y Reductor-Elevador (Elmas, Deperlioglu, & Huseyin, 2009); con el fin de determinar el desempeño de cada uno de los softwares.

En vista de lo anterior, los parámetros de los elementos del sistema a simular se configuraron del mismo modo en cada software para evitar distorsionar los resultados finales. Además de esto se utilizó el paso de simulación fijo y el solver TUSTIN, que permite una simulación más concisa, debido a que es de segundo orden. Por otra parte, se implementó una técnica de optimización, llamada look-up table, (Vollala & Ramasubramanian, 2015) para la

simulación del controlador de lógica difusa obtenido con anterioridad de la toolbox “fuzzy” del software MATLAB /Simulink, esta técnica permite almacenar valores calculados previamente que se pueden recuperar mediante operación de indexación mejorando la velocidad del proceso.

Dicho brevemente, en este trabajo se presentan siete capítulos que corresponden a las etapas generales del proceso investigativo. El primero evidencia los objetivos que orientaron la investigación; del segundo al cuarto se muestra la información relevante sobre convertidores, topología, lógica difusa, tipos de inferencia difusa, arquitectura del controlador y softwares. Estos son necesarios para comprender los resultados del capítulo posterior. Por otra parte, en el sexto capítulo se presenta el análisis de los softwares en los equipos de cómputo, abarcando criterios importantes como el tiempo de simulación y memoria RAM empleados durante cada una de las simulaciones. Finalmente, se exponen las conclusiones que evidencian la eficiencia del software PLECS-Standalone para electrónica de potencia. Así mismo, para facilitar la comprensión de las simulaciones en los softwares, se entrega un manual en el anexo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

- Comparar los softwares MATLAB /Simulink y PLECS (Standalone y Blockset) mediante la implementación de convertidores tipo Reductor, Elevador y Reductor-Elevador.

1.2 Objetivos Específicos

- Implementar modelos de simulación de los convertidores Reductor, Elevador y Reductor-Elevador en PLECS y MATLAB / Simulink.
- Implementar un sistema de control basado en lógica difusa para los convertidores DC-DC (Reductor, Elevador y Reductor-Elevador) en PLECS y MATLAB /Simulink.
- Realizar un análisis comparativo del desempeño de los softwares PLECS y MATLAB /Simulink en diferentes equipos de cómputo.

2. Convertidores DC/DC

Un convertidor DC/DC es un dispositivo electrónico de potencia empleado para obtener a la salida una tensión continua que puede ser menor o mayor a la excitación. Son conocidos también con los nombres: choppers, pulsadores o troceadores. Estos dispositivos están basados en transistores controlados de potencia que conmutan a una frecuencia que oscila entre los 10 y 100 kHz dependiendo de la potencia de diseño.

Nota: Este capítulo es adaptado de (Hart D, 2001; Mantilla Villalobos, 2020)

Tabla 1.

Tipos de convertidores DC/DC

Convertidores sin Aislamiento Galvánico	Convertidores con Aislamiento Galvánico
Convertidor Reductor (Buck Converter)	Convertidor Flyback
Convertidor Elevador (Boost Converter)	Convertidores de Medio Puente y Puente Completo
Convertidor Reductor-Elevador (Buck – Boost Converter)	Convertidor Dual de Puente Completo
SEPIC (Single – Ended Primary Inductance Converter)	

Nota: Tipos de convertidores de corriente continua. Adaptado de *Electrónica de potencia, módulo: convertidores DC-DC. C. reductor- elevador* (Mantilla M, 2020)

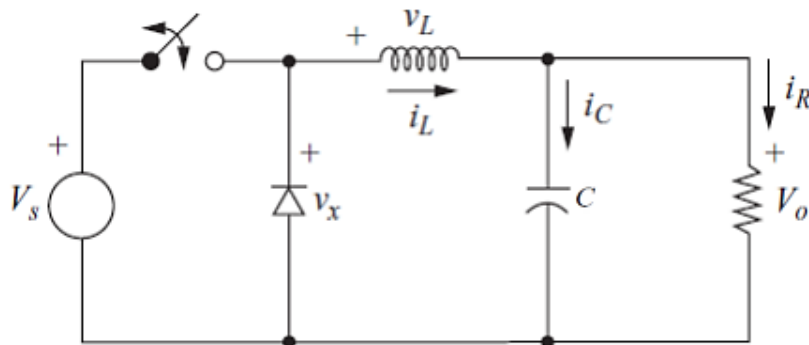
2.1 Suposiciones Para la Analogía de los Tres Convertidores

- El circuito opera en estado estable.
- Se considera un periodo de conmutación T . El interruptor está cerrado durante un tiempo kT y abierto durante un tiempo $(1 - k)T$ en cada periodo de conmutación.
- La corriente por el inductor L no cae a cero y siempre es positiva, es decir, el convertidor opera en modo continuo.
- El condensador de salida C es lo suficientemente grande tal que la tensión de salida se considera constante de valor V_o .
- Los componentes son ideales.

2.2 Convertidor Reductor (Buck Converter)

Figura 1.

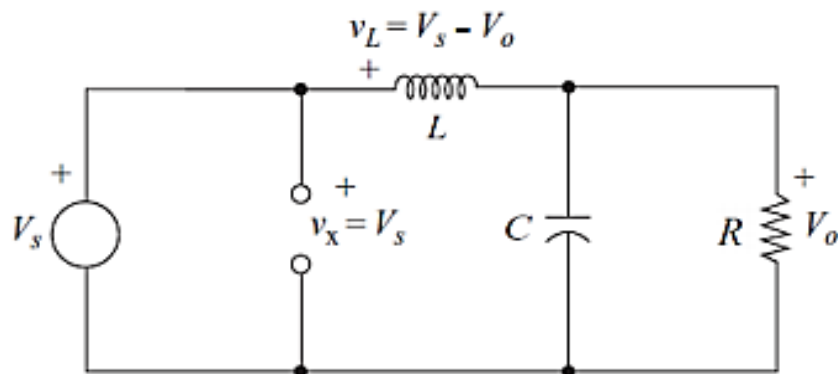
Esquema básico de un convertidor reductor (Buck Converter)



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, convertidor cc-cc reductor a)* (p.204) (Hart D, 2001)

Figura 2.

Convertidor reductor con el diodo en “circuito abierto”

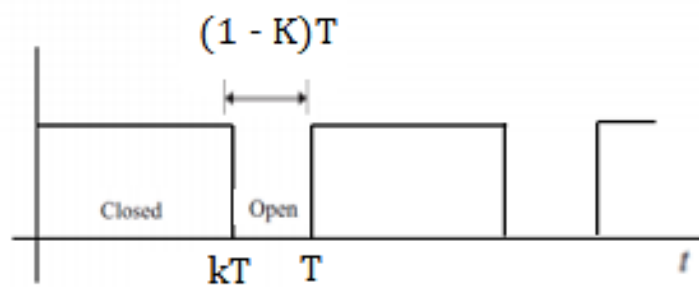


Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, convertidor cc-cc reductor b)* (p.204) (Hart D, 2001)

La Figura 2 muestra el circuito equivalente cuando el pulso de conmutación está en el intervalo de 0 a kT , donde el transistor se comporta como corto circuito y el diodo se polariza inversamente lo cual hace que actúe como circuito abierto.

Figura 3.

Señal del interruptor electrónico



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, convertidor cc-cc básico conmutado c* (p.203) (Hart D, 2001)

La Figura 3 muestra la señal de conmutación, para modular el ancho del ciclo útil la variable de control es k . Cuando el interruptor se cierra en el intervalo de 0 a kT la tensión en la bobina es:

$$V_L = V_S - V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

De acuerdo a las suposiciones iniciales, el valor del capacitor reduce el rizo en la tensión de salida, la cual se asume constante, así, el valor de tensión en la bobina es constante de valor positivo en el intervalo de 0 a kT como se aprecia en la Figura 5 (a).

Despejando:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (2)$$

Debido a esta configuración, V_O siempre será menor que V_S , lo cual implica que la derivada de la corriente (que circula por la bobina) con respecto al tiempo sea una constante mayor que cero. Al tener una pendiente positiva, la corriente aumenta linealmente en el intervalo de 0 a kT como se aprecia en la Figura 5 (b).

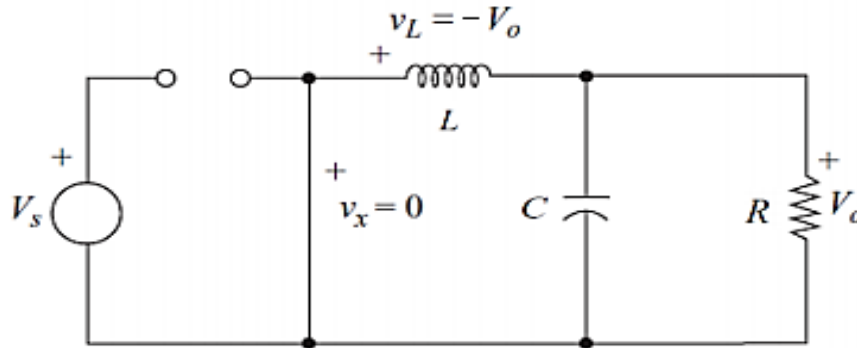
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{kT} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (3)$$

$$\Delta i_{Lclosed} = \frac{V_S - V_O}{L} * kT \quad (4)$$

$\Delta i_{Lclosed}$ Es denominado rizo pico a pico de la corriente por la bobina cuando el interruptor está cerrado.

Figura 4.

Convertidor reductor con el diodo en “circuito abierto”



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, convertidor cc-cc reductor c)* (p.204) (Hart D, 2001)

La Figura 4 presenta el circuito equivalente cuando el pulso de conmutación está en el intervalo de kT a T , como la corriente que circula en la bobina es positiva y esta no admite cambios abruptos de corriente, empieza a circular a través del diodo una corriente que lo polariza directamente.

$$V_L = -V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

En este intervalo, la tensión en la bobina cambia rápidamente a $-V_O$ por lo que ahora la corriente va a disminuir de forma lineal (como lo muestra la Figura 5) en un intervalo de kT a T .

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_O}{L} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-k)T} = \frac{-V_O}{L} \quad (7)$$

$$\Delta i_{Lopen} = \frac{-V_O}{L} * (1 - K) * T \quad (8)$$

Δi_{Lopen} Es denominado rizo pico a pico de la corriente por la bobina cuando el interruptor está abierto.

En estado estable, la corriente por el inductor es periódica, por lo que el cambio neto en la corriente del inductor durante un periodo es cero.

$$\Delta i_{Lopen} + \Delta i_{Lclosed} = 0 \quad (9)$$

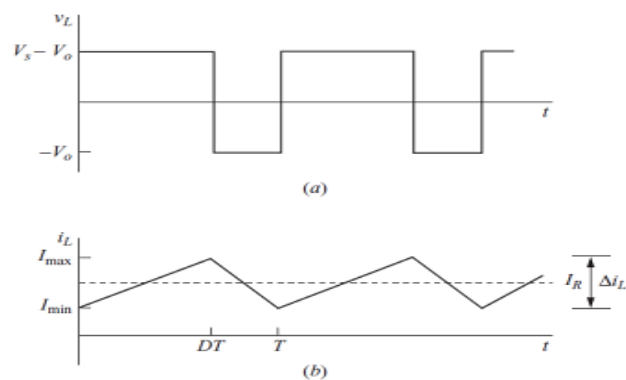
$$\frac{V_S - V_O}{L} * (kT) - \frac{V_O}{L} * (1 - k)T = 0 \quad (10)$$

Tensión promedio de salida ($0 \leq V_o \leq V_s$):

$$V_o = kV_s \quad (11)$$

Figura 5.

Señales de tensión y corriente en la bobina del convertidor reductor



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, formas de onda del C. reductor a) y b)* (p.206) (Hart D, 2001)

2.3 Propiedades de Operación en Estado Estable Para los Tres Convertidores

La corriente del inductor es periódica:

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad (12)$$

La tensión promedio del inductor es cero:

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\gamma) d\gamma = 0 \quad (13)$$

La corriente promedio del capacitor es cero:

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} I_C(\gamma) d\gamma = 0 \quad (14)$$

La potencia promedio suministrada por la fuente es igual a la potencia promedio entregada a la carga debido a que se consideró elementos ideales:

$$P_S = P_o \quad (15)$$

Debido a que la corriente promedio por el capacitor es 0, la corriente promedio de salida es igual a la corriente promedio del inductor:

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} \quad (16)$$

Corriente máxima y mínima por el inductor:

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (17)$$

Rizo pico a pico de la corriente por el inductor:

$$\Delta i_L = \frac{V_s - V_o}{L} * kT = \frac{V_s - V_o}{Lf} * k = \frac{(1-k)V_o}{Lf} \quad (18)$$

Condición de operación en modo continuo: $I_{min} \geq 0$

$$I_{min} = 0 = V_o \left(\frac{1}{R} - \frac{1-k}{2Lf} \right) \quad (19)$$

$$L_{min} = \frac{(1-k)R}{2f} \quad (20)$$

Como los componentes se suponen ideales la potencia activa entregada por la fuente es igual a la potencia activa consumida por la carga:

$$P_S = P_c \quad (21)$$

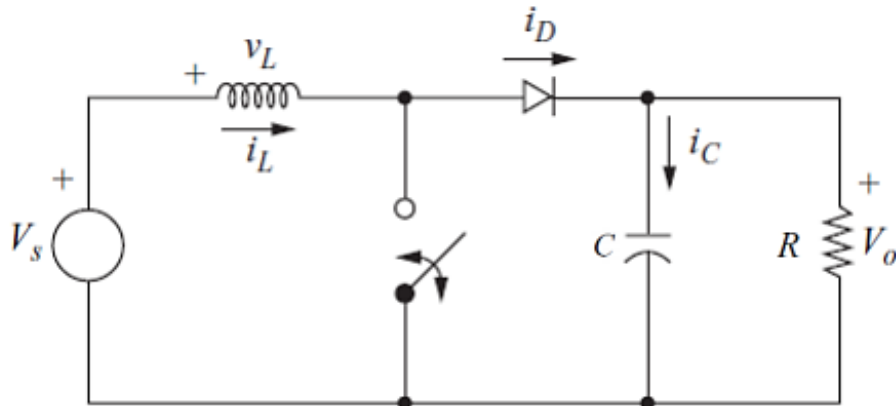
$$V_S I_S = V_o I_o \quad (22)$$

$$\frac{V_o}{V_S} = \frac{I_S}{I_o} \quad (23)$$

2.4 Convertidor Elevador (Boost Converter)

Figura 6.

Esquema básico del convertidor elevador (Boost Converter)

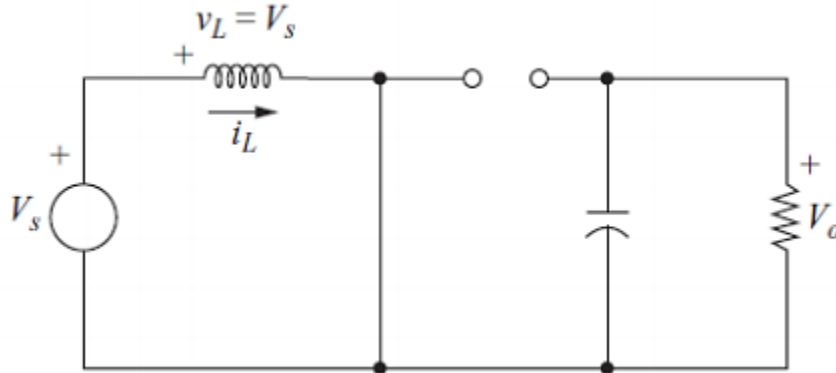


Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, El convertidor elevador a)* (p.213) (Hart D, 2001)

En el convertidor elevador solo se puede obtener una tensión a la salida igual o mayor a la tensión de entrada, este circuito se comporta como un transformador elevador DC/DC. La función elevadora se hace posible gracias a la carga y descarga del inductor. El capacitor reduce el rizo de la tensión de salida con un filtrado de armónicos.

Figura 7.

Convertidor con el diodo operando en “circuito abierto”



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, El convertidor elevador b)* (p.213) (Hart D, 2001)

La Figura 7 muestra el circuito equivalente del convertidor elevador cuando el interruptor está cerrado en el intervalo de 0 a kT . La bobina empieza a cargarse mientras el diodo se polariza inversamente.

La tensión en la bobina es igual a la señal de tensión de entrada o también al valor de la inductancia por la derivada de la corriente en el tiempo que circula a través de ella.

$$V_L = V_S = L \frac{di_L}{dt} \quad (24)$$

Despejando:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (25)$$

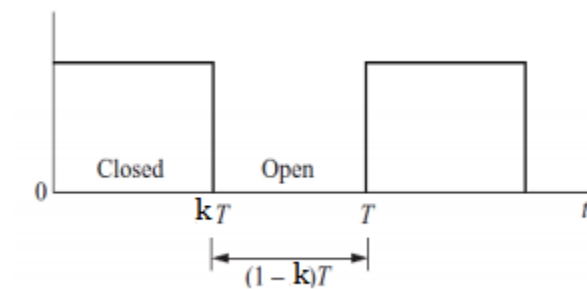
$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{kT} = \frac{V_S}{L} \quad (26)$$

$$\Delta i_{L_{closed}} = \frac{V_S k T}{L} \quad (27)$$

Señales del convertidor en estado estable:

Figura 8.

Señal de conmutación para el convertidor elevador (Boost Converter)

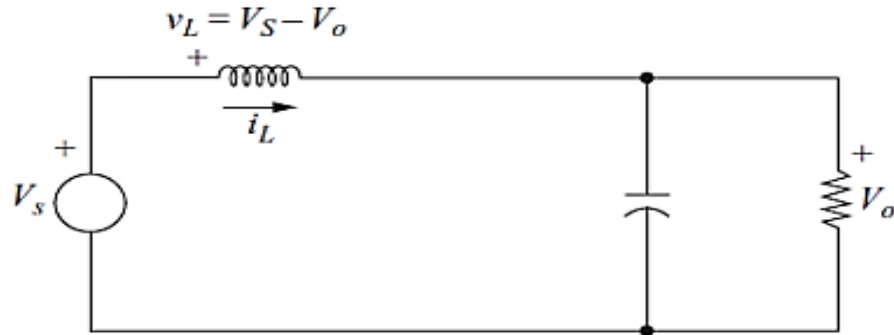


Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, convertidor cc-cc básico conmutado c)* (p.203) (Hart D, 2001)

La Figura 9 muestra el circuito equivalente en el intervalo de kT a T donde el interruptor se cierra y el flujo positivo de la corriente por la bobina polariza el diodo directamente. Ahora la bobina empieza a descargarse.

Figura 9.

Esquema del convertidor elevador con el diodo en “corto circuito”



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, El convertidor elevador c* (p.213) (Hart D, 2001)

Ahora la tensión en la bobina es:

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (28)$$

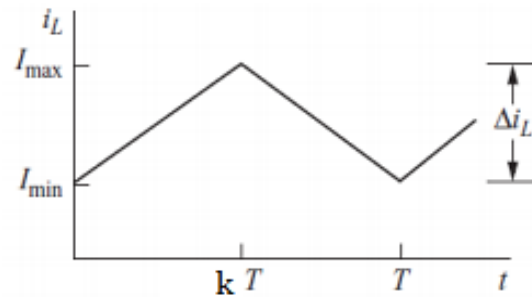
Despejando:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (29)$$

En este intervalo la bobina empieza a descargarse, así que la corriente disminuye de manera lineal como lo muestra la Figura 10

Figura 10.

Señal de carga y descarga de la bobina en el convertidor elevador



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, formas de onda de convertidor elevador b)* (p.214) (Hart D, 2001)

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-k)T} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (30)$$

$$\Delta i_{Lopen} = \frac{(V_S - V_O)(1-k)T}{L} \quad (31)$$

En estado estable la corriente por el inductor es periódica, por lo que el cambio neto en la corriente del inductor durante un periodo es cero.

$$\Delta i_{Lopen} + \Delta i_{Lclosed} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{(V_S k T)}{L} + \frac{(V_S - V_O)(1-k)T}{L} = 0 \quad (32)$$

$$V_S(k + 1 - k) - V_O(1 - k) = 0 \quad (33)$$

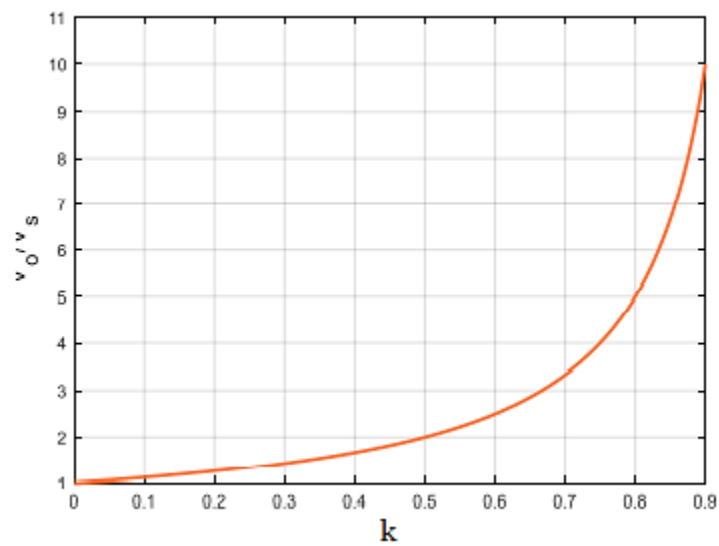
Tensión promedio de salida ($V_s \leq V_o$):

$$V_o = \frac{V_s}{1-k} \quad (34)$$

El convertidor elevador produce una tensión de salida mayor o igual a la tensión de entrada. Los valores de k no suelen llevarse cerca de 1 porque el circuito puede volverse inestable y producir corrientes de gran valor que pueden quemar los elementos del mismo.

Figura 11.

Tensión de salida en función del ciclo de trabajo en el convertidor elevador

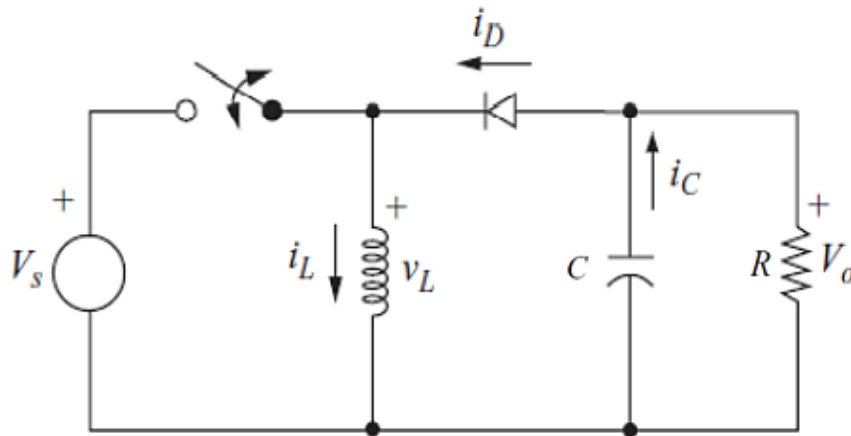


Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, módulo: convertidores DC-DC. Convertidor elevador* (Mantilla M, 2020)

2.5 Convertidor Reductor-Elevador (Buck-Boost Converter)

Figura 12.

Esquema general del convertidor reductor - elevador

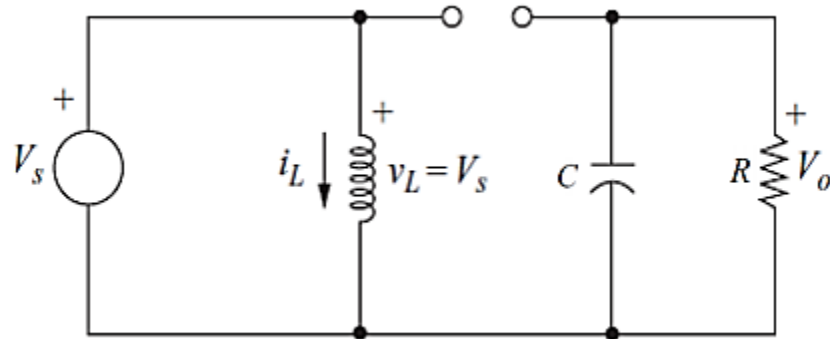


Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, El convertidor reductor-elevador a)* (p.218) (Hart D, 2001)

El convertidor reductor – elevador suministra un voltaje de salida que puede ser menor o mayor que el voltaje de entrada. La polaridad del voltaje de salida es opuesta al voltaje de entrada, por esto también es conocido por el nombre de regulador inversor.

Figura 13.

Esquema del convertidor reductor-elevador en “circuito abierto”



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, El convertidor reductor-elevador b* (p.218) (Hart D, 2001)

Con el interruptor cerrado en el intervalo de 0 a kT el diodo se polariza inversamente y se comporta como un circuito abierto, así la tensión en la bobina es igual a la tensión de entrada y empieza a cargarse.

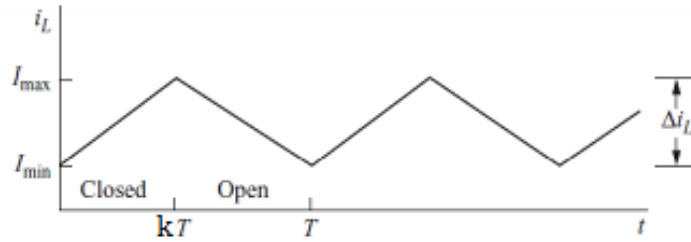
$$V_L = V_S = L \frac{di_L}{dt} \quad (24)$$

Despejando:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (25)$$

Figura 14.

Corriente que circula por la bobina en el convertidor reductor-elevador



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, formas de onda del C. reductor-elevador a)* (p.220) (Hart D, 2001)

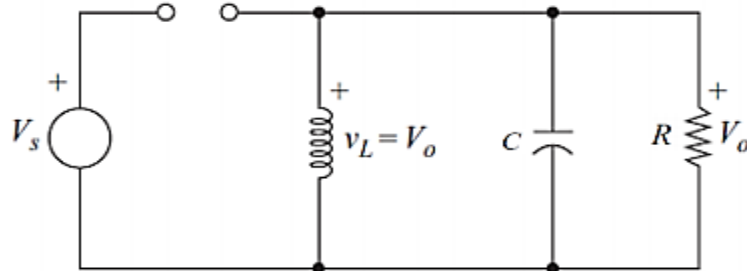
Como lo muestra la Figura 14 en el intervalo de 0 a kT la corriente de la bobina crece linealmente.

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{kT} = \frac{V_S}{L} \quad (26)$$

$$\Delta i_{L\text{closed}} = \frac{V_S kT}{L} \quad (27)$$

Figura 15.

Circuito del convertidor reductor elevador con el diodo en “corto circuito”



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, El convertidor reductor-elevador c* (p.218) (Hart D, 2001)

Cuando el interruptor se abre en el intervalo de kT a T se desconecta la tensión de entrada y la corriente que circula a través de la bobina polariza de manera directa el diodo, en este caso la tensión de salida es igual a la tensión en la bobina.

$$V_L = V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (35)$$

Despejando:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad (36)$$

Como lo muestra la Figura 14 en el intervalo de kT a T la corriente de la bobina decrece linealmente.

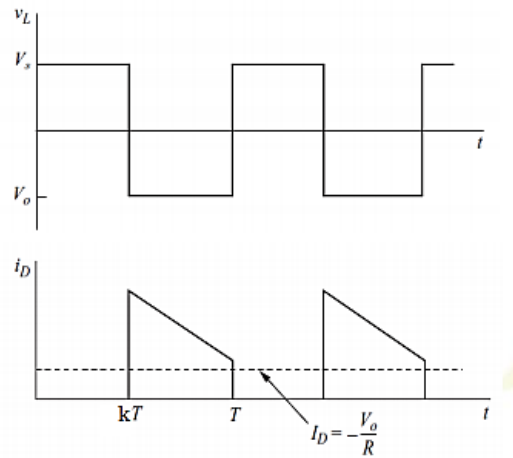
$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-k)T} = \frac{V_o}{L} \quad (37)$$

$$\Delta i_{Lopen} = \frac{V_o(1-k)T}{L} \quad (38)$$

Las gráficas en estado estable se muestran en la Figura 16.

Figura 16.

Tensión en la bobina y corriente en el diodo en estado estable



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, formas de onda del C. reductor-elevador b) y c)* (p.220) (Hart D, 2001)

En estado estable la corriente por el inductor es periódica, por lo que el cambio neto en la corriente del inductor durante un periodo es cero.

$$\Delta i_{Lopen} + \Delta i_{Lclosed} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{(V_s k T)}{L} + \frac{V_o (1-k) T}{L} = 0 \quad (39)$$

Despejando la tensión de salida se obtiene:

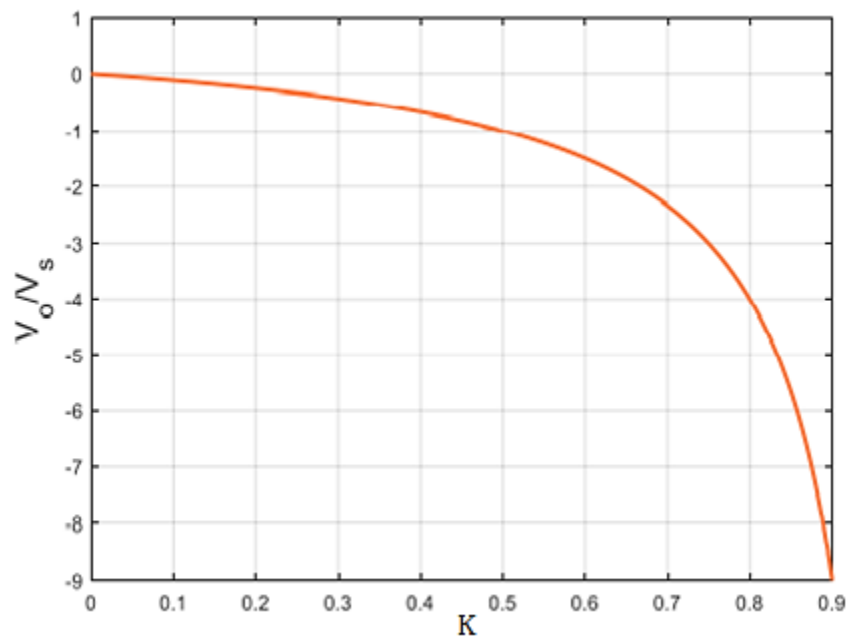
$$V_o = -V_s \left(\frac{k}{1-k} \right) \quad (40)$$

$0 \leq k \leq 0.5$: magnitud de la tensión de salida menor o igual a la tensión de entrada.

$0.5 < k < 1$: magnitud de la tensión de salida mayor que la tensión de entrada.

Figura 17.

Relación de la tensión V_o respecto la tensión V_i en el convertidor



Nota. Adaptado de *Electrónica de potencia, módulo: convertidores DC-DC. C. reductor- elevador* (Mantilla M, 2020)

3. Lógica Difusa

La lógica difusa es una herramienta matemática que permite tratar problemas en los cuales las soluciones son conjuntos de respuestas que pueden variar en forma secuencial, tal como el cambio del ciclo útil en los convertidores electrónicos de potencia. Trabaja con datos numéricos y términos lingüísticos que ofrecen desde la verdad absoluta hasta la falsedad total, por medio de reglas que son suministradas para el tratamiento del sistema. Su origen se remonta a los años sesenta cuando fue investigada por primera vez en la Universidad de Berkeley en California por el ingeniero Lofty A. Zadeh (Matute & Bernal, 2017; Díaz & Pérez, 2017; Sarmiento & Sierra, 2019)

3.1 Control Difuso

Muchas clases o conjuntos tienen límites difusos en lugar de definidos, y esta es la base matemática de la lógica difusa; el conjunto de mediciones de regulación de voltaje "grande" es un ejemplo de un conjunto difuso. El núcleo de un controlador difuso es una colección de reglas verbales o lingüísticas de la forma si-entonces. Varias variables pueden ocurrir en cada regla, tanto en el lado si como en el lado entonces. Al reflejar las opiniones de los expertos, las reglas pueden acercar el razonamiento utilizado por las computadoras al de los seres humanos. (Jantzen, 2007)

3.2 Sistemas de Inferencia Difusa (SID)

Un sistema de inferencia difusa (SID) está compuesto en su fase inicial por una etapa de fusificación, en el cual se asignan los valores de la veracidad de forma lingüística, para cada una de las entradas correspondientes. El SID es la base del controlador.

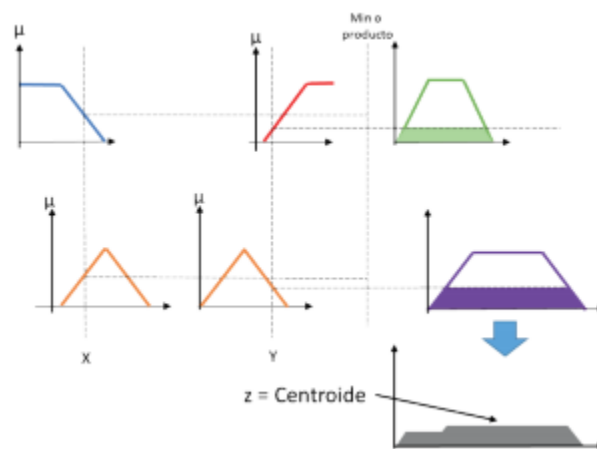
3.3 Tipos de SID

3.3.1 Mamdani

Determina el valor correspondiente para cada variable de entrada. El mínimo entre ellos o su producto, son las T-normas que se suelen emplear. Para la defusificación, se considera la función de membresía cortada a nivel del valor de la T-norma. La salida concreta es el centroide de esta figura que se ha formado como lo muestra la Figura 18. (Matute & Bernal, 2017)

Figura 18.

Estructura tipo Mamdani



Nota. Estructura del SID tipo Mamdani. Tomado de *Técnicas de lógica difusa en Ingeniería de control. Revista ciencia, innovación y tecnología* (p.127) (Matute & Bernal, 2017)

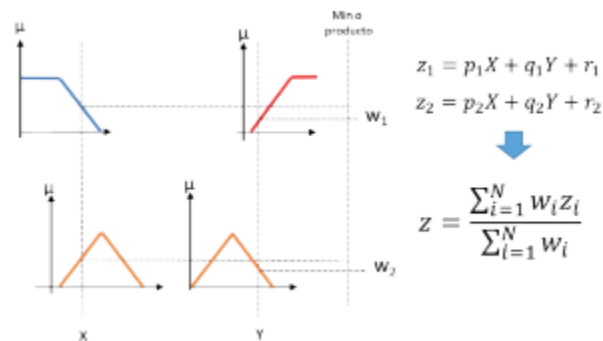
3.3.2 Sugeno

Es un SID que surgió después del Mamdani. El SID tipo Sugeno es mejor cuanto a su menor procesamiento computacional. No emplea el conjunto de funciones de membresía tradicional para la salida, sino todas las combinaciones posibles de los valores de entrada. La salida concreta es un promedio ponderado entre los resultados de las combinaciones lineales de salida y

los valores arrojados por la T-norma. La Figura 19 muestra gráficamente en qué consiste. (Matute & Bernal, 2017)

Figura 19.

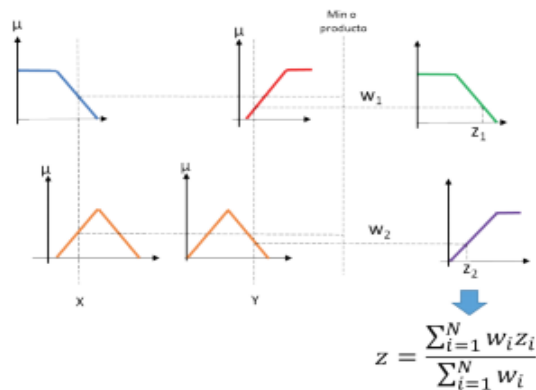
Estructura tipo Sugeno



Nota. Estructura del SID tipo Sugeno. Tomado de *Técnicas de lógica difusa en Ingeniería de control. Revista ciencia, innovación y tecnología* (p.127) (Matute & Bernal, 2017)

3.3.3 Tsukamoto

Al igual que en el SID tipo Mamdani, se estiman funciones de membresía de salida siempre inyectivas, ya que debe conseguirse la pre-imagen del valor de la T-norma. Estas se promediarán luego ponderadamente para obtener una salida concreta como lo muestra la Figura 20. (Matute & Bernal, 2017)

Figura 20.*Estructura tipo Tsukamoto*

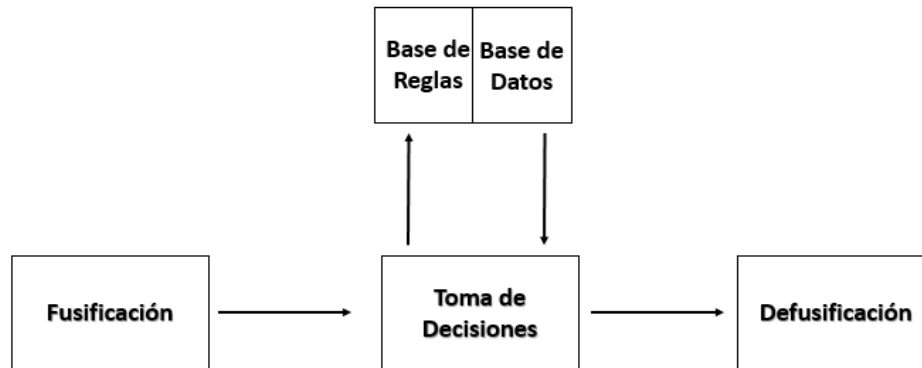
Nota. Estructura del SID tipo Tsukamoto. Tomado de *Técnicas de lógica difusa en Ingeniería de control. Revista ciencia, innovación y tecnología* (p.127) (Matute & Bernal, 2017)

3.4 Arquitectura del Controlador

El controlador de lógica difusa se puede dividir en cuatro módulos: La *fusificación* es la transformación de los datos de entrada, en valores o conjuntos lingüísticos adecuados, es decir, la asignación de las funciones de pertenencia establecidas. La *base de conocimientos* incluye la información de las reglas lingüísticas de control y la base de datos. La *inferencia* o toma de decisiones relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida, definiendo una única salida lingüística para cada combinación posible de los valores lingüísticos de entrada. La *defusificación* es la conversión del valor difuso inferido al valor real o acción de control. (Ver figura 21) (Elmas, Deperlioglu, & Huseyin, 2009; Ross, 2010)

Figura 21.

Módulos del controlador difuso



3.5 Sistema del Controlador

Las entradas de este controlador de lógica difusa son el error e y la diferencia del error de , definidas como:

$$e = V_{ref} - V_0 \quad (41)$$

$$de = e(k) - e(k - 1) \quad (42)$$

Donde V_0 es la salida de voltaje actual, k el tiempo de muestreo y V_{ref} la tensión deseada. La derivada del error de cambia a medida de cada iteración, siendo lo ideal que converja a 0. La respuesta del controlador es el cambio en el ciclo de trabajo. Ecuación (43)

$$d(k) = d(k - 1) + du(k - 1) \quad (43)$$

Se definen todas las combinaciones por medio de la base de reglas: NB (Negativo grande), NM (Negativo medio), NS (Negativo bajo), ZE (Cero), PS (Positivo bajo), PM (Positivo mediano), PB (positivo grande) como se muestra en la tabla, las cuales también pueden ser representados por índices numéricos (Tablas 2 y 3)

Tabla 2.*Reglas de control difuso*

e/de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE

Nota: Conjunto de respuestas para todas las combinaciones posibles de la base de reglas. Adaptado de *Adaptive fuzzy logic controller for DC-DC converters ScienceDirect (P. 1543)* (Elmas, Deperlioglu, & Huseyin, 2009)

Tabla 3.*Representación de las reglas por medio de índices*

e/de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-0.015	-0.015	-0.015	-0.015	-0.02	-0.002	0
NM	-0.015	-0.015	-0.015	-0.02	-0.002	0	0.002
NS	-0.015	-0.015	-0.02	-0.002	0	0.002	0.02
ZE	-0.015	-0.02	-0.002	0	0.002	0.02	0.15
PS	-0.02	-0.002	0	0.002	0.02	0.15	0.15
PM	-0.002	0	0.002	0.02	0.15	0.15	0.15
PB	0	0.002	0.02	0.15	0.111	0.15	0.15

Nota: Valor numérico asignado para la combinación de las reglas base Adaptado de *Adaptive fuzzy logic controller for DC-DC converters ScienceDirect (P. 1543)* (Elmas, Deperlioglu, & Huseyin, 2009)

En la Tabla 3 se puede observar simetría en las reglas del controlador. La toolbox Fuzzy Logic ofrece una perspectiva visual de las reglas como se muestra en las Figuras 22 y 23. La obtención detallada de estas graficas se explica en el manual anexo.

Figura 22.

Superficie de las reglas del controlador establecidas en la Tabla 3.

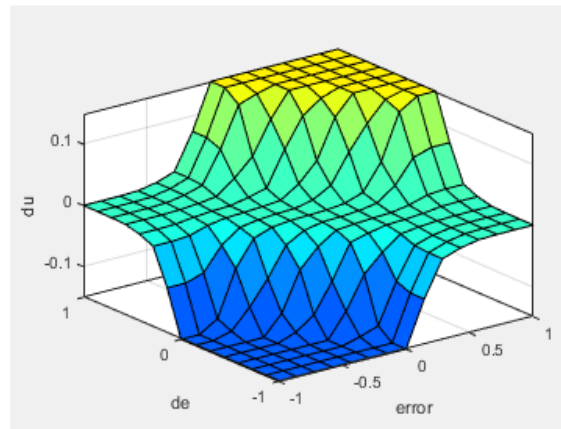
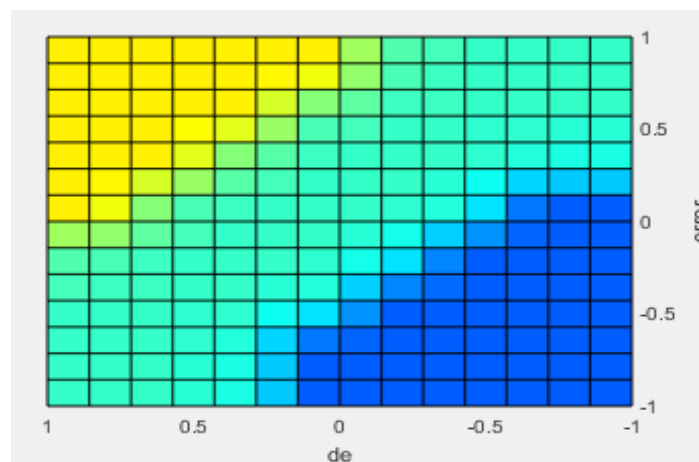


Figura 23.

Simetría en las reglas del controlador.



El propósito de las reglas es obtener de manera sencilla las funciones de pertenencia con el método de representación de índices. Para este caso en particular, las funciones de pertenencia del error y de la derivada del error son iguales como se muestra en las Figuras 24 y 25.

Figura 24.

Funciones de pertenencia del error

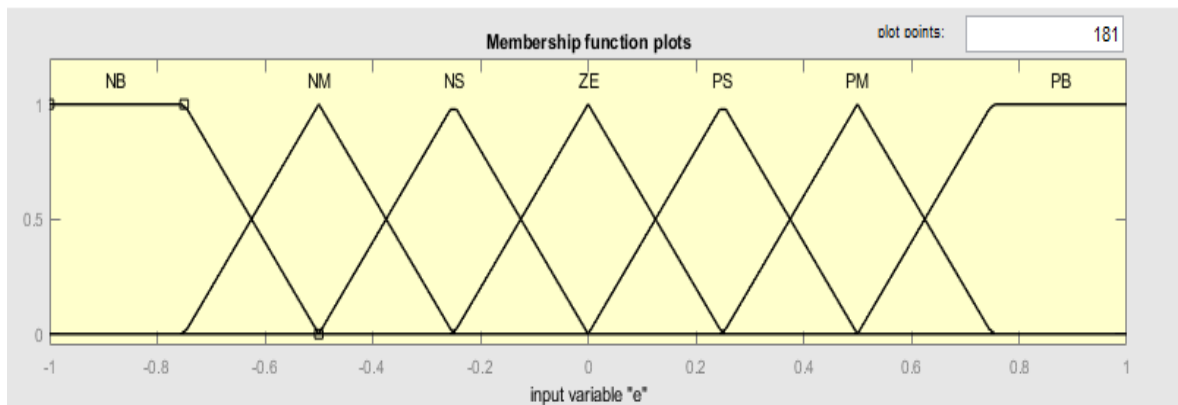
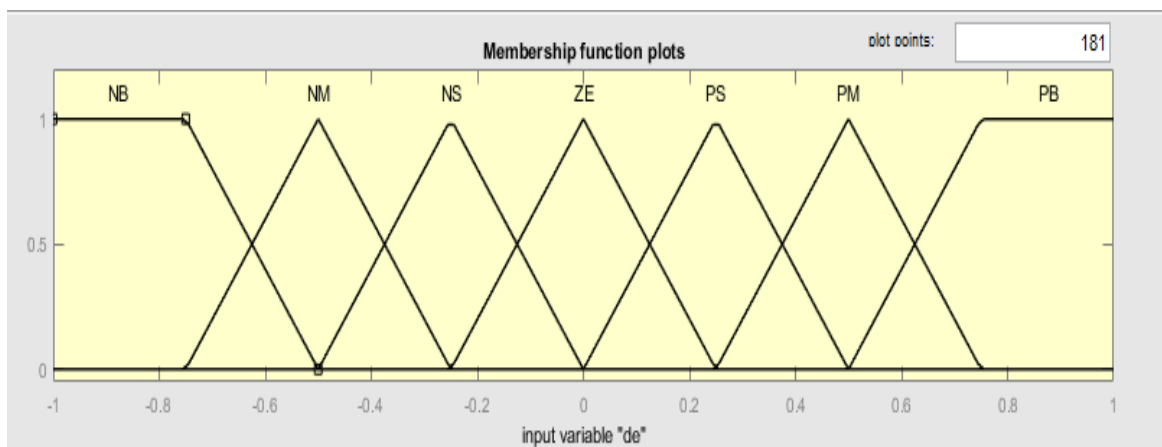


Figura 25.

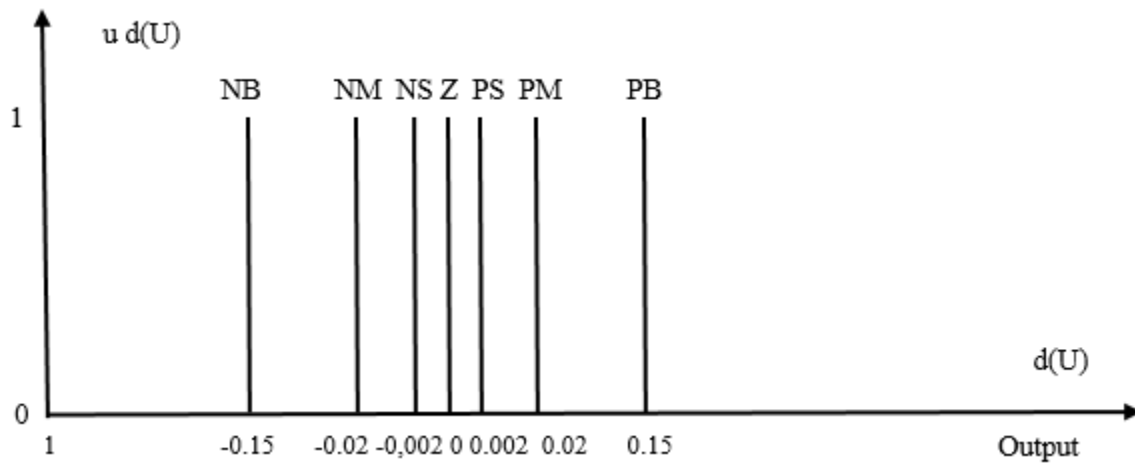
Funciones de pertenencia de la derivada del error



Para este universo de discurso las funciones de pertenencia de salida se definen como constantes acotados en un rango entre -1 y 1 (Ver Figura 26).

Figura 26.

Funciones de pertenencia de la salida



Nota. Adaptado de *Adaptive fuzzy logic controller for DC-DC converters ScienceDirec. Membership functions b)* (P. 1544) (Elmas, Deperlioglu, & Huseyin, 2009)

4. Softwares

4.1 MATLAB



Nota. Imagen tomada de (MathWorks, 2019)

Es una plataforma de programación y cálculo numérico para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. Combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa la matemática de matrices y arrays directamente (MathWorks, s.f.).

4.1.1 Uso en Sistemas de Control

En todas las etapas de desarrollo, desde la modelización de la planta hasta el diseño y ajuste de algoritmos de control, incluyendo la lógica de supervisión, finalizando con la implementación gracias a la generación automática de código; verificación, validación y comprobación del sistema (MathWorks, s.f.), MATLAB /Simulink ofrece:

- Un entorno de diagramas de bloques multidominio para modelizar la dinámica de la planta, diseñar algoritmos de control y ejecutar simulaciones de lazo cerrado.

- Funciones prediseñadas y herramientas interactivas para analizar el sobre-impulso, tiempo de subida, margen de fase, margen de ganancia y otras características de rendimiento y estabilidad en los dominios de la frecuencia y el tiempo.
- Lugar de raíces, diagramas de Bode, LQR, LQG, control robusto, control predictivo de modelos y otras técnicas de diseño y análisis.
- Ajuste automático de sistemas de control PID, de ganancia programada y SISO/MIMO arbitrarios.
- Modelización, diseño y simulación de la lógica de supervisión para llevar a cabo la planificación, el cambio de modo y la detección, aislamiento y recuperación de errores (FDIR).

4.2 PLECS



Nota. Imagen tomada de (Plexim, s.f.)

Es una herramienta computacional aplicada a muchas disciplinas de la electrónica de potencia. Facilita el modelado y simulación de sistemas complejos, incluidas fuentes de energía, convertidores de energía y cargas. Posee una biblioteca completa de componentes, que cubre los aspectos eléctricos, magnéticos, térmicos y mecánicos de los sistemas de conversión de energía y sus controles. Los circuitos de la electrónica de potencia se capturan con un editor de esquemas de una manera familiar e intuitiva para el usuario (Plexim, s.f.).

4.2.1 Herramientas de Diseño Funcional

Además de la interfaz de modelado y la biblioteca de componentes, PLECS proporciona varias herramientas para ayudar en el diseño y análisis de sistemas electrónicos de potencia (Plexim, s.f).

- Durante o después de la simulación, los datos se visualizan en PLECS Scope. Inspirado en un sistema de instrumentación y medición de electrónica de potencia real, el osciloscopio permite al usuario extraer las formas de onda exactas de interés, así como examinar los datos para su pos-procesamiento y generación de informes.
- Las herramientas de análisis integradas se configuran fácilmente para proporcionar puntos de funcionamiento de estado estable o funciones de transferencia de bucle abierto y cerrado. Además, las matrices de espacio de estados de un sistema se pueden extraer para análisis avanzados.
- Con los scripts de simulación, el usuario puede cambiar parámetros, procesar datos de salida y evaluar los resultados.
- El codificador PLECS disponible por separado puede generar código “C” en tiempo real a partir de un circuito o diagrama de bloques creado con PLECS-Blockset.

4.2.3 PLECS-Standalone

Es un paquete de software autónomo para la simulación en el dominio del tiempo de sistemas electrónicos de potencia. Proporciona la solución todo en uno para modelar circuitos eléctricos complejos y controles sofisticados en un solo entorno. El usuario puede elegir entre solucionadores de paso variable y de paso fijo. Los solucionadores de pasos de tiempo variable generalmente se prefieren para simulaciones precisas y eficientes, porque adoptan el tamaño del

paso durante la simulación dependiendo de la dinámica del modelo. PLECS-Standalone proporciona solucionadores de pasos variables implícitos y explícitos optimizados para sistemas rígidos y no rígidos (Plexim, s.f).

4.2.4 PLECS-Blockset

Es una herramienta única para la simulación rápida de circuitos electrónicos de potencia en el entorno de Simulink. Permite simulaciones combinadas de circuitos eléctricos modelados en PLECS con controles modelados en Simulink. Cada circuito PLECS se representa en un modelo de Simulink como un bloque individual. El usuario puede alimentar señales al bloque para controlar fuentes eléctricas o dispositivos de conmutación. Un bloque de circuito PLECS se comporta como un subsistema de Simulink normal y los solucionadores de Simulink operan de forma nativa (Plexim, s.f).

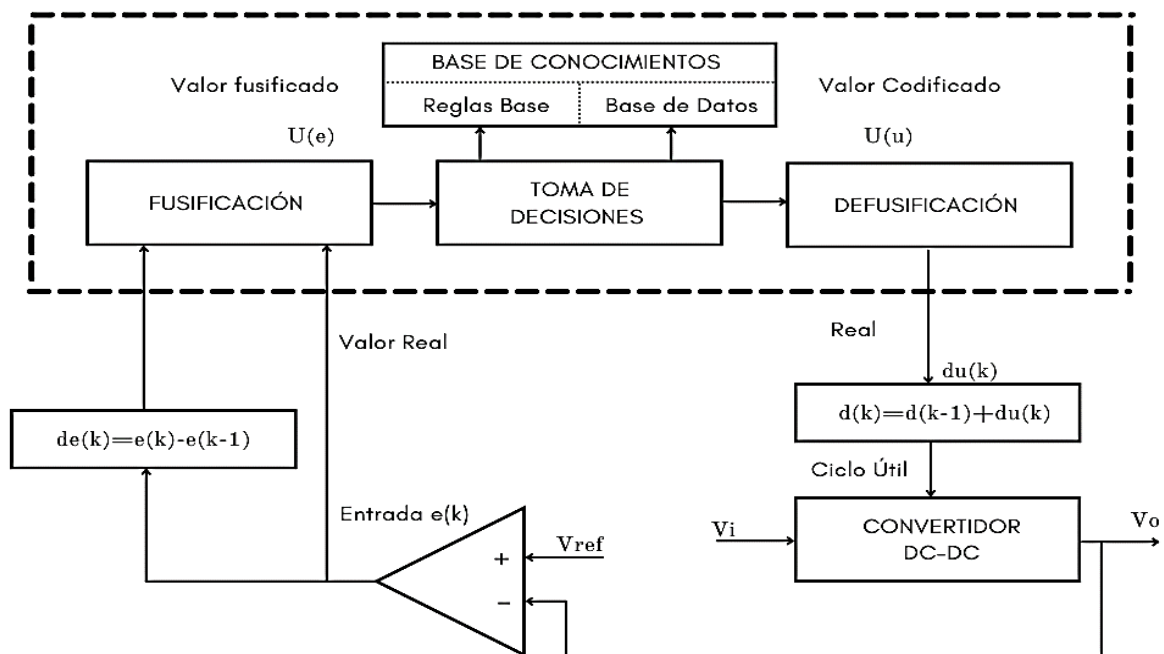
5. Simulación

La simulación contribuye a la predicción del comportamiento de un sistema, permite diagnosticar problemas en un diseño existente o evaluar un diseño nuevo (MathWorks, s.f.).

Se procede con la implementación de los convertidores, controlados por medio de lógica difusa en MATLAB /Simulink, PLECS-Blockset y PLECS-Standalone. El procedimiento detallado se explica en el manual anexo y los parámetros de cada convertidor se encuentran al final de este documento (ver apéndice A).

Figura 27.

Estructura del controlador para la simulación



Nota. Esta figura muestra el sistema general de control. Adaptado de *Adaptive fuzzy logic controller for DC-DC converters ScienceDirect (P. 1541)* (Elmas, Deperlioglu, & Huseyin, 2009)

En la Figura 27 se puede observar dentro del recuadro punteado, la estructura del controlador difuso descrita anteriormente en la sección 3.4. Debido a que PLECS no posee una toolbox para implementar este tipo de control, se dispuso a realizar el montaje en Simulink y adaptar el proceso en una look-up table, la cual descrita de manera sencilla es un vector de datos, que en este caso simula el comportamiento del controlador. Además, se manejó el mismo paso de simulación y solver (TUSTIN). Todo esto para que la comparación se realizará de manera ecuánime. Cabe resaltar que el uso de la lookup-table optimiza el tiempo de simulación (Vollala & Ramasubramanian, 2015).

Dentro de la misma figura se pueden ver las variables de entradas y de salida. La implementación de la estructura para la simulación, la cual incluye los bloques del convertidor, normalización del error y el controlador se describen en el manual anexo, los valores de ganancia para el convertidor que allí se observan se obtuvieron con el método empírico de ensayo y error.

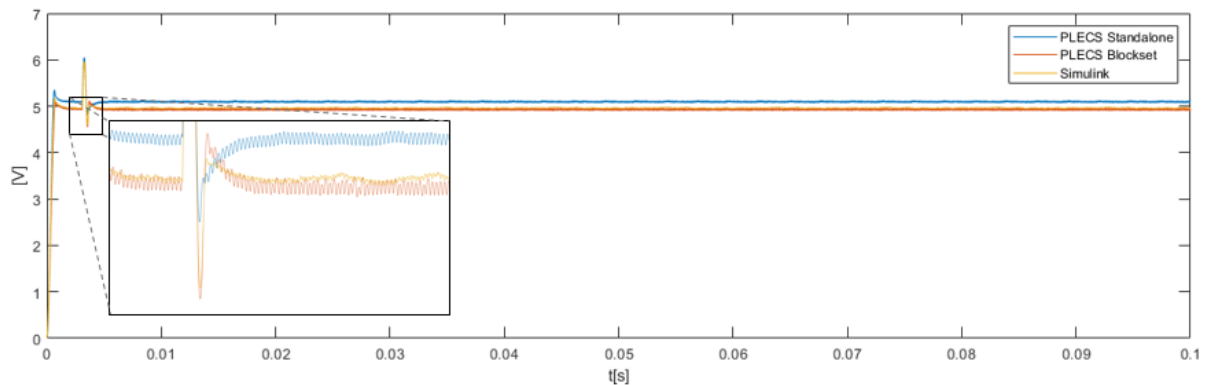
En las siguientes sub-secciones se muestran los resultados de las simulaciones para los tres convertidores, se incluyeron las señales de salida de cada tipo de convertidor en el software simulado, para comparar de mejor manera los resultados obtenidos.

5.1 Convertidor Reductor

La tensión de salida para este convertidor se presenta en la Figura 28. Se muestra el transitorio de arranque en aproximadamente 1 [ms], después la carga equivalente se reduce de 4[Ω] a 2 [Ω] en 3.1 [ms] y finalmente se estabiliza en 5[ms].

Figura 28.

Tensión de salida para el convertidor reductor en cada software



Se puede observar en la Figura 28 que los softwares MATLAB /Simulink y PLECS-Blockset, poseen una diferencia mínima en la tensión de salida, esto puede ser atribuido a los parámetros en los elementos del convertidor, aunque se configuraron de igual manera, Simulink posee más variables en la mayoría de los elementos que PLECS. Un ejemplo de esto es el diodo, en Simulink tiene los parámetros R_{on} , L_{on} , V_f , R_s y C_s , mientras que PLECS solo posee los parámetros de R_{on} y V_f .

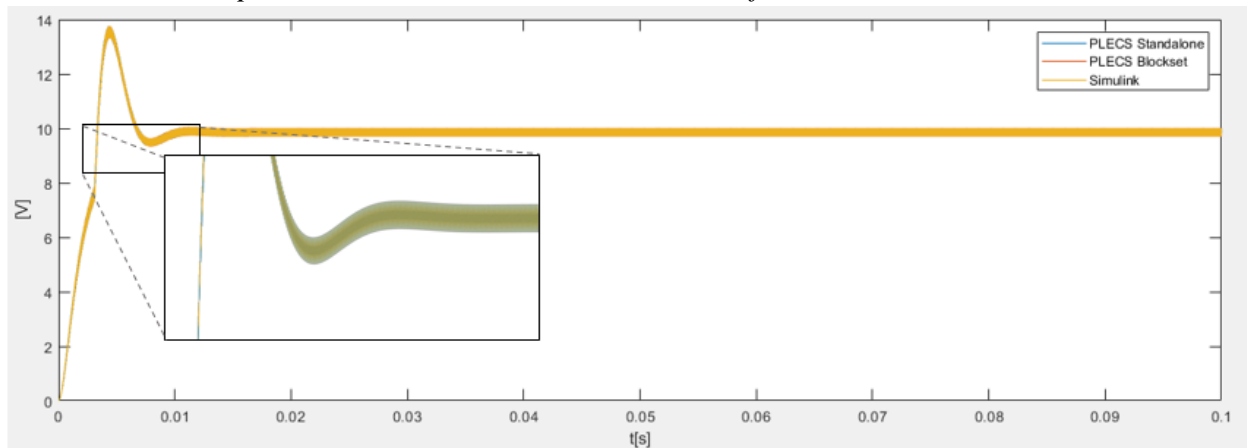
Respecto a PLECS-Standalone, se presenta una diferencia mayor que en MATLAB /Simulink. Esto es causado por lo anteriormente mencionado y que el Solver TUSTIN, empleado en ambos softwares no se implementó de igual forma (Rodríguez y Zhao, 2021).

5.2 Convertidor Elevador

En este convertidor se observa el transitorio de arranque junto con el cambio de carga y se estabiliza en aproximadamente 10[ms].

Figura 29.

Tensión de salida para el convertidor elevador en cada software



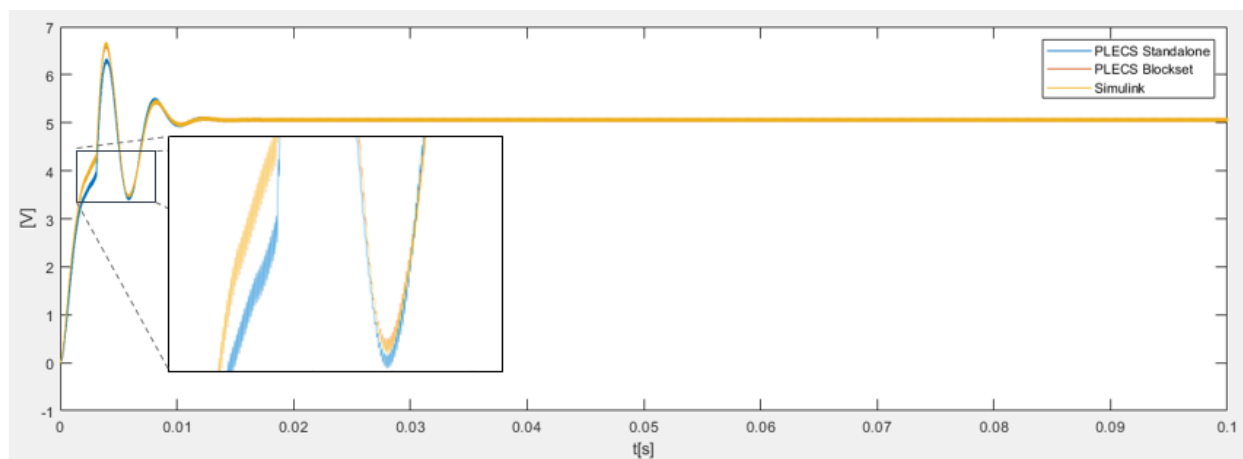
La Figura 29 muestra que la señal de tensión de salida posee un comportamiento parecido. La diferencia (del rizado) varía en un porcentaje muy bajo en los softwares MATLAB /Simulink y PLECS (Standalone y Blockset).

5.3 Convertidor reductor-elevador

En este convertidor el transitorio de arranque y el cambio de carga tardan aproximadamente 12 [ms], para después estabilizarse en la tensión deseada.

Figura 30.

Tensión de salida para el convertidor reductor-elevador cada software



En la Figura 30 se puede apreciar que hay una pequeña diferencia en el transitorio entre los softwares MATLAB /Simulink y PLECS (Standalone), sin embargo, cuando se estabiliza, llegan al mismo valor de tensión de salida. El tiempo de establecimiento en los dos softwares es aproximadamente de 12 [ms].

6. Resultados Para lo Diferentes Equipos de Computo

Para este capítulo se emplearon 6 equipos de cómputo que cumplieran con los requisitos técnicos exigidos por los softwares (Ver apéndices B y C). Así mismo se presentan las especificaciones de cada equipo usado para este análisis (Ver apéndice D).

Tabla 4.

Tiempo de Simulación

Equipo	PLECS Standalone	PLECS Blockset	MATLAB Simulink
Convertidor Reductor			
1	1.982	11.047	11.669
2	0.119	3.17	3.834
3	0.661	4.85	4.112
4	0.352	5.659	3.406
5	0.429	5.43	3.314
6	0.111	4.807	4.432
Promedio	0.61	5.827	5.13
Convertidor Elevador			
1	2.26	12.313	12.706
2	0.58	3.079	4.99
3	0.615	3.191	6.617
4	0.566	3.141	4.028
5	0.7089	4.761	6.055
6	0.4793	4.224	5.102
Promedio	0.87	5.12	6.58
Convertidor Reductor-Elevador			
1	1.085	14.737	14.982
2	0.643	3.135	4.256
3	0.603	3.46	5.499
4	0.586	2.889	3.729
5	0.897	4.476	5.983
6	0.509	4.781	4.923
Promedio	0.72	5.58	6.562

Nota. En la tabla se observa el tiempo en segundos que tardaron las simulaciones de los convertidores en los 6 equipos de cómputo. En primera instancia se registra el menor tiempo de simulación en el software PLECS-Standalone, seguido de PLECS-Blockset y por último MATLAB/Simulink.

Tabla 5.*Memoria RAM*

Equipo	PLECS Standalone	PLECS Blockset	MATLAB Simulink
Convertidor Buck			
1	79.5	1710	1552.2
2	74	1783.3	1738.09
3	91	1599.2	1578.7
4	87.2	2285.8	2013.9
5	89.3	1842	1582
6	85.2	2792.3	2536.6
Promedio	84.37	2002.1	1833.58
Convertidor Boost			
1	83.5	1725.6	1661.3
2	81.4	1773.8	1743.6
3	92.3	1581	1541.8
4	88.9	2224.5	2109.7
5	90.7	1830	1745
6	92.5	2804.6	2632.3
Promedio	88.22	1989.92	1905.62
Convertidor Buck-Boost			
1	80.3	1787.1	1772.6
2	84.9	1804.7	1764.3
3	92.7	1566.6	1557.4
4	91.2	2254.2	2133.8
5	90.9	1981	1790
6	93.3	2841.7	2710.1
Promedio	88.88	2039.22	1954.7

Nota. Memoria RAM en MB que ocupa cada software para los diferentes equipos durante las simulaciones

La memoria de acceso aleatorio o memoria RAM es la encargada de entregar la información de manera rápida al procesador de un equipo. En la Tabla 5 quedaron registrados los requerimientos de memoria para cada software, allí se observa una notable diferencia de PLECS Standalone, en el cual, al realizar la simulación, no almacena la misma cantidad de información como Simulink y PLECS-Blockset, cuyo requerimiento de memoria es casi el mismo, ya que

manejan el mismo entorno de simulación para el control, la mínima diferencia se debe a que PLECS-Blockset requiere la memoria de PLECS en conjunto con Simulink, sin embargo, el tiempo de simulación promedio es menor debido a que el análisis para el circuito del convertidor se realiza en el entorno de PLECS, aprovechando la velocidad de cálculo que posee.

7. Conclusiones

A partir de los objetivos planteados, se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo de investigación y se evidencia su total cumplimiento.

- El análisis comparativo de los softwares demostró la solución rápida y bajo costo computacional del software PLECS-Standalone para simulaciones en electrónica de potencia, además de poseer una interfaz eficiente e intuitiva para el usuario. Por otro lado, PLECS-Blockset empleo una capacidad mayor en memoria RAM, pero con una reducción en el tiempo de simulación en relación a MATLAB /Simulink.
- En promedio, la capacidad de la memoria RAM que necesita PLECS-Standalone es aproximadamente, tan solo el 5% de la requerida por MATLAB /Simulink.
- El software PLECS-Standalone posee una mayor portabilidad, debido a que sus requerimientos técnicos son menos exigentes con respecto a MATLAB /Simulink, lo cual permite una amplia funcionalidad en la mayoría de los equipos de cómputo.
- La implementación del control basado en lógica difusa junto con los convertidores DC-DC para las tres topologías Reductor, Elevador y Reductor-Elevador, se encuentran descritas en el manual anexo para los softwares MATLAB /Simulink y PLECS (Standalone y Blockset).

Referencias Bibliográficas

- Cetin,E, Omer, D , Huseyin, S (2009). Adaptive fuzzy logic controller for DC–DC converters
Department of Electric, Faculty of Technical Education, University of Gazi, Ankara,
Turkey-Department of Electronics and Computer, Faculty of Technical Education,
University of Afyon Kocatepe
- Daniel W. Hart (2001). Introducción a la Electrónica de Potencia. Madrid, España. respecto a la
primera edición en español por: PEARSON EDUCACIÓN, S.A. Núñez de Balboa.
- Díaz, D. Pérez, A. (2017). Modelado, simulación e implementación de un sistema de control de
tensión para un convertidor Buck, basado en lógica difusa.
- Jantzen, J (2007). Foundations of Fuzzy Control Technical University of Denmark John Wiley &
Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England
- Mantilla Villalobos, María Alejandra (2020). Convertidores DC-DC. En Asignatura Electrónica
de Potencia. Universidad Industrial de Santander.
- MathWorks (2019). MATLAB. Sistemas de control (Versión 2019b).
<https://la.mathworks.com/solutions/control-systems.html>
- Matute, A, Suárez, W. (2017), Técnicas de Lógica Difusa en Ingeniería de Control Fuzzy Logic
Techniques in Control Engineering Boyacá, Colombia, Grupo de Investigación BINA,
Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Tunja Colombia.

-
- MSc. J.F. Báez-Matos. Ing. R. A. Jiménez-Rodríguez, Ing. D. R. Gutiérrez-Toledo (2018).
MATLAB /Simulink: Modelos Para Simular Mediciones Eléctricas En Circuitos R, RI Y
Rlc Monofásicos. ROCA. Revista científico- educacional de la provincia Granma.
- Plexim. (2019). PLECS. The Simulation Platform for Power Electronic Systems (Versión 4.3.6).
<https://www.plexim.com/products/ PLECS>
- Rodríguez, E y Zhao, S. (27 de abril de 2021). Seminario online de PLECS: Modelado y
simulación de sistemas eléctricos de potencia [Ajustes del Solver]. Universidad de Talca,
Chile.
- Ross, T (2010). Fuzzy logic with engineering Applications. University of New Mexico, USA. John
Wiley & Sons, Ltd
- Sarmiento, S. Sierra, A. (2019). Diseño y optimización de un controlador basado en lógica difusa
para un convertidor de potencia tipo reductor DC/DC
- Vollala, S., Begum, B. S., & Ramasubramanian, N. (2015). Hardware design for multiplicative
modular inverse based on table look up technique. International Conference on Computing
and Network Communications.

Apéndices

Apéndice A. Topologías de los convertidores para el caso de estudio

Tipo	Esquema básico del convertidor	Valores
Reductor		Voltaje de entrada = 15 V Voltaje de salida = 5 V Corriente Máx = 6 A Inductor = 1mH Capacitor = 100uF Resistencia de carga = 4 Ω Frecuencia de conmutación = 20 kHz
Elevador		Voltaje de entrada = 5 V Voltaje de salida = 10 V Corriente Máx = 6 A Inductor = 1mH Capacitor = 200uF Resistencia de carga = 4 Ω Frecuencia de conmutación = 20 kHz
Reductor Elevador		Voltaje de entrada = 15 V Voltaje de salida = 5 V Corriente Máx = 6 A Inductor = 1mH Capacitor = 200uF Resistencia de carga = 4 Ω Frecuencia de conmutación = 20 kHz

Nota: La Tabla presenta las topologías de los convertidores y los valores de sus elementos para la simulación. Adaptado de *Adaptive fuzzy logic controller for DC-DC converters ScienceDirect (P. 1543)* (Elmas, Deperlioglu, & Huseyin, 2009)

Apéndice B. Requerimientos del sistema Software PLECS

Sistema Operativo	Win 7/8/8.1/10
Memoria RAM	512 MB
Espacio libre Disco duro	400 MB
Procesador Mínimo	Intel Dual Core

Nota. Los requerimientos mínimos para la instalación de PLECS se tomaron de (Plexim, s.f.) Adicionalmente, para usar PLECS Blockset es necesario que la instalación contenga la misma licencia y versión de PLECS Standalone.

Apéndice C. Requerimientos del sistema Software MATLAB /Simulink

Sistema Operativo	Win 7/Server 2016/Server 2019/10
Memoria RAM	4GB
Espacio Disco duro	5.8 GB
Procesador Mínimo	Intel o AMD x86 -64

Nota. Requerimientos mínimos para la instalación de MATLAB /Simulink versión 2019b. Tomado de (MarthWorks, s.f.)

Apéndice D. Especificaciones técnicas de los equipos de cómputo

Equipo	Marca	Sistema operativo	Procesador	Disco (GB)	Memoria RAM (GB)	Tarjeta gráfica
1	Asus-X455L	Windows 8.1 - 64 bits	Intel core i7 4th	1000 - HDD	8	NVIDIA GEFORCE 820M
2	Asus X555Q	Windows 10 - 64 bits	AMD A 12-9720p	1000 - HDD	12	AMD Radeon R7 Graphics
3	Asus	Windows 10 - 64 bits	Intel core i5 6th	1000 - HDD	8	NVIDIA GEFORCE 930M
4	Lenovo-MT-81FB	Windows 10 - 64 bits	AMB Ryzen 3 - 2200U	2000 - HDD	8	AMD Radeon Vega 3 Graphics
5	HP-15-ST100	Windows 10 - 64 bits	Intel Core i5 8th	1000 - HDD	8	NVIDIA GEFORCE MX110
6	ACER	Windows 10 - 64 bits	Intel core i7 7th	1000 - HDD	24	NVIDIA GEFORCE gtx 970

Nota. Se presentan los modelos de los equipos de cómputo empleados para la simulación