

CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

TESIS

CONTROLADORES DIFUSOS APLICADOS A CONVERTIDORES DC/DC.

PRESENTA

Alfonso Vela Rivera

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON OPCIONES A LA COMPUTACIÓN, MATEMÁTICAS APLICADAS.

TUTOR

Dr. Luis Alejandro Flores Oropeza

COMITÉ TUTORIAL

MSc. Luis Enrique Arámbula Miranda

Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala

Aguascalientes, Ags. Septiembre de 2013.



M. C. JOSÉ DE JESÚS RUÍZ GALLEGOS DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS PRESENTE

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante ALFONSO VELA RIVERA con ID 35281 quien realizó la tesis titulada: CONTROLADORES DIFUSOS APLICADOS A CONVERTIDORES DC/DC, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el VOTO APROBATORIO, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE "Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 17 de septiembre de 2013.

Dr. Luis Alejandro Flores Oropeza

Tutor de tesis

M. Sc. Luis Enrique Arámbula Miranda. Asesor de tesis. Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala. Asesor de tesis.

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado c.c.p.- Jefatura del Depto. de Apoyo al Posgrado

c.c.p.- Consejero Académico

c.c.p.- Minuta Secretario Técnico





ING. EN ELEC. ALFONSO VELA RIVERA ALUMNO (A) DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS CON OPCIÓN A LA COMPUTACIÓN, MATEMÁTICAS APLICADAS PRESENTE.

Estimado (a) alumno (a) Vela:

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido el voto aprobatorio de su tutor de tesis titulada: "CONTROLADORES DIFUSOS APLICADOS A CONVERTIDORES DC/DC", hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su examen de grado.

Sin otro particular me permito saludarle muy afectuosamente.

A T E N T A M E N T E
Aguascalientes, Ags., 20 de septiembre de 2013
"SE LUMEN PROFERRE"
EL DECANO SUSTITUTO

GENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

c.c.cp.- Interesado

c.c.p.- Secretaría de Investigación y Postgrado

c.c.p.- Jefatura del Depto. de Apoyo al Posgrado

c.c.p.- Consejero Académico

c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

JJRG,mjda





DICTAMEN DE REVISIÓN DE LA TESIS / TRABAJO PRÁCTICO

DATOS DEL ESTUDIANTE	
NOMBRE:	ID (No. de Registro):
Alfonso Vela Rivera	35281
PROGRAMA:	ÁREA:
Maestría en Ciencias con opciones a Computación, Matemáticas Aplicadas	Computación
TUTOR/TUTORES:	a ¥
Dr. Luis Alejandro Flores Oropeza M. Sc. Luis Enrique Arámbula Miranda Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala	
TESIS (X) TRA	ABAJO PRÁCTICO ()

OBJETIVO:

En este trabajo se presenta el diseño, implementación, simulación y comparación de desempeño de un Controlador Difuso Tipo 2 (T2FLC), de un Controlador Difuso Tipo 1 (T1FLC) y de un Controlador Proporcional-Integral (PI) al ser aplicados en Convertidores de DC/DC, en particular se ha estudiado su empleo en un Convertidor Buck (reductor).

Los Controladores desarrollados tienen como variables de entrada al Error en el Voltaje de Alimentación e y a su derivada ce. La variable de salida de ambos Controladores es el Cambio en la Forma de Onda de Referencia Δu_{fc} que determina el ciclo de trabajo del convertidor. Los parámetros de prueba empleados son el Voltaje de Salida Promedio, el Error en Estado Estable y el Voltaje de Rizo de Salida.

La implementación de los Controladores es llevada a cabo usando un esquema meramente computacional en el entorno de desarrollo Matlab. Su simulación se realiza en la herramienta Simulink del mismo entorno de desarrollo.

Según los experimentos realizados, cuando no hay variaciones en los parámetros del convertidor (Caso Nominal), el Controlador Difuso Tipo 2 presenta una reducción del 10.9% del valor del Error en Estado Estable obtenido por el Controlador Difuso Convencional y una disminución del 18.7% con relación al valor alcanzado por Controlador Proporcional-Integral. Es decir, el Controlador Difuso Tipo 2 se acerca más al valor del Voltaje Promedio de Salida deseado (10 volts). Con respecto al Voltaje de Rizo de Salida, el Controlador Difuso Tipo 2 redujo en un 9.42% el nivel obtenido por el Controlador Difuso Convencional y en un 53.2 % el valor conseguido por el Controlador Proporcional-Integral. Es decir, el valor del Voltaje de Rizo de Salida conseguido al aplicar un Controlador Difuso Tipo 2 es más cercano a su valor ideal (0 volts).

Cuando se presenta una Variación en la Resistencia de Carga R_L de 100 a 50 Ohms, el Controlador Difuso Tipo 2 reduce en un 95.7% el valor del Error en Estado Estable alcanzado por el Controlador Difuso Tipo 1, y en un 98.6% el valor conseguido por el Controlador Proporcional-Integral. Al analizar los resultados obtenidos bajo el parámetro de Voltaje de Rizo de Salida, el Controlador Difuso Tipo 2 obtiene un valor de 0.047 volts, en cambio Controlador Difuso Tipo 1 alcanza un valor de 0.0572 volts y el Controlador Proporcional-Integral consigue un valor de 0.111 volts.

Código: FO-040200-23 Revisión: 00 Emisión: 21/02/11





Finalmente al variar el Voltaje de Alimentación V_{IN} de 24 a 20 volts, el Controlador Difuso Tipo 2 reduce el valor del Error en Estado Estable del Controlador Difuso Convencional en un 68.2% y en un 93.5% el valor obtenido por el controlador PI. De igual manera el Controlador Difuso Tipo 2 bajo el parámetro de Voltaje de Rizo de Salida, exhibe una mejora del 5% con respecto al valor obtenido por el Controlador Difuso Tipo 1 y de un 44.2 % con relación al Controlador Proporcional-Integral.

Por lo anterior, se concluye que el desempeño de un Controlador Difuso Tipo 2, bajo los parámetros de prueba mencionados y en los casos de estudio presentados, es superior que el obtenido por los otros controladores, con un incremento en el costo computacional relativamente pequeño.

DICTAMEN			
CUMPLE CON CRÉDITOS ACADÉMICOS:	(Χ	.)
CONGRUENCIAS CON LAS LGAC DEL PROGRAMA:	(X)
CONGRUENCIA CON LOS CUERPOS ACADÉMICOS:	(Χ)
CUMPLE CON LAS NORMAS OPERATIVAS:	(X)
CONINCIDENCIA DEL OBJETIVO CON EL REGISTRO:	(X)

Aguascalientes, Ags. a	20	de	septiembre	de	2013

FIRMAS

Dr. Hermilo Sánchez Cruz

CONSEJERO ACADÉMICO DEL ÁREA

Dr. Hugo Rodriguez Ordóñez

SECRETARIO TECNICO DEL POSGRADO

Dr. Juan Jaur gui Rincón SECRETARIO DE NVESTIGACIÓN Y PO GRADO

recibi copia
23/ Sept / 2013

23 SET. 2013 ENTRO DE CIENCIAS A BASICAS

Código: FO-040200-23 Revisión: 00 Emisión: 21/02/11

Agradecimientos

A través de estas líneas quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que en diferentes formas han contribuido en el desarrollo y conclusión de este trabajo:

- A *Iris*, que siempre me ha apoyado en todo momento de forma incondicional.
- A mi familia, que a través de sus enseñanzas me han convertido en el ser humano que soy.
- A Edgar López Delgadillo y a Juan Antonio Zacarías Mena, por sus invaluables conocimientos y ayuda.
- A mis asesores Luis Enrique Arámbula Miranda, Luis Alejandro Flores Oropeza, y Ángel Eduardo Muñoz Zavala, por su acertada guía y apoyo.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, que a través de su Programa
 Nacional de Posgrados de Calidad me apoyó con un financiamiento para mis estudios.



TESIS TESIS TESIS TESIS

Dedicatoria



Índice general

1.	Intro	oducción	15
	1.1.	Conceptos Preliminares	15
	1.2.	Estado del Arte	15
	1.3.	Preguntas de Investigación	18
	1.4.	Objetivos	18
		1.4.1. Objetivo General	18
		1.4.2. Objetivos Particulares	18
	1.5.	Lineamientos	19
2.	Lág	ica Difusa	21
۷.	2.1.		21
	2.1.	Introducción	
	2.2.		
		2.2.1. Conceptos Básicos	
		2.2.2. Operaciones entre Conjuntos Difusos	
		2.2.3. Funciones de Membresía	
	2.3.	Razonamiento Difuso y Reglas Difusas	30
		2.3.1. Relaciones Clásicas (duras)	30
		2.3.2. Relaciones Difusas	31
		2.3.3. Reglas Difusas	32
	2.4.	Sistemas de Inferencia Difusos	35
		2.4.1. Sistema de Inferencia Difuso Mamdani	35
		2.4.2. Sistema de Inferencia Difuso Sugeno	37
		2.4.3. Sistema de Inferencia Difuso Tsukamoto	38
	2.5.	Modelado Difuso	39
3	Lóσi	ca Difusa Tipo 2	41
٥.	_	Introducción	41
	\mathcal{L}_{11} .	introduction	т 1

TESIS TESIS TESIS TESIS

Índice general

	3.2.	Conce	ptos Básicos	42
		3.2.1.	Conjuntos Difusos Tipo 2	42
		3.2.2.	Operaciones de Conjuntos Difusos Tipo 2	46
	3.3.	Sistem	as Difusos Tipo 2	50
		3.3.1.	Modelos de Sistemas Difusos Tipo 2	52
4.	Con	trol Di	fuso	55
	4.1.	Sistem	as de Control	55
		4.1.1.	Introducción	55
		4.1.2.	Criterios de Desempeño y Restricciones de Diseño	56
		4.1.3.	Técnicas de Control	57
	4.2.	Contro	oladores Difusos	58
		4.2.1.	Controladores Difusos Convencionales (Tipo 1)	59
		4.2.2.	Controladores Difusos Tipo 2	61
		4.2.3.	Método Alternativo para la Implementación de Controladores Difu-	
			sos Tipo 2	61
5.			ación de Controlado <mark>res Difu</mark> so <mark>s para C</mark> onvertidores DC/DC.	65
	5.1.		rtidor DC/DC	65
		5.1.1.	Funciones de un Convertidor DC/DC	65
		5.1.2.	Modelo Matemático y Topología del Convertidor DC/DC Buck	66
	5.2.		olador Difuso Tipo 1 (Conven <mark>cional)</mark>	
		5.2.1.	Fuzzificación	
		5.2.2.	Base de Reglas o de Conocimiento	
			Motor de Inferencia Difusa	72
	~ ^	5.2.4.		74 7.5
	5.3.		olador Difuso Tipo 2	75
		5.3.1.	1 1	7.5
		5 2 2	Membresía Tipo 1	75 75
		5.3.2.	Reemplazo del Sistema de Inferencia Tipo 2	77
		5.3.3.	Sustitución de Reductor de Tipo y Defuzzificador	78
6.	Resi	ıltados		79
	6.1.	Diagra	ma General del Sistema	80
		6.1.1.	Convertidor DC/DC	80
		6.1.2.	Controlador	80

Índice general

		6.1.3.	Señal de error en el voltaje de salida $e(k)$	80
		6.1.4.	Derivador Numérico (d/dt), señal <i>ce</i> (<i>k</i>)	81
		6.1.5.	Forma de Onda de Referencia $u(k)$	81
		6.1.6.	Bloque de Comparación con Rampa (V_{RAMP})	8
	6.2.	Caso N	Tominal (Sin Variaciones)	82
	6.3.	Caso co	on Variaciones en Carga (100 a 50 Ω)	86
	6.4.	Caso co	on Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts)	89
7.	Cond	clusion	es y Trabajo Futuro	95
	7.1.	Conclu	siones	95
	7.2.	Trabajo	Futuro	96





TESIS TESIS TESIS TESIS

Índice de tablas

5.2.1.Reglas Difusas de Control (Base de Conocimiento) para el Convertidor 7	1
5.2.2. Base de Conocimiento en forma numérica para el Control del Convertidor	71
5.2.3.Matriz de Reglas Difusas mostrando Grados de Membresía para	
$e = -0.8 \text{ y } ce = 0.2. \dots 7$	73
5.2.4. Matriz de Reglas Difusas Activadas	13
5.2.5. Valor de Salida Inferido para cada Regla Difusa Activada	74
5.3.1.Base de Conocimiento del Controlador Difuso Tipo 1 Superior	77
5.3.2.Base de Conocimiento del Controlador Difuso Tipo 1 Inferior	77
6.1.1. Parámetros del Convertidor	30
6.2.1.Resultados de Simulaciones en el Caso Nominal	33
6.3.1.Resultados de Simulaciones en el Caso con Variaciones de Carga 8	37
6.4.1.Resultados de Simulaciones en el Caso con Variaciones de Voltaje de Ali-	
mentación)1



TESIS TESIS TESIS TESIS

Índice de figuras

1.2.1. Esquema de Control Difuso Tipo 2 propuesto por Atacak et al y por Lin et al.	17
2.2.1. Operaciones entre los Conjuntos Difusos A y B	25
2.2.2.Función de Membresía: a) Triangular b) Trapezoidal	27
2.2.3. Función de Membresía: a) Gaussiana b) Campana Generalizada	28
2.2.4.Funciones de Membresía Sigmoidales	29
2.2.5. Función de Membresía Singleton	29
2.4.1. Sistema de Inferencia Difuso de Mamdani	35
2.4.2. Métodos de Defuzzificación en sistemas Mamdani	36
2.4.3. Modelo Difuso Sugeno	37
2.4.4. Modelo difuso Tsukamoto	39
3.2.1. Conjunto Difuso Tipo 2 construido mediante la variación de:	
	43
3.2.2.Conjunto Difuso Tipo 2 cuyo Grado de Membresía para cada punto del	
dominio es un Conjunto Difuso Gaussiano Tipo 1	44
3.2.3. Conjunto Difuso Tipo 2 Gaussiano en 3D	45
3.2.4. Huella de Incertidumbre de un Conjunto Difuso Tipo 2 Gaussiano	46
3.2.5. Funciones de Membresía Superior e Inferior	46
3.2.6. Conjuntos Difusos Tipo 2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2	47
3.2.7. Unión entre los Conjuntos Difusos Tipo 2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2	48
3.2.8. Intersección entre los Conjuntos Difusos Tipo 2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2	48
3.3.1. Sistema Difuso Tipo 2	51
3.3.2. Sistema Difuso Tipo 2 visto como una colección de Sistemas Difusos Tipo 1	
Embebidos	53
4.1.1. Sistema de Control Básico	56
4.2.1. Controlador Difuso embebido en un Sistema de Control en Lazo Cerrado	58
4.2.2. Ejemplo de un Sistema de Control Difuso con variables de entrada $e(t)$ y $\Delta e(t)$.	59

Índice de figuras

4.2.3. Estructura de un Controlador Difuso Convencional (Tipo 1)	60
4.2.4. Estructura de un Controlador Difuso Tipo 2	60
4.2.5. Sustitución de Funciones de Membresía Tipo 2 por Funciones Tipo 1	62
5.1.1.Diagrama Ilustrativo de un Convertidor de DC/DC	66
5.1.2.Convertidor de DC/DC Buck	67
5.2.1.Conjuntos Difusos definidos para las variables de entrada <i>e</i> y <i>ce</i>	68
5.2.2. Conjuntos Difusos definidos para la variable de salida Δu_{fc}	68
5.2.3. Esquema ilustrativo del proceso de fuzzificación	69
5.2.4. Evaluación de los valores de entrada para la obtención del Grado de Mem-	
bresía	69
5.3.1. Huella de Incertidumbre de los Conjuntos Difusos Tipo 2	75
5.3.2. Funciones de Membresía Superiores e Inferiores	76
5.3.3. Conjuntos Difusos Tipo 2 de Salida Singletons	76
5.3.4. Proceso de reemplazo de Etapas de Reducción de Tipo y de Defuzzificación.	78
6.0.1.Esquema General del Sistema a Simular	79
6.2.1. Diagrama de Bloques de las Simulaciones del Caso Nominal	82
6.2.2.Caso Nominal. Gráfica 1	83
6.2.3. Caso Nominal. Gráfica 2	84
6.2.4.Caso Nominal. Gráfica 3	84
6.2.5. Diagrama de Bloques en <i>Simulink</i> . Caso Nominal	85
6.3.1. Diagrama de Bloques de las Simulaciones del Caso con Variación de Carga	86
6.3.2.Caso con Variación de Carga (100 a 50 Ohms). Gráfica 1	87
6.3.3.Caso con Variación de Carga (100 a 50 Ohms). Gráfica 2	88
6.3.4.Caso con Variación de Carga (100 a 50 Ohms). Gráfica 3	88
6.3.5.Caso con Variación de Carga (100 a 50 Ohms). Gráfica 4	89
6.4.1. Diagrama de Bloques en Simulink. Caso Variación de Carga	90
6.4.2. Diagrama de Bloques de las Simulaciones del Caso con Variación de Voltaje	
de Alimentación.	91
6.4.3. Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts). Gráfica 1	92
6.4.4.Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts). Gráfica 2	92
6.4.5.Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts). Gráfica 3	93
6.4.6.Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts). Gráfica 4	93
6.4.7. Diagrama de Bloques en Simulink. Caso Variación de Voltaje de Alimentación.	94

Nomenclatura

AC Altern Current, Corriente Alterna

C Capacitor, Condensador

CD/CD Current Direct - Current Direct, Corriente Directa - Corriente- Directa

CMOS Complementary MOS, MOS Complementario

CPLD Complex Programmable Logic Device, Dispositivo de Lógica Programable Com-

plejo

DSP Digital Signal Processor, Procesador Digital de Señales

FOU Footprint of Uncertainty, Huella de Incertidumbre

FPGA Field Programmable Gate Array, Arreglo de Compuertas de Campo Programable

FS Frecuency Sample, Frecuencia de Muestreo

L Inductor, Inductor

LQG Linear Quadratic Gaussian, Lineal Cuadrático Gaussiano

MF Membership Fuction, Función de Membresía

MISO Multiple Input Single Output, Multiples Entradas Única Salida

MOS Metal-Oxide Semiconductor, Semiconductor de Óxido Metálico

NB Negative Big, Negativo Grande

NS Negative Small, Negativo Pequeño

PB Positive Big, Positivo Grande

PI Proportional Integral, Proporcional Integral

SIS TESIS TESIS TESIS TE

PID Proportional Integral Derivative, Proporcional Integral Derivativo

PS Positive Small, Positivo Pequeño

PWM Pulse Width Modulation, Modulación por Ancho de Pulso

RL Resistence Load, Resistencia de Carga

T1FL Type 1 Fuzzy Logic, Lógica Difusa Tipo 1

T1FLC Type 1 Fuzzy Logic Controller, Controlador Difuso Tipo 1

T1FLS Type 1 Fuzzy Logic Sistem, Sistema Difuso Tipo 1

T2FL Type 2 Fuzzy Logic, Lógica Difusa Tipo 2

T2FLC Type 2 Fuzzy Logic Controller, Controllador Difuso Tipo 2

T2FLS Type 2 Fuzzy Logic Sistem, Sistema Difuso Tipo 2

TSK Takagi-Sugeno-Kang

VIN Voltage Input, Voltaje de Entrada

VRAMP Voltage Ramp, Voltaje de Rampa

VREF Voltage Reference, Voltaje de Referencia

Z Zero, Cero

Resumen.

En este trabajo se presenta el diseño, implementación, simulación y comparación de desempeño de un Controlador Difuso Tipo 2 (T2FLC), de un Controlador Difuso Tipo 1 (T1FLC) y de un Controlador Proporcional-Integral (PI) al ser aplicados en Convertidores de DC/DC, en particular se ha estudiado su empleo en un Convertidor Buck (reductor).

Los Controladores desarrollados tienen como variables de entrada al Error en el Voltaje de Alimentación e y a su derivada ce. La variable de salida de ambos Controladores es el Cambio en la Forma de Onda de Referencia Δu_{fc} que determina el ciclo de trabajo del convertidor. Los parámetros de prueba empleados son el Voltaje de Salida Promedio, el Error en Estado Estable y el Voltaje de Rizo de Salida.

La implementación de los Controladores es llevada a cabo usando un esquema meramente computacional en el entorno de desarrollo *Matlab*. Su simulación se realiza en la herramienta *Simulink* del mismo entorno de desarrollo.

Según los experimentos realizados, cuando no hay variaciones en los parámetros del convertidor (Caso Nominal), el Controlador Difuso Tipo 2 presenta una reducción del 10.9% del valor del Error en Estado Estable obtenido por el Controlador Difuso Convencional y una disminución del 18.7% con relación al valor alcanzado por Controlador Proporcional-Integral. Es decir, el Controlador Difuso Tipo 2 se acerca más al valor del Voltaje Promedio de Salida deseado (10 volts). Con respecto al Voltaje de Rizo de Salida, el Controlador Difuso Tipo 2 redujo en un 9.42% el nivel obtenido por el Controlador Difuso Convencional y en un 53.2% el valor conseguido por el Controlador Proporcional-Integral. Es decir, el valor del Voltaje de Rizo de Salida conseguido al aplicar un Controlador Difuso Tipo 2 es más cercano a su valor ideal (0 volts).

Cuando se presenta una Variación en la Resistencia de Carga R_L de 100 a 50 Ohms, el Controlador Difuso Tipo 2 reduce en un 95.7% el valor del Error en Estado Estable alcanzado por el Controlador Difuso Tipo 1, y en un 98.6% el valor conseguido por el Controlador Proporcional-Integral. Al analizar los resultados obtenidos bajo el parámetro de Voltaje de Rizo de Salida, el Controlador Difuso Tipo 2 obtiene un valor de 0.047 volts, en cambio Controlador Difuso Tipo 1 alcanza un valor de 0.0572 volts y el Controlador Proporcional-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESI

Integral consigue un valor de 0.111 volts.

Finalmente al variar el Voltaje de Alimentación V_{IN} de 24 a 20 volts, el Controlador Difuso Tipo 2 reduce el valor del Error en Estado Estable del Controlador Difuso Convencional en un 68.2 % y en un 93.5 % el valor obtenido por el controlador PI. De igual manera el Controlador Difuso Tipo 2 bajo el parámetro de Voltaje de Rizo de Salida, exhibe una mejora del 5 % con respecto al valor obtenido por el Controlador Difuso Tipo 1 y de un 44.2 % con relación al Controlador Proporcional-Integral.

Por lo anterior, se concluye que el desempeño de un Controlador Difuso Tipo 2, bajo los parámetros de prueba mencionados y en los casos de estudio presentados, es *superior* que el obtenido por los otros controladores, con un incremento en el costo computacional relativamente pequeño.



Abstract.

In this document it is presented the design, implementation, simulation and performance comparison on Type 2 Fuzzy Logic Controller (T2FLC), Type 1 Fuzzy Logic Controller (T1FLC) and a conventional Proportional-Integral (PI) Controller, specifically used on a Buck Converter.

The controllers have the voltage error e, and it derivative ce as input variables. The output variable Δu_{fc} is the change in the waveform, responsible of the converter duty cycle. The test parameters are the average output voltage, the steady state error and the ripple output voltage.

The controllers were developed using computer simulation in the *Matlab* environment. The simulations were tested using the *Simulink* tool.

According to our experiments, when the converter is in nominal case, *i. e.* no internal parameter variation, the T2FLC shows a 10.9% reduction on the steady-state error compared to a T1FLC. When compared to a PI Controller the reduction is 18.7%. In other words, the T2FLC is closer than the others to the desired 10 volts output. Regarding the ripple output voltage, the T2FLC showed a 9.42% reduction compared to the T1FLC and a 53.2% reduction when compared to the PI Controller.

When the Load Resistance R_L is switched from 100 to 50 Ohms the T2FLC could reduce in 95.7% the steady-state error compared to T1FLC and in 98.6% compared to the PI controller. When analyzing the ripple output voltage, the T2FLC output has 0.047 volts value, the T1FLC has 0.057 Volts and the PI controller has 0.111 Volts.

Finally, when varying the Input Voltage V_{IN} from 24 a 20 Volts, the T2FLC reduces the steady state error in 68.2% compared to the T1FLC and in 93.5% when compared to the PI Controller. It was also observed that the tripple output voltage is 5% better than the one produced with a T1FLC and 44.2% better than the one produced with a PI Controller.

Due to these findings, we can conclude that the T2FLC's performance under the test parameters described below and in the conditions mentioned is better than T2FLC and PI Controller with a relatively small increase in computational cost.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



TESIS TESIS TESIS TESIS

Introducción

1.1. Conceptos Preliminares

Los convertidores de DC/DC son sistemas electrónicos de potencia que transforman un nivel de voltaje en su entrada a otro nivel en su salida, mediante conmutaciones de dispositivos de estado sólido. Son empleados en una gran variedad de aplicaciones como son: fuentes de poder para computadoras personales y portátiles, adaptadores de dispositivos electrónicos de consumo, sistemas de potencia aeroespaciales, entre otros [1, 2, 3].

La importancia del estudio de los convertidores de DC/DC, radica en su naturaleza no lineal y en el hecho de que su operación práctica, dista mucho de su predicción teórica debido a problemas asociados a resistencias y capacitancias parásitas e inductancias de fuga de sus componentes [4]. Por lo anterior, es complicado el diseño de un controlador adecuado para este tipo de convertidores.

Un esquema de control aplicado a un convertidor de DC/DC debe asegurar la estabilidad del sistema bajo condiciones arbitrarias de operación, con una respuesta idónea en términos de la reducción de la sensibilidad a variaciones de carga, a cambios en el voltaje de entrada e incluso a incertidumbres asociadas a sus parámetros de diseño; además de proporcionar una respuesta transitoria rápida.

Dos aspectos importantes a tomar en consideración para mejorar la eficiencia de los convertidores de DC/DC son la elección tanto del método de control, como del modo de retroalimentación aplicado. Existen tres modos básicos de retroalimentación en los convertidores de DC/DC: modo de control por voltaje, modo de control por corriente y modo de control por voltaje "feedforward" [5].

1.2. Estado del Arte

Numerosas técnicas de control han sido aplicados en los convertidores de DC/DC. Métodos analógicos basados en el dominio de la frecuencia son predominantemente usados en el diseño del controlador, éstos se fundamentan esencialmente en un modelo lineal de pequeña

1 Introducción

señal del sistema concerniente [6]. El desempeño del controlador es usualmente sacrificado por la simplicidad del modelo de pequeña señal, ya que tiene una validez restringida sobreto-do en sistemas fuertemente no lineales. Por ejemplo, en un controlador PID es esencial una sintonización apropiada para que cualquier cambio en las condiciones de operación no se refleje en la salida del sistema, sin embargo es común que al modificarse algún parámetro la eficacia se vea reducida [7].

Existen varios enfoques alternativos a la estructura convencional del control lineal. Algunos se basan en el desarrollo de modelos no lineales más precisos, en los cuales se fundamenta el diseño de un controlador de muy alto desempeño [8]. La problemática sobre este enfoque, es que emergen a menudo deducciones matemáticas complejas, las cuales desembocan en algoritmos de control muy complicados que no son aptos para una implementación práctica [9, 10, 11]. Otra alternativa aplicada ampliamente es el control por modo deslizante, el cual, de igual forma al enfoque presentado previamente, necesita el modelo del sistema para su diseño y ejecución. El principal problema que surge comúnmente en este tipo de control es el "chattering" [4].

Una opción innovadora en el control de procesos es emplear un razonamiento heurístico basado en la experiencia de un experto en el sistema. Esta experiencia usualmente es recogida en forma de declaraciones y reglas lingüísticas. En este caso, no es necesario establecer un modelo, sino que todo el diseño del controlador se reduce a la "conversión" de un conjunto de reglas lingüísticas dentro de un algoritmo de control automático. La lógica difusa proporciona este mecanismo de conversión necesario para el diseño del controlador [7, 9].

El control difuso es una de las aplicaciones con más éxito de la teoría de conjuntos difusos de Zadeh [12, 13, 14] ya que ha probado ser una herramienta útil en el control de procesos industriales en tiempo real, en los cuales es difícil obtener el modelo matemático del sistema [15]. Sin embargo, el desempeño y diseño de un controlador difuso dependen de la experiencia y conocimiento de expertos, es decir, se aplica un proceso de prueba y error para ajustar los parámetros de la base de reglas y los conjuntos de membresía. Esto implica que estos parámetros pueden cambiar de un experto a otro, por lo que la eficiencia del controlador puede ser afectada. En un controlador difuso convencional (también llamado controlador difuso tipo 1 (T1FLC)) no es posible hacer frente a la incertidumbre asociada a los parámetros del controlador, por lo cual es necesario aplicar un control difuso basado en la lógica difusa tipo 2. Zadeh desarrolló la teoría de sistemas difusos tipo 2 (T2FL) y superiores para eliminar la paradoja de que los límites de las funciones de membresía de un sistema difuso tipo 1 eran en sí mismos números reales, es decir, valores duros, lo cual conlleva la incapacidad de manejar la incertidumbre asociada a estos parámetros. Es decir los límites de las funciones de

ESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

membresía en sistemas difusos tipo 2 son, en sí, conjuntos difusos tipo 1 [4, 16, 17, 18].

La aplicación del control difuso convencional (T1FLC), en convertidores de DC/DC, ha sido ampliamente estudiada ([6, 7, 9, 10, 11]); logrando un desempeño adecuado a variaciones en la carga y/o en el voltaje de alimentación del convertidor. En cambio, el control difuso tipo 2 (T2FLC) no ha sido desarrollado de la misma manera, por lo que existen pocos trabajos referentes al tema. Atacak *et al* [4] y Lin *et al* [18] han aplicado el control difuso tipo 2 (T2FLC) en convertidores de DC/DC y han comparado su desempeño con respecto a un control difuso tipo 1 (T1FLC).

Atacak *et al*, en [4], propone el esquema de control difuso tipo 2 (T2FLC) que se presenta en la Figura 1.2.1. Este esquema se aplica tanto, en un convertidor Buck, como en convertidor Boost, bajo variaciones en la carga y en el voltaje de alimentación. Además compara su desempeño con el de controlador difuso tipo 1 (T1FLC) y con un control PI convencional. Los resultados indican un mejor desempeño del controlador difuso tipo 2 (T2FLC) con respecto a los otros controladores. Los criterios de desempeño usados, fueron: el tiempo de establecimiento, el sobretiro, el error en estado-estable y la respuesta transitoria del convertidor bajo variaciones en la carga y del voltaje de alimentación.

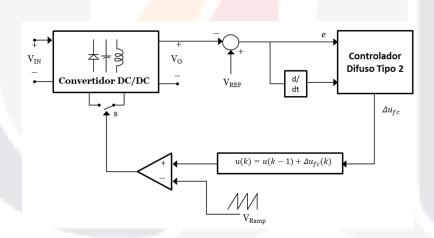


Figura 1.2.1: Esquema de Control Difuso Tipo 2 propuesto por Atacak *et al* y por Lin *et al.* (Modificado de "A type-2 fuzzy logic controller design for buck and boost dc/dc converters" y de "Type-2 fuzzy logic controller design for buck dc-dc converters").

Lin *et al* en [18], proponen un esquema de control difuso tipo 2 (T2FLC) (ver Figura 1.2.1), aplicado solamente a un convertidor Buck. Estiman el desempeño de este control y lo comparan con el alcanzado al emplear un control difuso convencional (T1FLC). Los criterios de desempeño evaluados son: el tiempo de establecimiento, el sobretiro, el error en estadoestable y la respuesta transitoria del convertidor bajo variaciones en la carga y del voltaje de

resis tesis tesis tesis tesis

1 Introducción

alimentación; es decir, los mismos que utilizaron Atacak *et al*. De forma análoga, Lin *et al*, obtiene una mejor respuesta del controlador difuso tipo 2(T2FLC), que la conseguida con el controlador difuso tipo 1 (T1FLC).

1.3. Preguntas de Investigación

Una vez revisados los Conceptos Preliminares y el Estado de Arte de los controladores difusos aplicados en convertidores de DC/DC, surgen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿El desempeño de un controlador difuso tipo 2 aplicado a un convertidor de DC/DC en los casos nominal, con variación en la Resistencia de Carga R_L y con variación en el Voltaje de Alimentación V_{IN} , es superior que el obtenido por un controlador difuso tipo 1; usando como parámetros de prueba al Voltaje de Salida Promedio, al Error en Estado Estable y al Voltaje de Rizo de Salida?
- ¿Qué ventajas tiene la aplicación de controladores difusos en convertidores de DC/DC, en comparación con las técnicas de control convencionales?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

■ Implementar controladores difusos tipo 1 y tipo 2 para evaluar y comparar su desempeño, al ser aplicados en convertidores de DC/DC.

1.4.2. Objetivos Particulares

- Implementar en herramientas computacionales, controladores difusos tipo 1 y tipo 2.
- Realizar la simulación de controladores anteriores aplicados en un convertidor de DC/DC Buck.
- Comparar los resultados de estas simulaciones, para verificar el desempeño de los controladores propuestos.

1.5 Lineamientos

1.5. Lineamientos

Esta tesis se divide en ocho capítulos. En el capítulo 2, se presenta una introducción a la teoría básica de los Conjuntos y Sistemas difusos. El capítulo 3 describe los conceptos fundamentales de la Lógica Difusa tipo 2. En el capítulo 4 se detalla el uso de la Lógica Difusa tipo 1 y tipo 2, en el desarrollo de esquemas de control. Un panorama general de los modelos y topologías de convertidores de DC/DC, es presentado en el capítulo 5. Los métodos y procedimientos empleados para implementar controladores difusos aplicados en convertidores de DC/DC, son desarrollados en el capítulo 6. En el capítulo 7 se analiza el desempeño de los controladores difusos tanto tipo 1 como tipo 2 aplicados en el control de un convertidor de DC/DC Buck; y finalmente, en el capítulo 8 se concentra las conclusiones y el trabajo futuro.





TESIS TESIS TESIS TESIS

2 Lógica Difusa

2.1. Introducción

El contenido de este capítulo se basa en los temas presentados por Castillo *et al* en [19], por Ross en [20] y por Jyh-Shing et al en [21]. Tiene como objetivo dar una introducción a los conceptos básicos, notación y operaciones básicas de la Lógica Difusa; la definición de variables y valores lingüísticos y su empleo en las reglas difusas.

Un "Sistema de Inferencia Difuso" o simplemente un "Sistema Difuso", es una estructura computacional basada en los conceptos de Conjuntos, Reglas y Razonamiento propuestos por Zadeh en [12, 22]. Estos sistemas se han aplicado de forma exitosa en numerosos campos del conocimiento como son el control automático, la clasificación de datos, el análisis de decisiones, los sistemas expertos, la predicción de series de tiempo, la robótica, el reconocimiento de patrones, etc.

La estructura básica de un Sistema de Inferencia Difuso consiste de tres componentes: una "base de reglas", la cual contiene una selección de reglas difusas; una "base de datos o diccionario", que define las funciones de membresía usadas en las reglas difusas; y un "mecanismo de razonamiento o motor de inferencia", el cual realiza el proceso de inferencia empleando las reglas y los datos dados para generar una salida o una conclusión. En forma general, un Sistema de Inferencia Difuso implementa un mapeo no lineal del espacio de entrada del sistema, al espacio de salida del mismo. Este mapeo es llevado a cabo por un número de reglas if-then difusas, cada una de la cuales describe el comportamiento local del mapeo. Es decir, el antecedente de una regla define una región difusa del espacio de entrada, mientras que el consecuente especifica el espacio de salida en una región difusa.

2.2. Teoría de Conjuntos Difusos

2.2.1. Conceptos Básicos

Sea X un espacio de objetos y x un elemento genérico de X. Un conjunto clásico A (A \subseteq X), se define mediante una colección de elementos $x \in X$, de modo que cada x puede pertenecer o no al conjunto A. Mediante una "función característica" para cada elemento de $x \in X$, se puede representar un conjunto clásico A, como un conjunto de pares ordenados (x,0) o (x,1), que indican si $x \notin A$ o $x \in A$, respectivamente.

En contraste, un conjunto difuso expresa el grado de pertenencia que tiene un elemento en un conjunto. Por tanto, en la función característica de estos conjuntos se tienen valores entre 0 y 1, que denotan el grado de membresía de un elemento en un conjunto dado.

Definición 2.2.1. Conjuntos Difusos y Funciones de Membresía.

Si X es una colección de objetos denotados genéricamente por x, entonces un "conjunto difuso" A en X está definido como un conjunto de pares ordenados:

$$A = \{ (x, \mu_{A}(x)) \mid x \in X \}$$
 (2.2.1)

donde $\mu_A(x)$ es llamada "función de membresía" (simplificando MF *Membership Function*) para el conjunto difuso A. La función de membresía mapea cada elemento de X, a un grado de membresía entre 0 y 1. Es claro que la definición de un conjunto difuso es una simple extensión de la definición de un conjunto clásico, en la cual, la función característica puede tomar cualquier valor entre 0 y 1. Si los valores de la función de membresía $\mu_A(x)$ son restringidos a 0 o 1, entonces el conjunto A es reducido a un conjunto clásico y $\mu_A(x)$ es la función característica de A.

Si X es continuo, entonces A se puede escribir de la siguiente forma:

$$A = \int \left(\frac{\mu_{A}(x)}{x}\right) \tag{2.2.2}$$

donde \int no implica una integración, sino una colección contínua de objetos y la barra horizontal no implica un cociente, sino un delimitador

Si el universo X, es discreto, entonces A se escribe como:

$$A = \sum \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \tag{2.2.3}$$

donde Σ no implica una sumatoria, sino una colección discreta de objetos.

2.2 Teoría de Conjuntos Difusos

Definición 2.2.2. Soporte.

El "soporte" de un conjunto difuso A es el conjunto de todos los puntos $x \in X$ tal que $\mu_A(x)>0$:

soporte(A) =
$$\{x \mid \mu_{A}(x) > 0\}$$
 (2.2.4)

Definición 2.2.3. Núcleo.

El núcleo de un conjunto difuso es el conjunto de todos los puntos x en X tal que $\mu_A(x)=1$:

$$núcleo(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 1\}$$
 (2.2.5)

Definición 2.2.4. Normalidad.

Un conjunto difuso es "normal" si su núcleo es no vacío. Es decir, siempre existe un punto $x \in X$, tal que $\mu_A(x)=1$.

Definición 2.2.5. Puntos de Cruce.

Un "punto de cruce" de un conjunto difuso A es un punto $x \in X$, en el cual $\mu_A(x)=0.5$

$$cruce(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 0.5\}$$
 (2.2.6)

Definición 2.2.6. Singleton Difuso.

Un conjunto difuso cuyo soporte es un punto único en X con $\mu_A(x)$ =1 es llamado "singleton difuso".

Definición 2.2.7. Corte α , Corte α fuerte.

El "corte α " o "conjunto nivel α " de un conjunto difuso A es un conjunto duro definido por

$$A_{\alpha} = \{x \mid \mu_{A}(x) \ge \alpha\}$$

El "corte α fuerte " o "conjunto nivel α fuerte " se define similarmente:

$$A'_{\alpha} = \{x \mid \mu_{A}(x) > \alpha\}$$
 (2.2.7)



2.2.2. Operaciones entre Conjuntos Difusos

De forma análoga a los conjuntos clásicos, los conjuntos difusos tienen definidas las operaciones de unión, intersección y complemento (ver Figura 2.2.1). Estas operaciones se enuncian a continuación, incluyendo el concepto de contención entre conjuntos difusos.

Definición 2.2.8. Contención.

El conjunto difuso A está "contenido" en el conjunto difuso B (A es subconjunto de B) si y sólo si $\mu_A(x) \le \mu_B(x)$ para toda x. Es decir:

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \le \mu_B(x)$$
 (2.2.8)

Definición 2.2.9. Unión.

La "unión" de dos conjuntos difusos A y B es el conjunto difuso C, denotado como $C = A \cup B$. La función de membresía del conjunto C se presenta a continuación:

$$\mu_{\rm C}(x) = \max(\mu_{\rm A}(x), \mu_{\rm B}(x)) = \mu_{\rm A}(x) \lor \mu_{\rm B}(x)$$
 (2.2.9)

Definición 2.2.10. Intersección.

La "intersección" de dos conjuntos difusos A y B es el conjunto difuso C, denotado como $C = A \cap B$. La función de membresía del conjunto C se denota como:

$$\mu_{\rm C}(x) = \min(\mu_{\rm A}(x), \mu_{\rm B}(x)) = \mu_{\rm A}(x) \wedge \mu_{\rm B}(x)$$
 (2.2.10)

Definición 2.2.11. Complemento o Negación.

El "complemento" de un conjunto difuso A, denotado \neg A, se define como:

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{2.2.11}$$

2.2 Teoría de Conjuntos Difusos

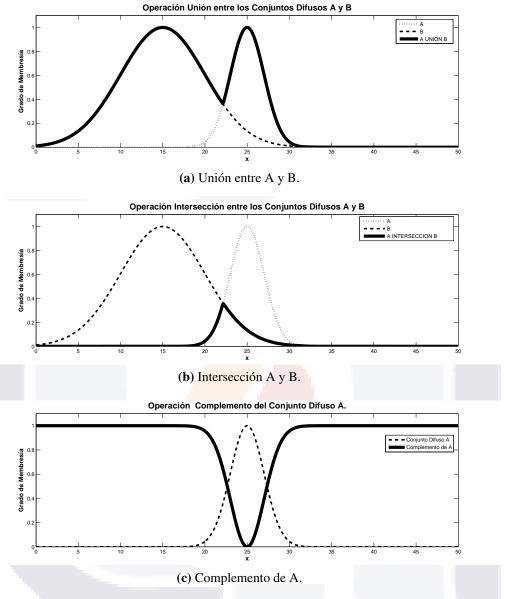


Figura 2.2.1: Operaciones entre los Conjuntos Difusos A y B.

Los conjuntos difusos tienen las mismas propiedades que los conjuntos clásicos: conmutatividad, asociatividad, distributividad, idempotencia, identidad y transitividad.

2.2.3. Funciones de Membresía

Un conjunto difuso se caracteriza mediante su función de membresía. Ya que la mayoría de los conjuntos difusos tienen como universo de discurso X a la recta real \mathbb{R} , es impráctico definir todos los pares ordenados existentes con el fin de determinar su función de membresía. Una manera conveniente y concisa de definir una función membresía es formulando una

2 Lógica Difusa

expresión matemática que la modele.

A continuación se presentan algunas formas de funciones de membresía de conjuntos difusos.

Definición 2.2.12. Funciones de Membresía Triangulares.

Una función de membresía triangular es definida mediante tres parámetros a, b y c (con a < b < c). Estos parámetros definen las vértices de la función de membresía triangular y x es el valor a evaluar en la membresía.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \le a \\ (x-a)/(b-a), & a \le x \le b \\ (c-x)/(c-b), & b \le x \le c \\ 0, & c \le x \end{cases}$$
 (2.2.12)

La Figura 2.2.2a, muestra una función de membresía triangular definida mediante los valores a=15, b=25 y c=35.

Definición 2.2.13. Funciones de Membresía Trapezoidales.

Una función de membresía trapezoidal es definida mediante los parámetros a, b, c y d (con a < b < c < d). Estos parámetros definen las vértices de la función de membresía trapezoidal y x es el valor a evaluar en la membresía.

$$\mu(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & x \le a \\ (x-a)/(b-a), & a \le x \le b \\ 1, & b \le x \le c \\ (d-x)/(d-c), & c \le x \le d \\ 0, & d \le x \end{cases}$$
 (2.2.13)

En la Figura 2.2.2b, muestra una función de membresía trapezoidal con a=15, b=25, c=35 y d=40.

Es muy simple convertir una función de membresía triangular en trapezoidal, sólo es necesario tomar el valor del vértice b de la función de membresía triangular (2.2.12) y asignarlo tanto para el valor del vértice b, como para el valor c de la función de membresía trapezoidal (2.2.13) [20]. Esto permite emplear combinaciones de funciones de membresía triangulares y trapezoidales aplicando el mismo procedimiento y/o función, en la evaluación del grado de membresía de los valores de entrada duros.

2.2 Teoría de Conjuntos Difusos

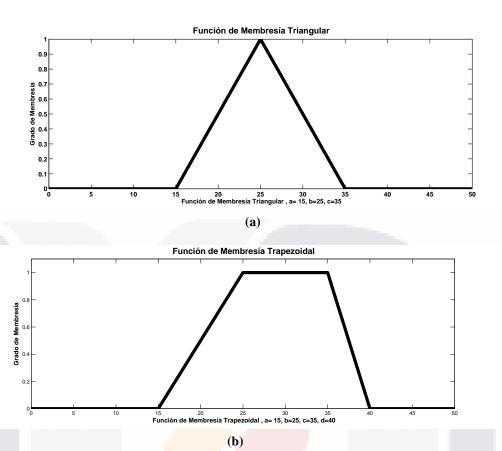


Figura 2.2.2: Función de Membresía: a) Triangular b) Trapezoidal.

Definición 2.2.14. Funciones de Membresía Gaussianas.

Una función de membresía gaussiana, es determinada por los parámetros c y σ . c representa el centro de la función de membresía y σ determina el ancho de la función. La expresión matemática que define una función de membresía gaussiana tiene la siguiente forma:

$$\mu(\mathbf{x}) = e^{-\left(\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{c})^2}{2\sigma^2}\right)}$$
 (2.2.14)

La Figura 2.2.3a, muestra una función de membresía gaussiana con c= 28 y σ = 2.

Definición 2.2.15. Funciones de Membresía de Campana Generalizada o de Cauchy.

Esta función de membresía es una generalización directa de la distribución de *Cauchy* usada en probabilidad, por lo que también es referida como función de membresía de Cauchy. Se define por medio de los parámetros *a*, *b* y *c*; y se representa mediante la siguiente expresión:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + (\frac{x - c}{a})^{2b}} \tag{2.2.15}$$

2 Lógica Difusa

Aunque las funciones de membresía gaussianas y de campana generalizada (2.2.3) tienen una gran fluidez, son incapaces de especificar funciones de membresía asimétricas, que son muy importantes en aplicaciones específicas.

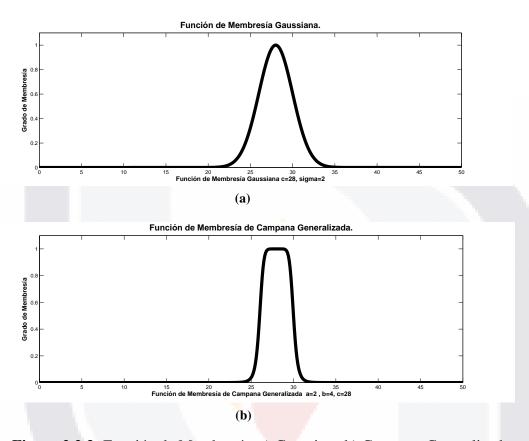


Figura 2.2.3: Función de Membresía: a) Gaussiana b) Campana Generalizada.

Definición 2.2.16. Funciones de Membresía Sigmoidales.

Una función de membresía sigmoidal es definida mediante la siguiente ecuación:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$
 (2.2.16)

donde a controla la inclinación del punto de cruce x=c.

Dependiendo del signo del parámetro *a*, una función de membresía sigmoidal abrirá a la izquierda o a la derecha, por tanto, es apropiada para representar valores como "muy grande" o "muy negativo". La Figura 2.2.4, muestra una función de membresía sigmoidal abierta por la izquierda o por la derecha.

2.2 Teoría de Conjuntos Difusos

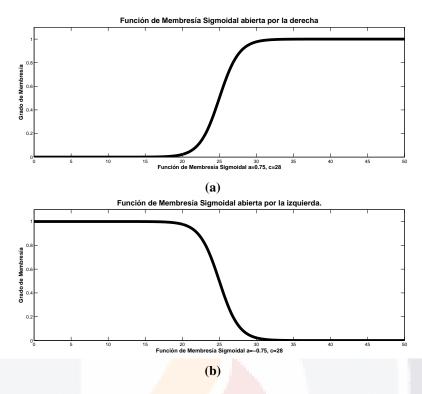


Figura 2.2.4: Funciones de Membresía Sigmoidales: a) Abierta por la derecha b) Abierta por la izquierda.

Definición 2.2.17. Funciones de Membresía Singletons Difusos.

Son funciones de membresía cuyo soporte es un punto único en X con $\mu_A(x)=1$ ó $\mu_A(x)=m$. Siendo m un valor duro particular.

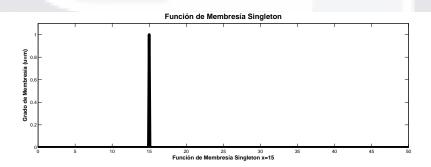


Figura 2.2.5: Función de Membresía Singleton.

Existen además una infinidad de funciones de membresía difusas, que pueden ser definidas a partir de las características de un problema particular.

2.3. Razonamiento Difuso y Reglas Difusas

2.3.1. Relaciones Clásicas (duras)

El producto cartesiano de dos universos de discurso X y Y se denota como

$$X \times Y = \{(x, y) \mid x \in X, y \in Y\}$$
 (2.3.1)

esta expresión genera un par ordenado para cada $x \in X$ con cada $y \in Y$, formando coincidencias sin restricciones entre X y Y. Es decir, cada elemento en el universo de discurso X está relacionado completamente con cada elemento del universo Y.

La fuerza de esta relación es medida mediante la función característica χ , donde un valor de '1' es asociado con una relación completa y un valor de '0' es asociado a ninguna relación, es decir:

$$\chi_{X\times Y} = \begin{cases} 1, & (x,y) \in X \times Y \\ 0, & (x,y) \notin X \times Y \end{cases}$$
 (2.3.2)

Cuando los universos de discurso o los conjuntos son finitos, la relación puede ser representada mediante un matriz. Una relación *n-ria* se puede representar mediante una matriz de relación *n*-dimensional.

Definición 2.3.1. Composición.

Sea *R* una relación que mapea los elementos del universo de discurso X al universo de discurso Y; y sea *S* una relación que mapea los elementos de Y al universo Z. Existe una relación *T* que mapea los elementos de X al universo Z. Esta relación se llama composición y se denota como:

$$T = R \circ S \tag{2.3.3}$$

Existen dos formas comunes de composición de relaciones: la composición *max-min* y la composición *max-punto*.

La composición *max-min* se define como:

$$\chi_T(x,z) = \bigvee_{y \in Y} (\chi_R(x,y)) \wedge (\chi_S(y,z))$$
 (2.3.4)

La composición *max-punto* se denota de la forma siguiente:

2.3 Razonamiento Difuso y Reglas Difusas

$$\chi_T(x,z) = \bigvee_{y \in Y} (\chi_R(x,y)) \bullet (\chi_S(y,z))$$
 (2.3.5)

en donde el operador \land representa la operación min y el operador \lor , representa la operación max.

2.3.2. Relaciones Difusas

$$A = \frac{\mu_{A}(x_{1})}{x_{1}} + \frac{\mu_{A}(x_{2})}{x_{2}} + \dots + \frac{\mu_{A}(x_{n})}{x_{n}}$$
(2.3.6)

El principio de extensión señala que la imagen de un conjunto difuso A bajo el mapeo f, puede ser expresada como el conjunto difuso B, definido como:

$$B = f(A) = \frac{\mu_A(x_1)}{y_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{y_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{y_n}$$
 (2.3.7)

es decir, el conjunto difuso B puede ser definido usando lo valores de f en $x_1, x_2, ..., x_n$. Si f es un mapeo de muchos a uno, entonces existen $x_1, x_2 \in X$, $x_1 \neq x_2$, tal que $f(x_1) = f(x_2) = y^*, y^* \in Y$. En este caso, el grado de membresía de B en $y = y^*$, es el máximo de los grados de membresía de A en $x = x_1 y x = x_2$, ya que $f(x) = y^*$ puede resultar de $x = x_1 o x = x_2$, es decir:

$$\mu_{\rm B}(y) = \max \mu_{\rm A}(x) \Rightarrow x = f^{-1}(y)$$
 (2.3.8)

Las relaciones binarias difusas son conjuntos difusos en $X \times Y$ que mapean cada uno sus elementos a un grado de membresía entre 0 y 1.

Definición 2.3.2. Relación Binaria Difusa.

Sea X y Y dos universos de discurso, entonces

$$R = \{ ((x,y), \mu_{\Re}(x,y)) \mid (x,y) \in X \times Y \}$$
 (2.3.9)

es una relación binaria difusa en X×Y.

2 Lógica Difusa

Las relaciones difusas en diferentes espacios-producto pueden ser combinadas mediante una operación composición. Existen diferentes tipos de estas operaciones (*max-min*, *max-max*, *min-min*, *max-promedio*, etc.,) pero la más usada es la composición *max-min*.

Definición 2.3.3. Composición max-min.

Sean R_1 y R_2 dos relaciones difusas definidas en X×Y y Y×Z respectivamente. La composición *max-min* de R_1 y R_2 es el conjunto difuso definido por:

$$R_1 \circ R_2 = \{ [(x, y), maxmin(\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(x, y))] \}$$
 (2.3.10)

Donde R_1 y R_2 son expresadas como matrices de relación.

2.3.3. Reglas Difusas

Zadeh en [12], señaló que las técnicas convencionales en el análisis de sistemas, son inadecuadas en el tratamiento de sistemas basados en el razonamiento humano, ya que su comportamiento es sumamente influenciado por el juicio, percepción y emociones del experto. Lo anterior recibe el nombre de "principio de incompatibilidad". De forma inversamente proporcional, al incrementarse la complejidad de un sistema, nuestra habilidad para hacer afirmaciones precisas y significativas sobre su comportamiento es limitada. Por esta razón, Zadeh propuso el concepto de variables lingüísticas como una alternativa para modelar el razonamiento humano.

Definición 2.3.4. Variables Lingüísticas.

Una variable lingüística es caracterizada mediante la quíntupla (x, T(x), X, G, M) en donde x es el nombre de la variable; T(x) es el conjunto de términos o valores lingüísticos; X es el universo de discurso; G es la regla de sintaxis que genera los términos en T(x); y M es una regla semántica que asocia cada valor lingüístico A con su correspondiente significado M(A), siendo M(A) un conjunto difuso en X.

Definición 2.3.5. Reglas Difusas Si-Entonces (*If-Then*).

Una regla difusa Si-Entonces (también conocida como regla difusa o implicación difusa) tiene la forma

$$\mathbf{si} x \text{ es A entonces } y \text{ es B}$$
 (2.3.11)

donde A y B son valores lingüísticos definidos mediante conjuntos difusos pertenecientes a los universos de discurso X y Y, respectivamente. A menudo la expresión "x es A", es llamada antecedente o premisa y la sentencia "y es B", se denomina consecuente o conclusión.

2.3 Razonamiento Difuso y Reglas Difusas

La expresión **si** x es A **entonces** y es B, denotada por A \rightarrow B, describe la relación difusa binaria R entre las variables x y y, en espacio $X \times Y$.

Existen dos maneras de interpretar la regla difusa $A \rightarrow B$; la primera se presenta al interpretarla como A "acoplada con" B, es decir:

$$R = A \rightarrow B = A \times B = \int_{x \times y} \mu_A(x) * \mu_B(x) / (x, y)$$
 (2.3.12)

donde * es un operador de intersección. Por otro lado, $A \to B$ se interpreta como A "implica" B, entonces se puede expresar de las siguientes dos formas:

$$R = A \to B = \neg A \cup B \tag{2.3.13}$$

$$R = A \to B = \neg A \cup (A \cap B) \tag{2.3.14}$$

Aunque parezcan diferentes estas dos expresiones, en realidad ambas se reducen a la identidad de la lógica proposicional $A \to B \equiv \neg A \cup B$.

El razonamiento difuso es un proceso de inferencia que genera conclusiones de un conjunto de reglas difusas y de datos conocidos. La regla básica de inferencia en la lógica tradicional es el "modus ponens", con el cual se puede inferir la verdad de una proposición B del valor de verdad de A y de la implicación $A \rightarrow B$. Este concepto se ilustra a continuación:

premisa 1 (dato): $x \in A$,

premisa 2 (regla): $\sin x \operatorname{es} A$ entonces $y \operatorname{es} B$,

consecuencia (conclusión): y es B

En el razonamiento humano, el "modus ponens" es empleado de una forma aproximada:

premisa 1 (dato): $x \in A'$,

premisa 2 (regla): $\sin x \operatorname{es} A \operatorname{entonces} y \operatorname{es} B$,

consecuencia (conclusión): y es B'

donde A' es próximo a A y B' es próximo a B.

Cuando A, B, A' y B' son conjuntos difusos, el procedimiento de inferencia anterior es llamado "razonamiento aproximado", "razonamiento difuso" o "modus ponens generalizado".

Definición 2.3.6. Razonamiento Difuso.

Sean A y A' conjuntos difusos de X, y B un conjunto difuso de Y. Suponiendo que la regla difusa $A \to B$ es expresada como una relación difusa R en $X \times Y$. Entonces el conjunto difuso

TESIS TESIS TESIS TESIS

2 Lógica Difusa

B inducido por "x es A" y la regla difusa "si x es A entonces y es B" es definida por

$$\mu_{B'}(y) = max_x min[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{\mathfrak{R}}(x,y)]$$

$$= V_{x}[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{\Re}(x, y)] \tag{2.3.15}$$

Cuando se tiene una regla difusa con un sólo antecedente, la ecuación anterior se puede simplificar de la siguiente manera:

$$\mu_{\mathrm{B}'}(x) = [\mathrm{V}_{\mathrm{X}}(\mu_{\mathrm{A}'}(x) \wedge \mu_{\mathrm{A}}(x))] \wedge \mu_{\mathrm{B}}(y)$$

$$= \boldsymbol{\omega} \wedge \boldsymbol{\mu}_{\mathrm{B}}(x)$$

es decir, se encuentra primero el grado de correspondencia ω , que es el máximo de $\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)$, entonces la función de membresía resultante B' es igual a la función de membresía de B limitada por ω , que representa la medición del grado de cumplimiento para el antecedente de una regla. Esta medida se propaga por las reglas difusas y el grado resultante de cumplimiento o función de membresía del consecuente debe ser más pequeño que ω .

El proceso de razonamiento difuso en general puede ser dividido en 4 pasos:

- 1. **Grados de Compatibilidad**. Se comparan los datos conocidos con los antecedentes de las reglas difusas para encontrar los grados de compatibilidad con respecto a cada función de membresía del antecedente.
- 2. Fuerza de Activación (*Firing Strength*). Se combinan los grados de compatibilidad con respecto a las funciones de membresía de los antecedentes en cada regla usando las operaciones difusas de Intersección (AND) y Unión (OR) para generar la fuerza de activación, la cual indica el grado en que se cumple el antecedente de cada regla.
- 3. **Función de Membresía del Consecuente Acotada**. Se aplica la fuerza de activación a la función de membresía del consecuente de una regla difusa para generar una función de membresía del consecuente acotada.
- 4. Función de Membresía Total de Salida (Agregación). Se acumula todas las funciones de membresía acotadas para obtener una función de membresía total de salida.

2.4 Sistemas de Inferencia Difusos

2.4. Sistemas de Inferencia Difusos

Existen numerosos tipos de sistemas de inferencia difusos, los cuales difieren principalmente en la forma de los consecuentes de sus reglas reglas difusas y en sus procedimientos de agrupamiento (agregación) y de defuzzificación.

2.4.1. Sistema de Inferencia Difuso Mamdani

Este sistema propuesto por Mamdani *et a*l en 1975 [23, 24], fue aplicado en un principio para el control de un sistema de vapor. Este control se basaba en reglas lingüísticas adquiridas de operarios experimentados. La Figura 2.4.1, muestra el proceso de cómo un sistema de inferencia difuso Mamdani genera una salida total, tomando dos valores de entrada x y y.

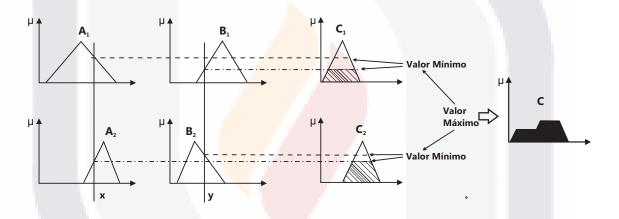


Figura 2.4.1: Sistema de Inferencia Difuso de Mamdani con operadores min y max.

Defuzzificación.

El término de defuzzificación, se refiere a la manera en que un valor numérico representativo es extraído de un conjunto difuso. En general existen varios métodos para implementar la defuzzificación de un conjunto difuso A de un universo de discurso Z. Usualmente este conjunto, se representa mediante una función de membresía agrupada. A continuación se presentan de forma breve cada método de defuzzificación.

Centroide (centro de área o centro de gravedad) z_{coa} :

$$z_{\text{coa}} = \frac{\int_{Z} \mu_{\text{A}}(z)z dz}{\int_{Z} \mu_{\text{A}}(z) dz}$$
 (2.4.1)

2 Lógica Difusa

donde el símbolo \int implica una integración algebraica y $\mu_A(z)$ es la función de membresía de salida agrupada.

Bisector de área z_{boa} : El bisector de área satisface la siguiente expresión:

$$\int_{\alpha}^{z_{\text{boa}}} \mu_{A}(z) dz = \int_{z_{\text{boa}}}^{\beta} \mu_{A}(z) dz$$
 (2.4.2)

donde $\alpha = \min\{z \mid z \in Z\}$ y $\beta = \max\{z \mid z \in Z\}$.

Media de los máximos z_{mom} : Es el promedio de los valores z en los cuales la función de membresía alcanza un máximo $\mu*$, es decir

$$z_{mom} = \frac{\int_{z'} z dz}{\int_{z'} dz}$$
 (2.4.3)

donde $z' = \{z \mid \mu_A(z) = \mu *\}$. En particular, si $\mu_A(z)$ tiene un sólo valor z máximo en z = z *, entonces $z_{mom} = z$. Por otro lado si $\mu_A(z)$ alcanza su máximo en cualquier valor de z dentro del intervalo $[z_{izq}, z_{der}]$, entonces

$$z_{mom} = \frac{[z_{izq}, z_{der}]}{2} \tag{2.4.4}$$

de forma muy similar se puede obtener el valor más pequeño de los máximos z_{som} o el valor más grande de los mismos z_{lom} .

Los cálculos para llevar a cabo estos métodos conllevan un consumo grande de tiempo, a menos que se cuente con hardware especial. Además estos tipos de defuzzificación por su dificultad, no son sujetos a un análisis matemático riguroso, por tanto se basan en resultados experimentales.

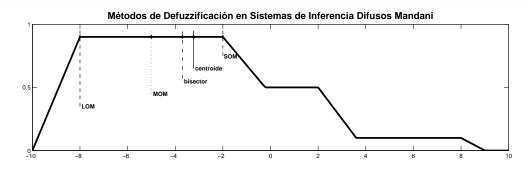


Figura 2.4.2: Métodos de Defuzzificación en sistemas Mamdani.

Existen otros métodos de defuzzificación que no presentan estos problemas, los cuales se plantearán a continuación como parte de otros sistemas de inferencia difusos.

2.4.2. Sistema de Inferencia Difuso Sugeno

El sistema de inferencia difuso Sugeno o también conocido como modelo difuso Sugeno o modelo difuso TSK fue propuesto por Takagi, Sugeno y Kang [25, 26], en un esfuerzo para desarrollar un planteamiento para generar reglas difusas dado un conjuntos de datos de entrada y salida dados. La forma típica de una regla difusa en un modelo difuso Sugeno es la siguiente:

$$\mathbf{si} \ x \text{ es A } \mathbf{y} \ y \text{ es B } \mathbf{entonces} \ z = f(x, y) \tag{2.4.5}$$

donde A y B son conjuntos difusos en el antecedente, mientras z=f(x,y) es una función tradicional en el consecuente. Usualmente f(x,y) es una función polinomial con variables de entrada x y y, pero puede ser cualquier función con tantas variables como pueda describir apropiadamente la salida del modelo en la región difusa especificada por el antecedente de la regla. Cuando f(x,y) es un polinomio de primer orden, el sistema de inferencia resultante se le denomina "modelo difuso Sugeno de primer orden". Si f es una constante, entonces se tiene un "modelo difuso Sugeno de orden cero"que puede ser analizado como un caso especial del sistema de inferencia Mamdani, en el cual, el consecuente de cada regla es definida mediante un singleton difuso; o como un caso especial del modelo difuso Tsukamoto, en el que el consecuente de cada regla es especificado mediante una función de membresía de una función escalón con centro en la constante.

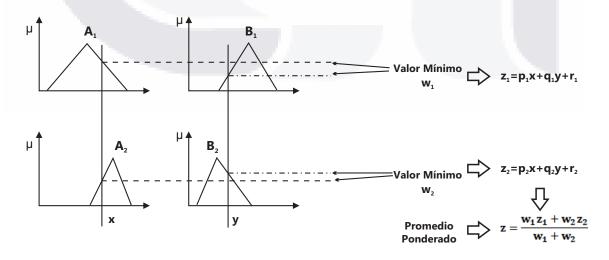


Figura 2.4.3: Modelo Difuso Sugeno

2 Lógica Difusa

La Figura 2.4.3 muestra el procedimiento de razonamiento difuso para un modelo Sugeno de primer orden.

Dado que cada regla tiene una salida numérica, la salida total del modelo (defuzzificada) se obtiene mediante el método de "promedio ponderado", el cual permite evadir los problemas de consumo de tiempo presentados en los tipos de defuzzificación del modelo Mamdani. La ecuación2.4.6 define este tipo de defuzzificación.

$$z = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_n z_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}$$
 (2.4.6)

En ocasiones, la operación "promedio ponderado", es reemplazada por la operación "suma ponderada" (ver ecuación 2.4.7), con el fin de reducir cálculos adicionales, especialmente en el entrenamiento de sistemas de inferencia difusos. Sin embargo esta simplificación podría conducir a la pérdida de significados lingüísticos en las funciones de membresía, a menos que la suma de las fuerzas de activación ($\sum w_i$) sea cercana a la unidad.

$$z = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_n z_n$$
 (2.4.7)

A diferencia del sistema de inferencia difuso Mamdani, el modelo difuso Sugeno no puede seguir la regla composicional de inferencia de forma estricta en su mecanismo de razonamiento difuso. Esto plantea algunas dificultades cuando sus entradas son difusas. Sin embargo, el valor de salida total resultante obtenida mediante el promedio ponderado o suma ponderada es siempre dura, esto es contradictorio, ya que un modelo difuso debe ser capaz de propagar la incertidumbre de sus entradas a las salidas.

2.4.3. Sistema de Inferencia Difuso Tsukamoto

En los modelos difusos Tsukamoto, el consecuente de cada regla difusa es representado mediante un conjunto difuso con una función de membresía monótona, como se muestra en la Figura 2.4.4. Es decir, el valor de salida inferido por cada regla, es definido como un valor numérico inducido por la fuerza de activación de la regla. La respuesta de salida total se forma al aplicar el promedio ponderado del valor de salida de cada regla.

Dado que cada regla infiere una salida numérica, el modelo difuso Tsukamoto, agrupa las salidas de cada regla mediante el método de promedio ponderado, lo cual evita el consumo de tiempo en el proceso de defuzzificación. Sin embargo, el modelo difuso Tsukamoto no puede seguir de manera fiel a la regla de composición de inferencia, ya que su salida siempre es un valor duro, incluso cuando las entradas son difusas.

S₃₈ S TESIS TESIS TESIS

2.5 Modelado Difuso

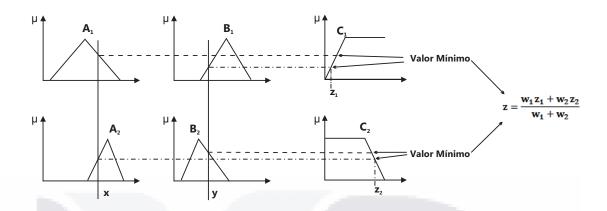


Figura 2.4.4: Modelo difuso Tsukamoto.

2.5. Modelado Difuso

En general, el diseño de sistemas de inferencia difusos se basa en el comportamiento conocido del sistema objetivo; por lo cual, se espera que el sistema difuso sea capaz de reproducir la conducta del sistema a controlar.

El método de desarrollo de un sistema de inferencia difuso para una aplicación específica (también llamado modelado difuso), tiene las siguientes características:

- La estructura en forma de reglas de un sistema de inferencia difuso, hace sencillo incorporar la experiencia humana sobre el sistema objetivo, directamente en el proceso de modelado.
- Cuando los datos de entrada/salida del sistema objetivo son disponibles, las técnicas convencionales de identificación de sistemas pueden ser usadas para el modelado difuso.

El modelado difuso puede llevarse a cabo en dos etapas. La primera es la identificación de la "estructura superficial", la cual incluye las siguientes acciones:

- 1. Seleccionar las variables de entrada/salida relevantes.
- 2. Elegir un sistema de inferencia difuso.
- 3. Determinar el número de términos lingüísticos asociados con cada variable entrada y/o salida.
- 4. Diseñar una colección de reglas difusas "si-entonces".

2 Lógica Difusa

Al realizar la primera etapa del modelado, se ha obtenido una base de reglas que describe el comportamiento del sistema objetivo mediante términos lingüísticos. El significado de estos términos es determinado en la segunda etapa del modelado, que consiste en la identificación de la "estructura interna", la cual determina las funciones de membresía de cada término lingüístico (y los coeficientes de los valores de salida de cada regla si se está usando el modelo Sugeno). La identificación de la estructura interna incluye las siguientes tareas:

- 1. Elegir funciones de membresía parametrizadas apropiadas.
- 2. Entrevistar a expertos familiarizados con el sistema objetivo para determinar los parámetros de las funciones de membresía usadas en la base de reglas.
- 3. Afinar los parámetros de las funciones de membresía usando técnicas de regresión y/o optimización.



3 Lógica Difusa Tipo 2

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan los fundamentos de la Lógica Difusa Tipo 2 (*Type-2 Fuzzy Logic*, T2FL). Los temas expuestos son: conceptos básicos de la lógica difusa tipo 2, el razonamiento difuso tipo 2, sistemas de inferencia difusos tipo 2 y una breve comparación entre los sistemas difusos tipo 2 y los difusos tipo 1. Los contenidos de este capítulo se basan en el libro "Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications"[19] desarrollado por Castillo y Melin, así como lo presentado en por Karnik, Mendel *et al* en [16] y [17].

En forma general, un conjunto difuso tipo 2 es un conjunto que está definido mediante una función de membresía, con la diferencia que los límites de ésta no son concretos, es decir, existe una incertidumbre en ellos. Se puede decir, que la lógica difusa tipo 2 es una generalización de la lógica difusa convencional (tipo 1), dado que la incertidumbre no sólo se presenta en las variables lingüísticas sino también en la definición de las funciones de membresía.

Los sistemas difusos convencionales están formados por reglas. El conocimiento que es usado para construir estas reglas es a menudo incierto. Esta incertidumbre conduce a reglas en las cuales, los antecedentes y/o consecuentes son imprecisos, lo que se traduce en funciones de membresía que presentan incertidumbres en su definición. Los sistemas difusos convencionales son incapaces de manejar directamente esta incertidumbre. En cambio, los sistemas basados en lógica difusa tipo 2 son capaces de manejar esta incertidumbre, por lo tanto, son muy útiles en circunstancias donde es muy difícil determinar de forma exacta la función de membresía de un conjunto difuso.

IDESIS TRESIS TRESIS TRESIS 1740

3.2. Conceptos Básicos

3.2.1. Conjuntos Difusos Tipo 2

El concepto de conjunto difuso tipo 2, fue introducido por Zadeh en 1975 [27], como una extensión del concepto de un conjunto difuso convencional (tipo 1). Un conjunto difuso tipo 2 es caracterizado por su función de membresía, en la cual, el grado de membresía de cada elemento de este conjunto, es un conjunto difuso en el intervalo [0,1]. Por tanto, estos conjuntos pueden ser usados en situaciones en donde existe alguna incertidumbre en los grados de membresía, por ejemplo en la forma de la función de membresía o en alguno de sus parámetros.

Lo anterior no implica que los conjuntos difusos sólo sean utilizados en situaciones en extremo inciertas. Existen muchos problemas del mundo real en donde no es posible determinar de forma exacta las funciones de membresía, por ejemplo, en la predicción de series de tiempo debido a ruido en los datos de entrada.

Es importante señalar que, es posible considerar conjuntos difusos de orden superior al tipo 2, pero su complejidad es alta; por tanto, sólo se analizarán sistemas difusos de orden 2 (tipo 2). A continuación se presentan algunos ejemplos simples de conjuntos difusos tipo 2 generados a partir de conjuntos difusos tipo 1.

Ejemplo. Se considera el caso de un conjunto difuso caracterizado mediante una función de membresía con promedio m y con una desviación estándar σ , la cual se encuentra en el intervalo $[\sigma_1, \sigma_2]$, es decir:

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)}; \qquad \sigma \in [\sigma_1, \sigma_2]$$
(3.2.1)

Para cada valor de σ se puede obtener una función de membresía en particular. Por tanto, el grado de membresía para un valor específico x (excepto x=m) puede tomar varios valores posibles dependiendo del valor de σ , es decir, el grado de membresía no es un número duro sino un conjunto difuso. La Figura 3.2.1a muestra las funciones de membresía del conjunto difuso considerando m=5 y variando el valor de σ de 1.1 a 1.9.

Ejemplo. Se examina el caso de un conjunto difuso con una función de membresía gaussiana que tiene un valor de σ fijo, pero un valor promedio m que se encuentra en el intervalo $[m_1, m_2]$, es decir:

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)}; \qquad m \in [m_1, m_2]$$
 (3.2.2)

De igual manera que en el ejemplo anterior, $\mu(x)$ es un conjunto difuso. La Figura 3.2.1b representa las funciones de membresía de un conjunto difuso tomando un valor fijo σ =1.5 y variando el valor de m de 4.6 a 5.4.

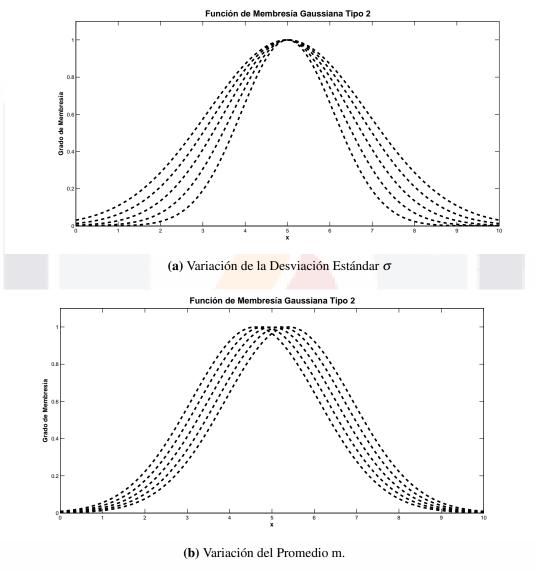


Figura 3.2.1: Conjunto Difuso Tipo 2 construido a partir de la variación de los parámetros de Conjunto Difuso Tipo 1.

Definición 3.2.1. Se toma en consideración el caso de un conjunto difuso tipo 1, caracterizado mediante una función de membresía gaussiana (con promedio M y desviación estándar σ_x), que proporciona una membresía dura m(x) para cada entrada $x \in X$ definida de la siguiente forma:

3 Lógica Difusa Tipo 2

$$m(x) = e^{-((x-M)^2/2\sigma_x^2)}$$
(3.2.3)

Ahora se considera que esta membresía de x es un conjunto difuso. A este conjunto se le asigna el nombre de "membresías primarias" de x denotado por μ_1 y a los grados de membresía de estas membresías primarias se les asigna el nombre de "membresías secundarias" de x denotadas por $\mu_2(x,\mu_1)$. Entonces, para un valor fijo x, se tiene un conjunto difuso tipo 1 cuyo dominio son las membresías primarias de x y cuyos correspondientes grados de membresía son las membresías secundarias de x. Si se asume que las membresías secundarias están definidas mediante una función gaussiana con media m(x) y con una desviación estándar σ_m , como se presenta en la Figura 3.2.2, se puede describir la segunda función de membresía para cada x de la forma siguiente:

$$\mu_2(x) = e^{-((\mu_1 - m(x))^2 / 2\sigma_{\rm m}^2)}$$
 (3.2.4)

donde $\mu_1(x) \in [0,1]$ y *m* está definida por la ecuación 3.2.3.

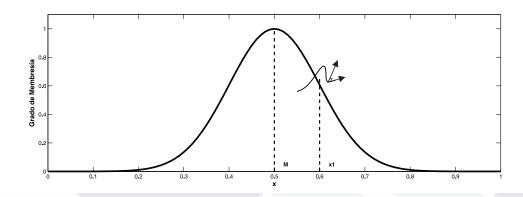


Figura 3.2.2: Conjunto Difuso Tipo 2 cuyo Grado de Membresía para cada punto del dominio es un Conjunto Difuso Gaussiano Tipo 1.

Los dos tipos de conjuntos difusos tipo 2 se definen de la siguiente manera.

Definición 3.2.2. Conjunto Difuso Tipo 2 Gaussiano.

Un conjunto difuso tipo 2 gaussiano es aquel cuyo grado de membresía de cada punto de su dominio, es un conjunto gaussiano tipo 1 contenido en el intervalo [0.1].

La Figura 3.2.3 muestra en tres dimensiones, un ejemplo de este tipo de conjunto.

TESIS TESIS TESIS

3.2 Conceptos Básicos

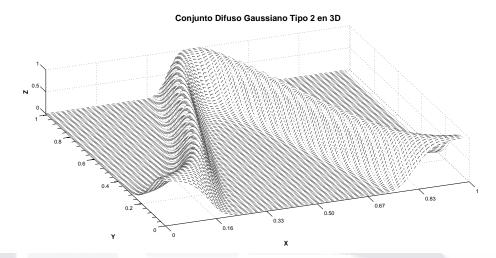


Figura 3.2.3: Conjunto Difuso Tipo 2 Gaussiano en 3D.

Definición 3.2.3. Conjunto Difuso Tipo 2 Intervalo.

Un conjunto difuso tipo 2 intervalo, es aquel cuyo grado de membresía de cada punto en su dominio, es un conjunto duro en el intervalo [0,1]. Un ejemplo de este tipo de conjunto difuso tipo 2 se muestra en la Figura 3.2.1a.

A continuación se presentan algunas definiciones importantes en la teoría de conjuntos difusos tipo 2.

Definición 3.2.4. Huella de Incertidumbre.

La incertidumbre en las membresía primarias de un conjunto difuso tipo 2 Ã, consiste en una región acotada llamada "huella de incertidumbre" (footprint of uncertainty, FOU). Matemáticamente hablando, se define como la unión de todas las funciones de membresía primarias.

En la Figura 3.2.4 se muestra la huella de incertidumbre de una función de membresía gaussiana tipo 2. La huella de membresía se obtiene al proyectar en dos dimensiones una función de membresía de un conjunto difuso tipo 2 gaussiano.

Definición 3.2.5. Funciones de Membresía Superior e Inferior.

Las funciones de membresía "superior" e "inferior", de conjunto difuso tipo 2 denotado por \tilde{A} , son funciones de membresía tipo 1, que acotan a su correspondiente huella de incertidumbre. La función de membresía superior es asociada con la cota superior de $FOU(\tilde{A})$; y de la misma manera, la función de membresía inferior se asocia a la cota inferior de $FOU(\tilde{A})$.

TESIS TESIS TESIS TESIS

3 Lógica Difusa Tipo 2

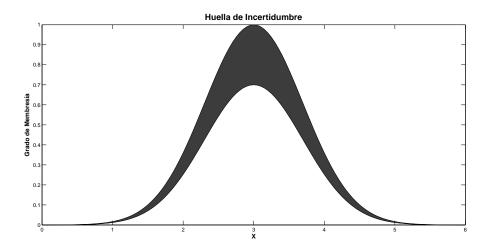


Figura 3.2.4: Huella de Incertidumbre de un Conjunto Difuso Tipo 2 Gaussiano

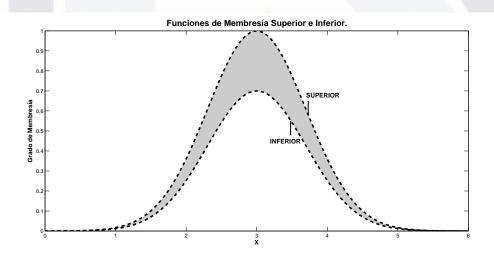


Figura 3.2.5: Funciones de Membresía Superior e Inferior.

3.2.2. Operaciones de Conjuntos Difusos Tipo 2

Sean \tilde{A}_1y \tilde{A}_2 dos conjuntos difusos tipo 2 cuyas funciones de membresía secundarias son conjuntos difusos tipo 1, definidos de la siguiente forma:

$$\tilde{A}_1 = \int_x \mu_{\tilde{A}_1}(x)/x \tag{3.2.5}$$

$$\tilde{A}_2 = \int_x \mu_{\tilde{A}_2}(x)/x \tag{3.2.6}$$

donde \int_{x} denota una colección de objetos.

Para desarrollar las operaciones de unión, intersección y complemento en conjuntos difusos tipo 2 es necesario considerar las operaciones t-norm (operación min \wedge) y t-conorm (operación max \vee) para conjuntos difusos convencionales.

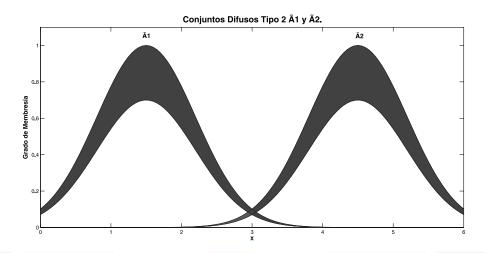


Figura 3.2.6: Conjuntos Difusos Tipo 2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 .

Definición 3.2.6. Unión de Conjuntos Difusos Tipo 2.

La unión de \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 es un conjunto difuso tipo 2 definido por:

$$\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2 = \mu_{\tilde{A}_1}(x) \sqcup \mu_{\tilde{A}_2}(x) = \int_x \mu_{\tilde{A}_1} \cup \mu_{\tilde{A}_2}(x)/x$$
 (3.2.7)

La operación unión entre conjuntos difusos tipo 2, se puede plantear como una operación "join" presentada por Karnik y Mendel en [16, 17, 28]. Esta operación se define de la siguiente manera: sean $F = \int_x \mu_x(x)/x$ y $G = \int_y \mu_y(y)/y$, dos conjuntos difusos, la operación "join" se denota como:

$$F \sqcup G = \int_{\mathcal{X}} \int_{\mathcal{Y}} [\mu_F(x) \wedge \mu_G(y)] / (x \vee y)$$
 (3.2.8)

donde \land denota la operación t-norm (min), \lor denota la operación t-conorm (max) y las integrales indican una unión lógica. La operación unión, se ilustra en la Figura 3.2.7.

Definición 3.2.7. Intersección entre Conjuntos Difusos Tipo 2.

La intersección de \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 genera un conjunto difuso tipo 2 definido por:

$$\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2 = \mu_{\tilde{A}_1}(x) \cap \mu_{\tilde{A}_2}(x) = \int_x \mu_{\tilde{A}_1} \cap \mu_{\tilde{A}_2}(x)/x$$
 (3.2.9)

3 Lógica Difusa Tipo 2

En la Figura 3.2.8 se ilustra esta operación.

La operación intersección se define mediante la operación "meet", presentada por Karnik y Mendel en [16, 17, 28]. Esta definición se muestra a continuación: sean $F = \int_x \mu_x(x)/x$ y $G = \int_y \mu_y(y)/y$, dos conjuntos difusos, la operación "meet" se denota como:

$$F \sqcap G = \int_{\mathcal{X}} \int_{\mathcal{Y}} [\mu_F(x) \wedge \mu_G(y)] / (x \wedge y)$$
 (3.2.10)

donde \land denota la operación *t-norm* (*min*), \land denota la operación *t-conorm* (*max*) y las integrales indican una unión lógica.

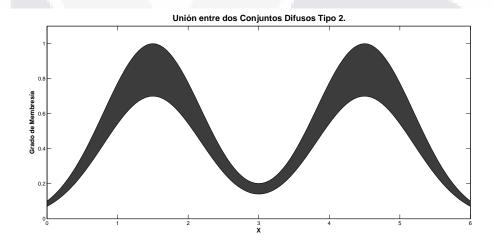


Figura 3.2.7: Unión entre los Conjuntos Difusos Tipo 2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 .

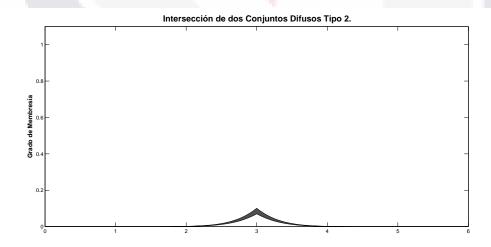


Figura 3.2.8: Intersección entre los Conjuntos Difusos Tipo 2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 .

3.2 Conceptos Básicos

Definición 3.2.8. Complemento de un Conjunto Difuso Tipo 2.

El complemento del conjunto difuso tipo $2 \tilde{A}$, es el conjunto \tilde{A}' definido como:

$$\tilde{A}' = \int_{x} \mu_{\tilde{A}}(x)/(1-x)$$
 (3.2.11)

donde la prima denota el complemento. En esta ecuación, $\mu_{\tilde{A}}$ es la función de membresía secundaria, es decir, para cada valor de x, $\mu_{\tilde{A}}$ es una función.

El siguiente ejemplo numérico, muestra de una forma más adecuada estas operaciones:

Ejemplo. Sean \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 dos conjuntos difusos tipo 2 cuyas funciones de membresía secundaria para un valor particular de x son: $\mu_{\tilde{A}_1}(x) = \frac{0.5}{0.1} + \frac{0.8}{0.2}$ y $\mu_{\tilde{A}_2}(x) = \frac{0.4}{0.5} + \frac{0.9}{0.9}$ entonces:

$$\begin{split} &\mu_{\tilde{\mathbf{A}}_{\mathbf{1}}} \cup \mu_{\tilde{\mathbf{A}}_{\mathbf{2}}}(x) = \mu_{\tilde{\mathbf{A}}_{\mathbf{1}}}(x) \cup \mu_{\tilde{\mathbf{A}}_{\mathbf{2}}}(x) = \left(\frac{0.5}{0.1} + \frac{0.8}{0.2}\right) \cup \left(\frac{0.4}{0.5} + \frac{0.9}{0.9}\right) \\ &= \frac{(0.5 \wedge 0.4)}{(0.1 \vee 0.5)} + \frac{(0.5 \wedge 0.9)}{(0.1 \vee 0.9)} + \frac{(0.8 \wedge 0.4)}{(0.2 \vee 0.5)} + \frac{(0.8 \wedge 0.9)}{(0.2 \vee 0.9)} \\ &= \frac{0.4)}{(0.5)} + \frac{(0.5)}{(0.9)} + \frac{(0.4)}{(0.5)} + \frac{(0.8)}{(0.9)} \\ &= \frac{max\{0.4,0.4\}}{0.5} + \frac{max\{0.5,0.8\}}{0.9} \\ &= \frac{0.4}{0.5} + \frac{0.8}{0.9} \\ &= \frac{(0.5 \wedge 0.4)}{(0.1 \wedge 0.5)} + \frac{(0.5 \wedge 0.9)}{(0.1 \wedge 0.9)} + \frac{(0.8 \wedge 0.4)}{(0.2 \wedge 0.5)} + \frac{(0.8 \wedge 0.9)}{(0.2 \wedge 0.9)} \\ &= \frac{(0.4)}{(0.1)} + \frac{(0.5)}{(0.1)} + \frac{(0.4)}{(0.2)} + \frac{(0.8)}{(0.2)} \\ &= \frac{max\{0.4,0.5\}}{0.1} + \frac{max\{0.4,0.8\}}{0.2} \\ &= \frac{0.5}{0.1} + \frac{0.8}{0.2} \\ &= \frac{0.5}{1 - 0.1} + \frac{0.8}{1 - 0.2} = \frac{0.5}{0.9} + \frac{0.8}{0.8} \end{split}$$

3 Lógica Difusa Tipo 2

3.3. Sistemas Difusos Tipo 2

Los conceptos básicos de la lógica difusa no presentan ningún cambio de un sistema convencional a un sistema tipo 2 y en general, son iguales para cualquier sistema difuso tipo n. Para este último, una n mayor indica un mayor grado de imprecisión, dado que, incrementar el tipo de sistema genera cambios en la naturaleza de las funciones de membresía, las operaciones que dependen de ellas cambian. Sin embargo, los principios básicos de la lógica difusa son independientes de la naturaleza de las funciones de membresía y por tanto, no cambian. Las reglas de inferencia como las generalizaciones del Modus Ponens y/o del Modus Tollens se pueden seguir aplicando.

La estructura de las reglas difusas tipo 2 es análoga a la forma de las reglas difusas convencionales, y la única diferencia entre ellas radica en que las primeras involucran conjuntos difusos tipo 2. En un sistema difuso tipo 1, los conjuntos difusos de salida son defuzzificados con el objetivo de obtener un valor duro de salida, el cual representa la combinación de los conjuntos de salida. En un sistema difuso tipo 2, los conjuntos de salida son conjuntos difusos tipo 2, por tanto, es necesario hacer uso de versiones extendidas de los métodos de defuzzificación convencionales. Los métodos de defuzzificación extendidos a sistemas tipo 2 generan un conjunto difuso convencional como salida del sistema. Por tanto, como estos métodos combinan los conjuntos de salida tipo 2 y producen como resultado, un conjunto difuso tipo 1 se les nombra "métodos de reducción de tipo" y al conjunto difuso obtenido se le llama "conjunto difuso de tipo reducido". A este conjunto difuso se le puede aplicar algún método de defuzzificación tradicional para obtener un número duro como salida total del sistema, sin embargo, en algunas aplicaciones, es más importante la obtención del conjunto difuso de tipo reducido que un número duro.

Un esquema general de un sistema difuso tipo 2 se presenta en la Figura 3.3.1. En este gráfico, se observa que la principal diferencia entre un sistema difuso convencional y un sistema difuso tipo 2, radica en procesamiento de salida, ya que, para un sistema difuso tipo 1, el único procesamiento de salida es la defuzzificación de los conjuntos difusos de salida. En cambio en un sistema tipo 2, este procesamiento se compone por un bloque reductor de tipo y por un defuzzificador.

Durante la implementación de un sistema difuso tipo 2 se asume que todos los conjuntos de antecedentes y consecuentes de las reglas difusas son de tipo 2, sin embargo, esto no es realmente necesario en la práctica. Un sistema difuso es del tipo 2, siempre y cuando alguno de sus antecedentes o consecuentes sea de tipo 2.

La estructura de las reglas en un sistema difuso tipo 2 es exactamente igual a la convencional, sólo que ahora algunos conjuntos involucrados son tipo 2. Por ejemplo, considere un

S50 S TESIS TESIS TESIS TESIS

3.3 Sistemas Difusos Tipo 2

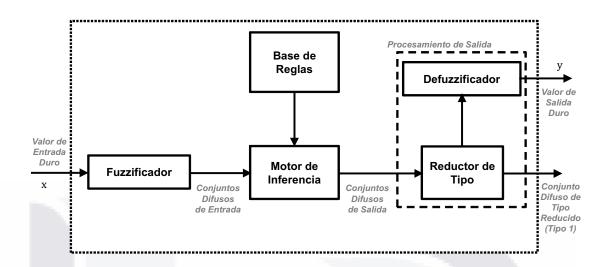


Figura 3.3.1: Sistema Difuso Tipo 2

sistema difuso que tiene r entradas $x_1 \in X_1, \ldots, x_r \in X_r$ y una salida $y \in Y$. La forma de las reglas difusas de un sistema difuso tipo 1 y tipo 2 se muestra a continuación:

Caso 1. Sistema Difuso Tipo 1.

$$R^l: Si x_1 es A_1^l y \dots x_p es A_p^l,$$
 entonces $y es Y^l$ $l = 1, \dots, M$ (3.3.1)

en donde los conjuntos involucrados son difusos.

Caso 1. Sistema Difuso Tipo 2.

$$R^l: Si x_1 es \tilde{A}_1^l y \dots x_p es \tilde{A}_p^l, entonces y es \tilde{Y}^l \qquad l = 1, \dots, M$$
 (3.3.2)

en donde al menos uno de los conjuntos difusos involucrados es de tipo 2.

La ecuación 3.3.2 representa una relación difusa tipo 2 entre el espacio de entrada $X_1 \times \ldots \times X_r$ y el espacio de salida Y del sistema difuso tipo 2.

En un sistema difuso tipo 2, el proceso de inferencia es muy similar al de tipo 1. El motor de inferencia combina las reglas y genera un mapeo de los conjuntos difusos tipo 2 de entrada a los conjuntos difusos tipo 2 de salida. Para efectuar esto, es necesario realizar operaciones de unión e intersección entre conjuntos difusos tipo 2, así como composiciones entre relaciones difusas tipo 2.

Los conjuntos difusos tipo 2 pueden transmitir las incertidumbres en las funciones de membresía de conjuntos difusos tipo 1 debido a la dependencia de las funciones de membresía con respecto a la información lingüística y numérica disponible. La información lingüística en general, no proporciona ningún dato sobre las formas de las funciones de membresía. Cuando estas funciones son determinadas mediante la sintonización de datos numéricos, la

3 Lógica Difusa Tipo 2

incertidumbre de éstos se transfiere a la incertidumbre de las funciones de membresía; y en muchos de los casos, la información disponible sobre la incertidumbre lingüística/numérica puede ser incorporada en los sistemas difusos tipo 2.

3.3.1. Modelos de Sistemas Difusos Tipo 2

A continuación se presentan algunos modelos de sistemas difusos tipo 2, entre los cuales: Singleton, No Singleton y Sugeno. Tanto el sistema difuso Singleton, como el No Singleton, son sistemas basados en el modelo difuso convencional planteado por Mamdani [23, 24]. En cambio, como su nombre lo indica, un sistema difuso tipo 2 Sugeno se fundamenta en el modelo presentado por Sugeno, Takagi y Kang [25, 26].

Sistemas Difusos Tipo 2 Singleton

Tanto en un sistema difuso tipo 2, como en un convencional, los valores de entrada duros se fuzzifican para generar conjuntos difusos de entrada que activan al motor de inferencia. El fuzzificador mapea un valor duro $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_r)^T \in X_1 \times \dots \times X_r \equiv X$ a un conjunto difuso \tilde{A}_x tipo 2 en \mathbf{X} .

La salida tipo 2 del motor de inferencia, debe ser sometida a un procesamiento de salida, que incluye dos operaciones: la reducción de tipo y la defuzzificación. Algunos métodos de reducción de tipo son: centroide, centro de sumas, altura, altura modificada, centro de conjuntos, etc. El método de reducción de tipo más usado es el centroide. Si se aplica una reducción de tipo usando este método, se puede tomar a cada elemento del conjunto de tipo reducido, como el centroide de un conjunto difuso tipo 1 embebido en el conjunto difuso de salida tipo 2 del sistema. Cada uno de estos conjuntos difusos embebidos puede ser considerado como un conjunto de salida de un sistema difuso tipo 1 asociado, y de forma correspondiente, el conjunto difuso tipo 2 puede ser visto como una colección de varios sistemas difusos tipo 1. Como cada sistema difuso tipo 1 está embebido en el sistema difuso tipo 2, el conjunto de tipo reducido se puede considerar como una colección de salidas de todos los sistemas tipo 1 embebidos (ver Figura 3.3.2). Entonces el conjunto de tipo reducido representa la salida de un sistema difuso tipo 2 como un conjunto difuso, en lugar de tomarlo como un valor duro.

Cuando las funciones de membresía de los antecedentes y consecuentes de un sistema difuso tipo 2 tienen dominios continuos, el número de conjuntos difusos tipo 1 embebidos es infinito. La Figura 3.3.2, muestra un sistema difuso tipo 2 visto como una colección discreta de sistemas difusos tipo 1 embebidos [29]. En este sistema las funciones de membresía de los antecedentes y/o consecuentes tienen dominios discretos (o discretizados). Las membresías

en el conjunto de tipo reducido $\mu_Y(y_i)$ representan el nivel de incertidumbre asociado con cada sistema difuso tipo 1 embebido. Un valor de salida duro se obtiene mediante la agrupación de las salidas de cada sistema difuso tipo 1 embebidos.

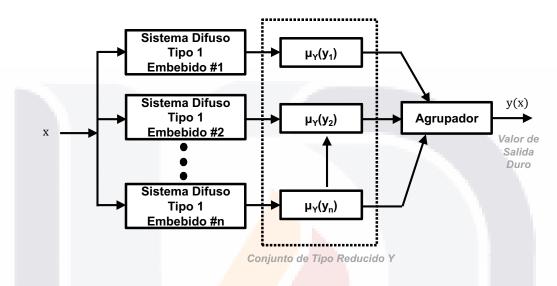


Figura 3.3.2: Sistema Difuso Tipo 2 visto como una colección de Sistemas Difusos Tipo 1 Embebidos.

Si todas las incertidumbres de tipo 2 desaparecieran del sistema, las funciones de membresía secundarias de todos los antecedentes y los consecuentes colapsarían en un sólo punto, es decir el sistema difuso tipo 2 se convertiría en un sistema difuso tipo 1.

Finalmente para obtener un valor duro global del sistema difuso, es necesario aplicar algún método de defuzzificación al conjunto difuso de tipo reducido. Por ejemplo, si se aplica el método de defuzzificación por centroide, se obtiene un resultado equivalente al obtenido por el método de promedio ponderado aplicado al conjunto de salidas de los sistemas difusos tipo 1 embebidos en el sistema difuso tipo 2. Las ponderaciones corresponden a las membresías del conjunto de tipo reducido. Si el conjunto difuso de tipo reducido *Y* es discreto o discretizado para un valor de entrada *x*, y contiene *n* elementos, entonces se puede expresar como:

$$y(x) = \left[\sum_{k=1}^{n} y_k \cdot \mu_Y(y_k)\right] / \left[\sum_{k=1}^{n} \mu_Y(y_k)\right]$$
 (3.3.3)

ESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Sistemas Difusos Tipo 2 No Singleton

Un sistema difuso No Singleton es aquel cuyas entradas son modeladas como números difusos. Este tipo de sistemas no sólo considera las incertidumbres en los antecedentes y/o consecuentes de las reglas difusas, sino también toma en cuenta las incertidumbres en la medición de las entradas. La diferencia entre un sistema difuso tipo 2 Singleton y No Singleton radica en el fuzzificador. En un sistema No Singleton, el fuzzificador toma las entradas del sistema como conjuntos difusos convencionales; en cambio en un Sistema Singleton, las entradas se toman como valores duros. La estructura general de un sistema difuso No Singleton es análoga a la presentada en la Figura 3.3.1, es decir, igual que la estructura de un sistema Singleton.

Sistemas Difusos Tipo 2 Sugeno

La principal diferencia entre el modelo difuso Mamdani y el modelo difuso Sugeno, radica en la estructura de los consecuentes de las reglas difusas, ya que para el modelo Mamdani, el consecuente de una regla difusa es un conjunto difuso, mientras que en el modelo Sugeno el consecuente es una función. A continuación se presentan las características de un sistema difuso tipo 2 basado en el modelo difuso Sugeno.

Los sistemas difusos tipo 1 Sugeno, fueron propuestos por Sugeno, Takagi y Kang [25, 26], con el objetivo de desarrollar un enfoque sistemático para la generación de reglas difusas a partir de conjuntos de datos de entrada/salida. La teoría definida para sistemas difusos tipo 1 Sugeno, es análoga para su contraparte tipo 2.

Considere un sistema difuso tipo 2 Sugeno que tiene r entradas $x_1 \in X_1, \ldots, x_r \in X_r$ y una salida $y \in Y$. La forma de las reglas difusas de este tipo de sistema (suponiendo un sistema es del tipo Sugeno de 1er. Orden), se muestra a continuación:

$$R^{l}: Si x_{1} es \tilde{A}_{1}^{l} y \dots x_{p} es \tilde{A}_{p}^{l}, entonces y es Y^{i} = C_{0}^{i} + C_{1}^{i} x_{1} + \dots + C_{r}^{i} x_{r}$$
 (3.3.4)

donde $i=1,\ldots,M$, denota la i-ésima regla difusa; C^i_j $(j=1,\ldots,r)$ es el conjunto difuso tipo 1 de los consecuentes; Y^i es la salida de la i-ésima regla difusa (también es un conjunto difuso tipo 1); y \tilde{A}^i_k $(k=1,\ldots,r)$, son los conjuntos difusos tipo 2 de los antecedentes.

Estas reglas difusas permiten de manera simultánea, considerar la incertidumbre sobre los antecedentes de las funciones de membresía y sobre los valores de los consecuentes. En un sistema difuso tipo 2 Sugeno, no es necesario aplicar una reducción de tipo, al igual que en un sistema difuso convencional Sugeno no es necesaria la defuzzificación.

4 Control Difuso

El contenido de este capítulo plantea la teoría básica del control de sistemas usando lógica difusa tipo 1 y tipo 2. Como introducción se presentan los conceptos elementales de la teoría de control de sistemas; después se exponen las características más importantes del control difuso convencional (tipo 1) y, finalmente se desarrollan los conceptos fundamentales del control difuso tipo 2. Estos contenidos se fundamentan en los temas estudiados por Karnik, Mendel *et al* en [16, 17], por Castillo y Melin en [19], y por Passino y Yurkovich en [30].

4.1. Sistemas de Control

4.1.1. Introducción

En las décadas de los 40's y 50's, muchos investigadores demostraron que la mayoría de los sistemas dinámicos pueden ser modelados matemáticamente usando ecuaciones diferenciales. Estos trabajos representan las bases de la Teoría de Control, que en conjunto con la Teoría de Transformadas, proporcionan un medio muy poderoso de análisis y diseño de sistemas de control, tomando como herramienta principal, el modelo matemático del sistema.

Un sistema de control es un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados [31]. En la Figura 4.1.1 se presenta un modelo básico de un sistema de control.

Cuando se pretende controlar un proceso físico, generalmente se aplica el siguiente procedimiento de diseño:

- 1. Desarrollar el modelo matemático que represente la dinámica del sistema.
- 2. Usando este modelo matemático (o una versión simplificada de éste), diseñar el controlador.
- 3. Empleando el modelo matemático del sistema en lazo cerrado y un análisis. ya sea matemático, o basado en simulación, estudiar el desempeño del controlador.

SIS TRESIS TRESIS TRESIS 1155

4 Control Difuso

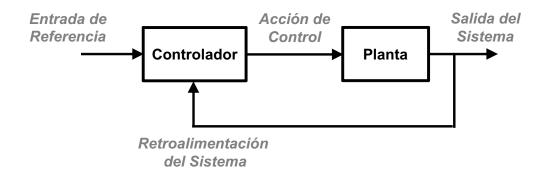


Figura 4.1.1: Sistema de Control Básico

4. Implementar el controlador mediante alguna plataforma de diseño (microcontroladores, fpga's, etc.), y evaluar su desempeño del sistema en lazo cerrado.

4.1.2. Criterios de Desempeño y Restricciones de Diseño

Al implementar un controlador, es importante considerar que su construcción debe satisfacer algunas especificaciones de diseño. A menudo, el primer punto a tomar en consideración es si se debe utilizar un controlador en lazo abierto o en lazo cerrado. En la mayoría de casos, el control en lazo cerrado provee un mejor desempeño que el obtenido al aplicar un control en lazo abierto, ya que modela de forma más eficiente la dinámica del sistema. Algunos criterios de desempeño de un controlador en lazo cerrado son:

- Propiedades de rechazo de perturbaciones.
- Sobretiro.
- Insensibilidad a variación de parámetros de la planta. Tiempo de establecimiento.

- Estabilidad.

- Error en estado estable.

- Tiempo de levantamiento.

Los criterios anteriores son usados para caracterizar las "condiciones de operación" del sistema e indican si el sistema de control está funcionando apropiadamente o no. Existen otros aspectos que deben de considerarse al analizar y diseñar un sistema de control. Algunos de ellos son:

- Costo.
- Complejidad computacional.
- -Facilidad de fabricación.
- Confiabilidad.

- Facilidad en su mantenimiento.
- Adaptabilidad.
- Facilidad de comprensión.





4.1 Sistemas de Control

Técnicas de Control 4.1.3.

Dentro de la teoría de control convencional existen numerosos enfoques para el desarrollo de controladores aplicados en sistemas dinámicos. A continuación se enlistan algunos de ellos:

- Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Alrededor del 90% de los controladores en operación son controladores PID o al menos PI.
- Control Clásico. Compensadores adelanto-atraso, métodos de Bode y Nyquist, diseño por lugar geométrico de raíces, etc.
- *Control por Espacio-Estado*. Retroalimentación de estado, observadores. etc.
- Control Óptimo. Regulador lineal cuadrático, principio de mínimo de Pontryagin o programación dinámica, etc.
- Control Robusto. Métodos H_2 o H_∞ , teoría de retroalimentación cuantitativa, conformación de lazo, etc.
- *Métodos No Lineales*. Linealización por retroalimentación, rediseño de Lyapunov, control por modo deslizante, backstepping, etc.
- Control Adaptativo. Control adaptativo de modelo de referencia, reguladores autossintonizados, control adaptativo no lineal, etc.
- Control Estocástico. Control de varianza mínima, control lineal cuadrático gaussiano (LQG), control adaptativo estocástico, etc.
- Sistemas de Eventos Discretos. Redes de Petri, control supervisor, análisis de perturbación infinitesimal, etc.

Estos enfoques de diseño de sistemas de control ofrecen una variedad de maneras de utilizar la información de los modelos matemáticos, con el objetivo de desarrollar controladores eficientes. En algunas ocasiones, estas metodologías de diseño, no toman en consideración cierta información heurística al inicio del proceso de diseño, pero cuando el controlador está implementado, la utilizan con el objetivo de sintonizar su desempeño. Sin embargo, en ocasiones, el control convencional ignora esta información heurística, debido a que no se adecua al marco de referencia matemático.

El modelado y simulación de sistemas complejos reales en el desarrollo de esquemas de control, especialmente cuando se consideran aspectos referentes a su implementación, es una

4 Control Difuso

tarea complicada. Incluso, si un modelo relativamente preciso de un sistema dinámico puede ser desarrollado, es a menudo demasiado complejo para usarse en la implementación de un controlador. Este problema se presenta en la mayoría los enfoques de diseño de controladores que requieren suposiciones restrictivas de la planta (por ejemplo, la linealidad). Es por esta razón que los controladores usados en la práctica son, a menudo, desarrollados mediante modelos simples de la planta que satisfacen estas suposiciones. Aunado a esto, estos enfoques convencionales de diseño de controladores, usan métodos heurísticos para sintonizar el desempeño del controlador. Por tanto, se presenta la cuestión que, si el éxito del controlador se puede atribuir al modelo matemático y a la técnica de diseño convencional, o a la sintonización heurística que se usa en su implementación.

Algunas técnicas de cómputo suave han sido aplicadas en el diseño de controladores [13, 14, 19, 21, 30]. Estas técnicas no presentan los problemas planteados anteriormente, ya que utilizan la experiencia humana (información heurística) para desarrollar controladores eficientes. Dentro de este esquema de diseño, se encuentran los controladores basados en lógica difusa, los cuales, se presentan a continuación.

4.2. Controladores Difusos

El control basado en lógica difusa proporciona una metodología formal para representar, manipular e implementar conocimiento humano heurístico, con el fin de controlar un sistema dinámico. En la Figura 4.2.1 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado, que contiene un controlador difuso embebido. Las salidas de la planta son denotadas por y(t), sus entradas por u(t) y la entrada de referencia del controlador difuso se denota mediante r(t).

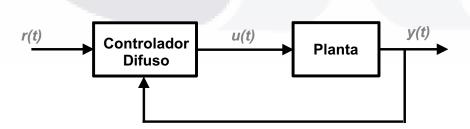


Figura 4.2.1: Controlador Difuso embebido en un Sistema de Control en Lazo Cerrado.

Es posible visualizar a un controlador difuso como un "selector artificial de decisiones" que opera en un sistema en lazo cerrado en tiempo real. Este selector toma los datos de salida

4.2 Controladores Difusos

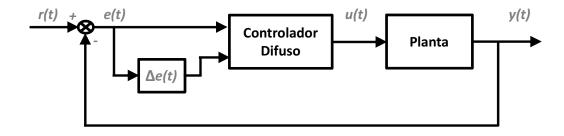


Figura 4.2.2: Ejemplo de un Sistema de Control Difuso con variables de entrada e(t) y $\Delta e(t)$.

de la planta y(t), los compara con la entrada de referencia r(t) y finalmente genera un valor de entrada de la planta u(t) que asegura el cumplimiento de los objetivos de desempeño.

El proceso de diseño de un sistema de control difuso esencialmente equivale a:

- 1. Elegir las entradas y/o salidas del controlador difuso.
- 2. Elegir el procesamiento previo necesario para las entradas del controlador y el posible procesamiento posterior de las salidas.
- 3. Diseñar/seleccionar cada elemento del controlador difuso.

Además, para diseñar un controlador difuso se debe recopilar información sobre cómo el selector artificial de decisiones debe actuar en el sistema de lazo cerrado. En algunas ocasiones esta información proviene de un humano que lleva a cabo la tarea de control, mientras que en otras ocasiones la información se obtiene del análisis de la dinámica de la planta, escrito como un conjunto de reglas que define cómo controlar el sistema de forma automática.

Usualmente, la implementación de un controlador difuso implica el uso de dos variables de entrada: e(t) (error) que es la diferencia entre la señal de referencia r(t) y la salida del proceso; así como la variación de dicha señal $\Delta e(t)$.

$$e(t) = r(t) - y(t)$$
 (4.2.1)

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1)$$
 (4.2.2)

4.2.1. Controladores Difusos Convencionales (Tipo 1)

Un controlador difuso convencional es un sistema intuitivo y numérico que mapea valores de entrada duros a un valor de salida también duro. Tiene como núcleo a un sistema difuso

4 Control Difuso

convencional, por lo tanto se compone de los mismos elementos, es decir, de un Fuzzificador, de una Base de Reglas, de un Motor de Inferencia y de un Defuzzificador. La Figura 4.2.3 muestra un diagrama de bloques de un controlador difuso convencional.

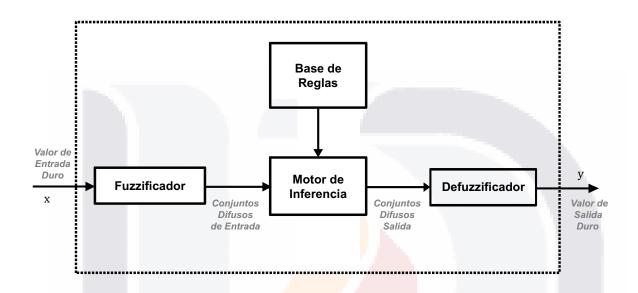


Figura 4.2.3: Estructura de un Controlador Difuso Convencional (Tipo 1).

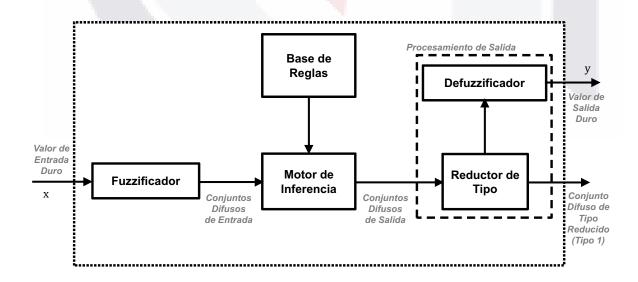


Figura 4.2.4: Estructura de un Controlador Difuso Tipo 2.

4.2 Controladores Difusos

4.2.2. Controladores Difusos Tipo 2

Forma análoga que en un controlador difuso convencional, en un controlador difuso tipo 2 se tiene como núcleo a un sistema difuso tipo 2, por tanto estará conformado por los mismos elementos, es decir un Fuzzificador, una Base de Reglas, un Motor de Inferencia, un Reductor de Tipo y un Defuzzificador (ver Figura 4.2.4).

Es importante resaltar que los sistemas difusos convencionales son incapaces de manejar directamente incertidumbres en las reglas difusas, ya que están conformadas por conjuntos difusos tipo 1. En cambio, los sistemas difusos tipo 2, son muy útiles en circunstancias en las cuales es difícil determinar valores exactos de sus parámetros y la medición de las incertidumbres. Sepúlveda *et al* en [32], plantea al menos cuatro fuentes de incertidumbres en sistemas difusos convencionales:

- 1. Los significados de las palabras usadas en los antecedentes y consecuentes de la reglas difusas pueden se inciertos, es decir, las palabras pueden significar diferentes cosas para diferentes personas.
- 2. Los consecuentes pueden tener histograma de valores asociados a ellos mismos, especialmente cuando el conocimiento se extrae de un grupo de expertos que no están completamente de acuerdo.
- 3. Los valores que provienen de una medición y que activan un sistema difuso tipo 1, pueden tener ruido y por tanto tener alguna incertidumbre asociada.
- 4. Los datos usados para sintonizar un sistema difuso tipo 1, también pueden tener ruido.

Los conjuntos difusos tipo 1 no son capaces de modelar directamente estas incertidumbres, ya que sus funciones de membresía son totalmente duras. En cambio, los sistemas difusos tipo 2 son capaces de modelarlas debido, a que sus funciones de membresía son en sí mismas conjuntos difusos convencionales.

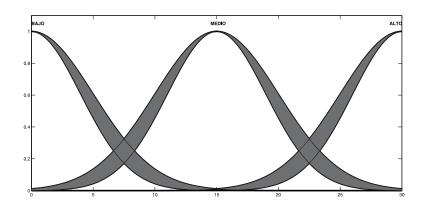
4.2.3. Método Alternativo para la Implementación de Controladores Difusos Tipo 2

En la sección anterior, es posible visualizar que la implementación de un controlador difuso tipo 2 es más difícil de llevar a cabo que la implementación de un controlador difuso convencional, ya que los procedimientos que implica son más complejos. Castillo y Melin en [19], presentan un método alternativo para desarrollo de controladores difusos tipo 2, cuyo objetivo es simplificar su implementación, ya que reduce significativamente las dificultades

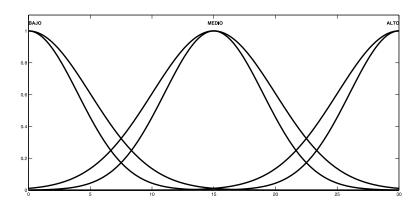
4 Control Difuso

que se presentan la implementación tradicional (Mendel [17]). Este método alternativo propone el uso de dos sistemas difusos convencionales para emular un sistema difuso tipo 2. Las funciones de membresía, el proceso de fuzzificación, la inferencia difusa y la defuzzificación a realizar son tipo 1. Las funciones de membresía son organizadas de tal manera, que sean capaces de emular las huellas de incertidumbre de un sistema difuso tipo 2. En general, el método propuesto consta de los siguientes pasos:

Sustituir cada función de membresía tipo 2, por dos funciones de membresía tipo 1.
Para realizar esto, la huella de incertidumbre (FOU) de cada función de membresía
tipo 2 es reemplazada por dos funciones de membresía tipo 1. El primer controlador
difuso tipo 1 es construido usando las funciones de membresía superiores, y el segundo
controlador usando las funciones de membresía inferiores.



(a) Funciones de Membresía Tipo 2.



(b) Funciones de Membresía Tipo 1 (superiores e inferiores).

Figura 4.2.5: Sustitución de Funciones de Membresía Tipo 2 por Funciones Tipo 1.

4.2 Controladores Difusos

- 2. Para suplir el sistema de inferencia difuso tipo 2, es necesario generar el proceso de inferencia para cada sistema difuso tipo 1 en la forma tradicional.
- 3. Para reemplazar las etapas de reducción de tipo y de defuzzificación de un sistema difuso tipo 2, es necesario obtener la defuzzificación de cada sistema difuso tipo 1 en la forma tradicional, y promediar sus valores de salida duros.



TESIS TESIS TESIS TESIS T₆₃ESIS

TESIS TESIS TESIS TESIS



TESIS TESIS TESIS TESIS

5 Implementación de ControladoresDifusos para ConvertidoresDC/DC.

En este capítulo se presentan los procedimientos que fueron empleados en la implementación de controladores difusos tipo 1 y tipo 2, aplicados en el control de un convertidor de DC/DC Buck. Se exponen los métodos que fueron aplicados para llevar a cabo cada uno de los módulos que conforman al controlador correspondiente. En la sección 6.1 se presentan algunos conceptos fundamentales del Convertidor Buck, en la parte 6.2 se analiza en detalle al controlador difuso tipo 1 implementado y finalmente en la sección 6.3 se realiza lo mismo para un controlador difuso tipo 2.

5.1. Convertidor DC/DC

5.1.1. Funciones de un Convertidor DC/DC

Los convertidores de DC/DC (*Direct Current-Direct Current*, Corriente Directa-Corriente Directa), son circuitos electrónicos que realizan las siguientes funciones[15]:

- lacktriangle Convertir un Voltaje de DC de Salida V_{out} .
- Regular el Voltaje de DC de salida V_{out} en contra de Variaciones de carga y en el Voltaje de Alimentación (línea).
- Reducir el Voltaje de AC de Rizo, en el Voltaje de Salida V_{out} por debajo del nivel requerido.
- Satisfacer estándares de seguridad nacionales e internacionales.
- Proveer aislación entre la fuente de entrada y la carga.

5 Implementación de Controladores Difusos para Convertidores DC/DC.

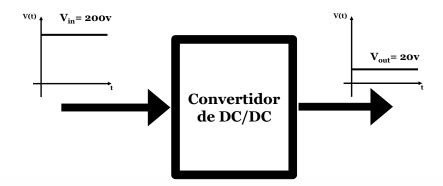


Figura 5.1.1: Diagrama Ilustrativo de un Convertidor de DC/DC.

A continuación se presenta una breve descripción de los modelos matemáticos y de las topologías de convertidores de DC/DC Buck y Boost.

5.1.2. Modelo Matemático y T<mark>opolo</mark>gía del Convertidor DC/DC Buck

El convertidor Buck (reductor) básicamente se compone de un interruptor de estado sólido Q, el cual transforma la energía de una fuente de voltaje V_{in} , un diodo D, un filtro LC, que reduce los armónicos de alta frecuencia, y una resistencia R_L , que representa la carga conectada al convertidor. Los resistores r_C y r_L representan las componentes parásitos del capacitor y del inductor, respectivamente. Finalmente V_{out} es el voltaje de salida de ambos convertidores. Las Figura 5.1.2 muestra el circuito equivalente de este convertidor.

Las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del convertidor Buck son:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L} \cdot \left[\left(\frac{R_L \cdot r_C}{R_L + r_C} + r_L \right) \cdot i_L \right]$$

$$+\left(\frac{R_L}{R_L+r_C}\cdot(v_C-V_{in})\cdot sw\right)$$
 (5.1.1)

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \left[\left(\frac{R_L}{R_L + r_C} \right) \cdot i_L - \left(\frac{1}{R_L + r_C} \right) \cdot v_C \right]$$
 (5.1.2)

$$V_{out} = \left[\left(\frac{R_L \cdot r_C}{R_L + r_C} \right) \cdot i_L - \left(\frac{R_L}{R_L + r_C} \right) \cdot v_C \right]$$
 (5.1.3)

Las expresiones 5.1.1 - 5.1.3 se obtienen al aplicar las leyes de voltajes y corrientes de Kirchoff al circuito correspondiente.

5.2 Controlador Difuso Tipo 1 (Convencional)

Cuando estos convertidores trabajan en estado estable es posible distinguir dos etapas en su operación. En un convertidor Buck, trabajando en la primera etapa se presenta un voltaje a través del inductor cuando el interruptor de estado sólido Q está activado y el diodo D se polariza inversamente. Este voltaje causa un incremento lineal de la corriente del inductor i_L .

En la segunda fase de operación, cuando el interruptor de estado sólido Q, está apagado y el diodo D se polariza directamente, se presenta un decremento en la corriente del inductor i_L debido a un voltaje negativo a través del mismo[1, 33].

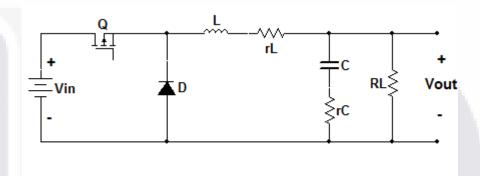


Figura 5.1.2: Convertidor de DC/DC Buck.

5.2. Controlador Difuso Tipo 1 (Convencional)

El procedimiento empleado en la implementación de controladores difusos se desglosa módulo por módulo y se presenta a continuación:

5.2.1. Fuzzificación

Los controladores difusos que se han desarrollado utilizan solamente conjuntos difusos con funciones de membresía trapezoidales y triangulares. Esto debido a que al emplear este tipo de funciones la obtención del grado de membresía de los valores duros de entrada es más rápida y fácil que usando cualquier otro tipo de funciones de membresía, ya que los cálculos que se realizan son solamente restas y divisiones (ver Ecuaciones 2.2.12 y 2.2.13).

Los conjuntos difusos propuestos y utilizados en el controlador implementado para las variables de entrada e error en el voltaje de salida y ce (Δe) cambio en el error en el voltaje de salida, son los siguientes: **NB** ($Negative\ Big$ - Negativo Grande), **NS** ($Negative\ Small$ - Negativo Pequeño), **Z** (($Negative\ Small$ - Positivo Pequeño) y **PB** ($Negative\ Small$ - Positivo Pequeño) y **PB** ($Negative\ Small$ - Positivo Pequeño) y **PB** ($Negative\ Small$ - Positivo Pequeño)

5 Implementación de Controladores Difusos para Convertidores DC/DC.

Positivo Grande). Es importante puntualizar que el número de conjuntos difusos o regiones difusas debe ser en lo posible \underline{impar} , con el objetivo de tener una escala de valores centrada en cero, sobre todo en los controladores que tienen como variables de entrada al error e y al cambio en el error ce [34].

La variable de salida Δu_{fc} del controlador, es el cambio forma de onda de referencia que determina el cambio en el ciclo de trabajo del convertidor. Sus conjuntos difusos son tipo Singleton y son nombrados de la misma manera que los conjuntos difusos usados para las variables de entrada, sólo anexando la letra O para hacer referencia a un valor de salida (*output*) (NBO, NSO, ZO, PSO y PBO).

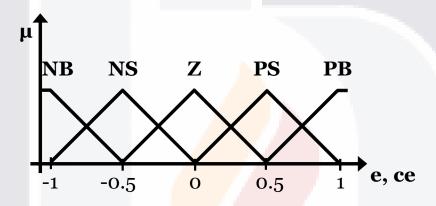


Figura 5.2.1: Conjuntos Difusos definidos para las variables de entrada *e* y *ce*.

El uso de conjuntos difusos de salida determinados mediante funciones de membresía tipo Singleton, tiene como objetivo la simplificación de cálculos posteriores en la implementación del controlador.

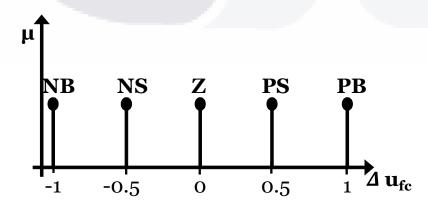


Figura 5.2.2: Conjuntos Difusos definidos para la variable de salida Δu_{fc} .

5.2 Controlador Difuso Tipo 1 (Convencional)

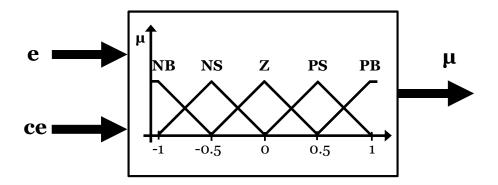


Figura 5.2.3: Esquema ilustrativo del proceso de fuzzificación.

Es recomendable utilizar valores normalizados mediante factores adecuados de escala, tanto para las variables de entrada como de salida. Esta normalización permite trabajar con valores que se encuentran en un intervalo apropiado para el controlador. En este trabajo, los valores duros de entrada y salida se encuentran en el intervalo [-1 1].

Una vez definidos los conjuntos difusos, el siguiente paso es obtener el grado de membresía (pertenencia) de los valores de entrada duros (*e y ce*) en cada uno de estos conjuntos.Para esto se aplica un procedimiento que recibe como parámetros de entrada al valor de entrada duro *x* y a los valores de los vértices *a*, *b*, *c* y *d*. Estos definen la función de membresía del correspondiente conjunto difuso. Usando estos valores, se evalúa la fórmula 2.2.13, y finalmente el procedimiento regresa como valor de salida el grado de pertenencia del valor de entrada *x* para cada uno de los conjuntos difusos. Esto se repite para cada una de las variables de entrada.

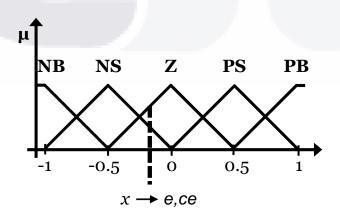


Figura 5.2.4: Evaluación de los valores de entrada para la obtención del Grado de Membresía.

5 Implementación de Controladores Difusos para Convertidores DC/DC.

5.2.2. Base de Reglas o de Conocimiento

Las reglas difusas de control asociadas con los valores de entrada y salida se derivan del conocimiento general del comportamiento del convertidor, aunque en la mayoría de las aplicaciones son ajustadas usando un proceso de "prueba y error". La elaboración de las reglas difusas de control se basa en los siguientes criterios[4, 10]:

- 1. Cuando el error *e* en el voltaje de salida y el cambio en este error *ce* son muy grandes (PB o NB), la respuesta dada por el controlador debe ser fuerte (el ciclo de trabajo debe ser cercano a cero o a uno), con el fin de tener una respuesta dinámica tan rápida como sea posible.
- 2. Cuando el error *e* y el cambio en este error *ce* se aproximan a cero (NS o PS), el controlador debe entregar una respuesta correctiva baja (un cambio pequeño en el ciclo de trabajo).
- 3. Cuando el error *e* y el cambio en este error *ce* alcanzan un valor de cero (Z) o un valor muy cercano a este punto, la respuesta del controlador debe mantenerse constante (sin cambios en el ciclo de trabajo) a fin de prevenir un sobretiro.

Las reglas difusas de la base de conocimiento tienen la siguiente forma:

$$\mathbf{si} \ e \ es \ F_e^i \ \mathbf{y} \ ce \ es \ F_{ce}^i \ \mathbf{entonces} \ \Delta u_{fc} \ es \ W_{\Delta u_{fc}}^i$$
 (5.2.1)

Donde F_e^i y F_{ce}^i son conjuntos difusos de entrada y $W_{\Delta u_{fc}}^i$ es alguno de los conjuntos difusos tipo Singleton del universo de discurso de la variable de salida Δu_{fc} .

Como se observa en la expresión 5.2.1, la operación de enlace de los antecedentes de las reglas difusas es la operación intersección (AND u operación *min*). Para enlazar las reglas difusas se usa la operación unión (OR u operación *max*), que se analiza más a detalle en la siguiente sección.

El número de reglas difusas empleadas se obtiene evaluando la siguiente expresión:

$$No. Conjuntos Difusos^{No. Entradas}$$
 (5.2.2)

En total se han propuesto 25 reglas difusas derivadas de los criterios anteriores. La Tabla 5.2.1 muestra de forma concisa cada una de las reglas que forman la base de conocimiento.

5.2 Controlador Difuso Tipo 1 (Convencional)

Tabla 5.2.1: Reglas Difusas de Control (Base de Conocimiento) para el Convertidor.

e/ce	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NBO	NBO	NBO	NSO	ZO
NS	NBO	NBO	NSO	ZO	PSO
Z	NBO	NSO	ZO	PSO	PBO
PS	NSO	ZO	PSO	PBO	PBO
PB	ZO	PSO	PBO	PBO	PBO

En términos prácticos, la manera en que se implanta la base de conocimiento en el controlador difuso, es la siguiente: a cada valor o conjunto difuso (NB, NS, Z, PS y PB) de los antecedentes se le asigna un valor numérico (1, 2, 3, 4 y 5) y de forma análoga se establece un valor numérico (3, 4, 5, 6 y 7) para cada valor difuso de los consecuentes (NBO, NSO, ZO, PSO Y PBO). Es decir, una regla difusa de la forma 5.2.1, se puede escribir como una combinación de valores numéricos.

Por ejemplo, si tenemos la siguiente regla difusa:

si e es NB y ce es PB entonces Δu_{fc} es ZO

Su forma numérica es:

[155]

donde los dos primeros números hacen referencia a los antecedentes de la regla difusa y el último dígito al consecuente de la regla correspondiente. Por tanto, cada regla difusa se puede visualizar como un vector de 3 posiciones, es decir, la base de conocimiento completa es una matriz de 25x3.

Tabla 5.2.2: Base de Conocimiento en forma numérica para el Control del Convertidor.

e/ce	1	2	3	4	5
1	3	3	3	4	5
2	3	3	4	5	6
3	3	4	5	6	7
4	4	5	6	7	7
5	5	6	7	7	7

Esta asignación de valores numéricos se puede realizar designando arbitrariamente valores o utilizando, si el sistema o plataforma de programación lo permite, un comando de enumeración automática (*enum*).

5 Implementación de Controladores Difusos para Convertidores DC/DC.

El uso de valores numéricos para representar expresiones difusas facilita la programación y manejo computacional de las reglas difusas, ya que, usando valores numéricos, es posible simplificar los cálculos necesarios para obtener la fuerza de activación de las reglas difusas en el proceso de inferencia (motor de inferencia).

5.2.3. Motor de Inferencia Difusa

El método empleado en el desarrollo del controlador es el de Implicación Mínima de Mamdani, ya que es el procedimiento más comúnmente usado. Este proceso (motor de inferencia) se divide en dos tareas [30]:

- 1. La primera tarea es determinar el grado en que cada regla es relevante para a la situación actual caracterizada por las entradas (fuerza de activación *firing strenght*). A esta tarea se le denomina concordancia o correspondencia (*matching*).
- 2. La segunda tarea es la obtención de conclusiones usando las entradas actuales y la información de la base de reglas. A esta parte se le conoce como etapa de inferencia (inference step).

Antes de obtener la fuerza de activación de cada regla es necesario convertir la matriz numérica de reglas difusas (ver Tabla 5.2.2) en una matriz que incluya los valores de membresía obtenidos en el proceso de fuzzificación. Es decir, se cambian los valores numéricos asignados a cada conjunto difuso por el grado de membresía de cada valor de entrada para cada uno de los conjuntos difusos. Para los valores de salida, solamente se intercambia el valor numérico asignado al conjunto difuso por el valor del Singleton.

Por ejemplo, se tiene la regla difusa

si e es NS y ce es PS entonces Δu_{fc} es ZO

entonces su forma numérica es:

[244]

Ahora, suponiendo que el valor de las entradas *e* y *ce* sean -0.8 y 0.2 respectivamente; el grado de membresía de la variable *e* para el conjunto difuso NS sería de 0.3. De forma análoga, el grado de membresía de la variable *ce* para el conjunto Z sería 0.7. Finalmente el valor asociado al conjunto difuso de salida ZO sería el Singleton 0. Por tanto, la regla difusa mostrando los valores de membresía tendría la siguiente forma:

5.2 Controlador Difuso Tipo 1 (Convencional)

 $[0.3\ 0.7\ 0]$

Este proceso se repite para cada una de las reglas difusas de la base de conocimiento. Por consiguiente, se genera una nueva matriz de reglas difusas que muestra los grados de membresía de los valores de entrada en los conjuntos difusos, como se visualiza en la Tabla 5.2.3.

Tabla 5.2.3: Matriz de Reglas Difusas mostrando Grados de Membresía para e = -0.8 y ce = 0.2.

J					
Regla	e	ce	Δu		
1	0.7	0	-1		
2	0.7	0	-1		
3	0.7	0.3	-1		
4	0.7	0.7	-0.5		
5	0.7	0	0		
6	0.3	0	-1		
7	0.3	0	-1		
8	0.3	0.3	-0.5		
9	0.3	0.7	0		

Regla	e	ce	Δu
10	0.3	0	0.5
11	0	0	-1
12	0	0	-0.5
13	0	0.3	0
14	0	0.7	0.5
15	0	0	1
16	0	0	-0.5
17	0	0	0

Regla	e	ce	Δu
18	0	0.3	0.5
19	0	0.7	1
20	0	0	1
21	0	0	0
22	0	0	0.5
23	0	0.3	1
24	0	0.7	1
25	0	0	1

En el método de Inferencia Mínima de Mamdani, el resultado de inferencia de cada regla se conforma con dos valores: el primero es el valor de salida Singleton $w_{\Delta u_{fc}}$ y el segundo es la fuerza de activación fs ($firing\ strenght$) de la regla correspondiente. Esta fuerza de activación se obtiene encontrando el valor mínimo (min) de los grados de membresía de los valores de entrada para cada conjunto difuso de los antecedentes. El resultado de inferencia para la i- $\acute{e}sima$ regla se define de la siguiente forma:

$$z^{i} = min\left\{\mu_{F_{e}^{i}}(e), \mu_{F_{ce}^{i}}(ce)\right\} \cdot w_{\Delta u_{fc}}^{i} = fs^{i} \cdot w_{\Delta u_{fc}}^{i}$$
 (5.2.3)

Con el fin de simplificar el proceso computacional, si alguna regla de la Tabla 5.2.3 tiene un cero en los antecedentes, entonces la regla no se toma en cuenta, ya que su fuerza de activación es cero. Por lo tanto, la matriz de reglas difusas se reduce a la siguiente forma:

Tabla 5.2.4: Matriz de Reglas Difusas Activadas.

Regla	e	ce	Δu
3	0.7	0.3	-1
4	0.7	0.7	-0.5
8	0.3	0.3	-0.5
9	0.3	0.7	0

S TESIS TESIS TESIS TESIS

5 Implementación de Controladores Difusos para Convertidores DC/DC.

El proceso de inferencia se centra ahora en las reglas difusas que son activadas. La salida inferida de cada regla se obtiene al aplicar la Ecuación 5.2.3. Es decir, las salidas inferidas de cada una de las reglas difusas activadas es la multiplicación de la fuerza de activación por el valor Singleton de salida de cada regla difusa, como se muestra en la tabla 5.2.5.

		1	
Regla	fs	WΔu	z
3	0.3	-1	-0.3
4	0.7	-0.5	-0.35
8	0.3	-0.5	-0.15
9	0.3	0	0

Tabla 5.2.5: Valor de Salida Inferido para cada Regla Difusa Activada.

5.2.4. Defuzzificación

El último bloque del controlador difuso es el Defuzzificador, el cual genera un resultado duro de salida a partir de un valor de salida lingüístico (difuso) resultante de la agregación de las salidas inferidas generadas por el motor de inferencia.

El método de defuzzificación aplicado es el Defuzzificador de Altura (*Height Defuzzifier*), que produce una salida dura del controlador mediante el cálculo de la suma lógica de los resultados de inferencia de las reglas difusas activadas. La salida total del controlador se obtiene evaluando la siguiente expresión:

$$\Delta u_{fc} = \frac{\sum_{i=1}^{N} f s^{i} \cdot w_{\Delta u_{fc}}^{i}}{\sum_{i=1}^{N} f s^{i}}$$
 (5.2.4)

donde N es el número de reglas difusas activadas, fs la fuerza de activación de la correspondiente regla y $w_{\Delta u_{fc}}$ el valor Singleton de salida de la i- $\acute{e}sima$ regla. Por tanto, continuando con el ejemplo, el valor de salida duro Δu_{fc} del controlador para los valores de entrada e = -0.8 y ce = 0.2 es:

$$\Delta u_{fc} = \frac{(0.3) \cdot (-1) + (0.7) \cdot (-0.5) + (0.3) \cdot (-0.5) + (0.3) \cdot (0)}{(0.3) + (0.7) + (0.3) + (0.3)}$$

$$= \frac{-0.8}{1.6}$$

$$= -0.5$$
(5.2.5)

5.3. Controlador Difuso Tipo 2

Como se describe en el capítulo 4, la implementación de un controlador difuso tipo 2 es más compleja que la implementación de un controlador difuso convencional. Por tanto, la aplicación del método de implementación de controladores difusos tipo 2 presentado por Castillo et al [19] simplifica esta acción. Por esta razón se ha seleccionado y aplicado en este trabajo. Este procedimiento propone el uso de dos controladores difusos convencionales (tipo 1) para emular un controlador difuso tipo 2. Por tanto, las funciones de membresía, el proceso de fuzzificación, la inferencia difusa y la defuzzificación aplicados son de Tipo 1. Las funciones de membresía son organizadas de tal manera, que sean capaces de emular las huellas de incertidumbre de un sistema difuso tipo 2.

En general, el método consta de los siguientes pasos:

5.3.1. Sustitución de Funciones de Membresía Tipo 2 por Funciones de Membresía Tipo 1

Se sustituye cada función de membresía tipo 2, por dos funciones de membresía tipo 1. Para realizar esto, la huella de incertidumbre (*FOU*) de cada función es reemplazada por dos funciones de membresía tipo 1. El primer controlador difuso tipo 1 es construido usando las funciones de membresía superiores, y el segundo controlador se implementa usando las funciones de membresía inferiores. Por tanto las funciones de membresía superiores e inferiores que conforman la huella de incertidumbre asociada a las variables *e* y *ce* se muestra a continuación:

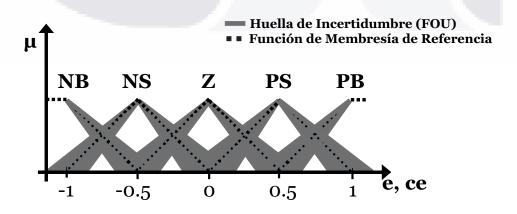


Figura 5.3.1: Huella de Incertidumbre de los Conjuntos Difusos Tipo 2.

TESIS TESIS TESIS TESIS

5 Implementación de Controladores Difusos para Convertidores DC/DC.

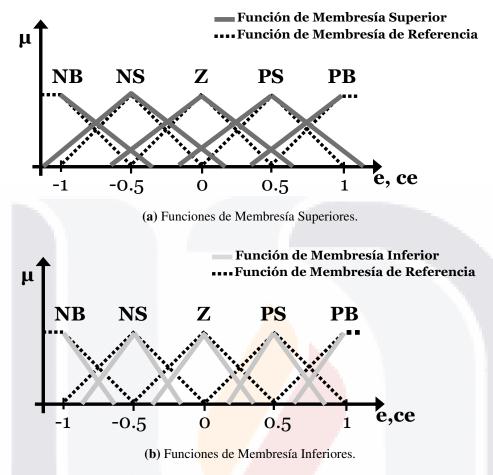


Figura 5.3.2: Funciones de Membresía Superiores e Inferiores.

Haciendo referencia a las funciones de membresía de los conjuntos difusos tipo 2 de salida, hay que mencionar que son tipo Singleton. Por tanto en lugar de tener un valor único, cada Singleton tiene asociada una huella de incertidumbre como se muestra en la figura 5.3.3.

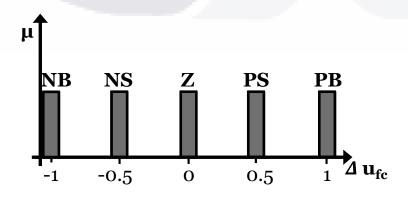


Figura 5.3.3: Conjuntos Difusos Tipo 2 de Salida Singletons.

Para el controlador difuso tipo 1 definido por las funciones de membresía superiores, se toman como conjuntos difusos de salida a los valores límites superiores de los conjuntos Singletons tipo 2 de salida. De forma análoga, para el controlador difuso tipo 1 definido por las funciones de membresía inferiores se eligen como conjuntos difusos de salida a los valores límites inferiores de los Singletons tipo 2 de salida.

Tabla 5.3.1: Base de Conocimiento del Controlador Difuso Tipo 1 Superior

e/ce	NBU	NSU	ZU	PSU	PBU
NBU	NBO+δ	NBO+δ	NBO+δ	NSO+δ	ZO+δ
NSU	NBO+δ	NBO+δ	NSO+δ	ZO+δ	PSO+δ
ZU	NBO+δ	NSO+δ	Z O+δ	PSO+δ	РВО+δ
PSU	NSO+δ	ZO+δ	PSO+δ	PBO+δ	PBO+δ
PBU	ZO+δ	PSO+δ	PBO+δ	PBO+δ	РВО+δ

Tabla 5.3.2: Base de Conocimiento del Controlador Difuso Tipo 1 Inferior

e/ce	NBL	NSL	ZL	PSL	PBL
NBL	NBO-δ	NBO-δ	NBO-δ	NSO-δ	ZO-δ
NSL	NBO-δ	NBO-δ	NSO-δ	ZO-δ	PSO-δ
ZL	NBO-δ	NSO-δ	ZO-δ	PSO-δ	PBO-δ
PSL	NSO-δ	ZO-δ	PSO-δ	PBO-δ	PBO-δ
PBL	ZO-δ	PSO-δ	PBO-δ	PB-δ	РВО-δ

5.3.2. Reemplazo del Sistema de Inferencia Tipo 2

Para suplir el sistema de inferencia difuso tipo 2 es necesario generar el proceso de inferencia para cada controlador difuso tipo 1 en la forma tradicional. Por tanto, este proceso no presenta cambios de un controlador a otro y puede ser aplicado a ambos controladores.

10 DSIS 10 DSIS 10 DSIS 1070

5 Implementación de Controladores Difusos para Convertidores DC/DC.

5.3.3. Sustitución de Reductor de Tipo y Defuzzificador

Para reemplazar las etapas de reducción de tipo y de defuzzificación de un sistema difuso tipo 2, es necesario obtener el valor duro de salida defuzzificado de cada controlador difuso tipo 1 en la forma tradicional y obtener un promedio de ambos valores. La Figura 5.3.4 esquematiza este proceso:

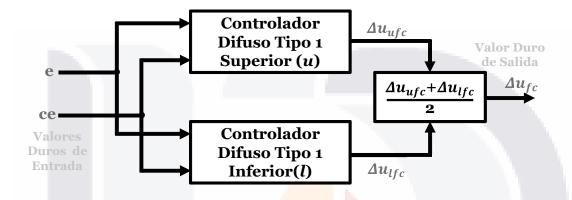


Figura 5.3.4: Proceso de reemplazo de Etapas de Reducción de Tipo y de Defuzzificación.

6 Resultados

En este capítulo se analiza el desempeño de los controladores difusos tanto tipo 1 como tipo 2, implementados en el capítulo anterior, en el control de un convertidor de DC/DC Buck. Este proceso se realizó a nivel de simulación utilizando el entorno basado en diagramas de bloques para la simulación multidominio y diseño basado en modelos, *Simulink* de *MatLab* [35].

Se examina y compara el desempeño del convertidor Buck controlado mediante: un control PI (Proporcional-Integral), un control difuso convencional (tipo 1) y un control difuso tipo 2. Los parámetros de comparación examinados son el Voltaje de Salida Promedio, el Error Estado Estable y Voltaje de Rizo de Salida. Estas simulaciones se realizaron en las siguientes situaciones: Caso Nominal (sin variaciones), Caso con Variaciones en la Carga (100 a 50 Ω) y Caso con Variaciones en el Voltaje de Alimentación (24 a 20 v).

Antes de analizar estas simulaciones es importante examinar los aspectos más importantes del sistema a evaluar.

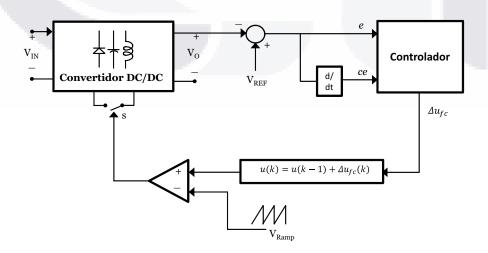


Figura 6.0.1: Esquema General del Sistema a Simular

ESIS TESIS TESIS TESIS T₇₉SI

6 Resultados

6.1. Diagrama General del Sistema.

La Figura 6.0.1 muestra el esquema general del sistema a simular. Los bloques que lo conforman se analizan a continuación:

6.1.1. Convertidor DC/DC

El convertidor de DC/DC a analizar es un convertidor Buck (reductor). Este convertidor está construido mediante bloques de simulación eléctricos/electrónicos. La mayoría de estos elementos provienen del *toolbox* SimPowerSystems de Simulink. Los parámetros del convertidor se presentan en la Tabla 6.1.1.

ParámetroValorInductor L500 μH Capacitor C440 μF Resistencia Carga R_L 100 - 50 Ω Voltaje de Entrada V_{IN} 24 -20 ν Voltaje de Referencia V_{REF} 10 ν Frecuencia de Muestreo F_S 1 MHz

Tabla 6.1.1: Parámetros del Convertidor.

6.1.2. Controlador

El bloque Controlador cuenta con dos entradas: *e* error de voltaje de salida y *ce* cambio en este error. Este controlador, como se mencionó anteriormente, puede ser proporcional-integral, difuso tipo 1 o difuso tipo 2. Este bloque se construye utilizando una Función S de 2do. Nivel de Simulink (*2 Level M- file S-Function*).

6.1.3. Señal de error en el voltaje de salida e(k)

La señal de error en el voltaje de salida e se obtiene al restar al valor de Voltaje de Referencia V_{REF} (en este caso 10 v), el valor del voltaje de salida V_O en el tiempo k. Es decir:

$$e(k) = V_{REF} - V_O(k) \tag{6.1.1}$$

6.1 Diagrama General del Sistema.

6.1.4. Derivador Numérico (d/dt), señal ce(k)

Las variables de entrada al controlador son e y ce, por tanto es necesario obtener la derivada numérica de la señal e, ya que, el cambio con respecto al tiempo (ce) en la señal e puede ser tomado como la derivada numérica de e, es decir, $ce = \frac{de}{dt}$. El cambio en la señal de error de voltaje de entrada ce se puede expresar de la siguientes forma:

$$ce(k) = e(k) - e(k-1)$$
 (6.1.2)

La señal ce es la variación del error en el tiempo k con respecto al tiempo k-1. La Ecuación 6.1.2, es una ecuación en diferencias y se implementa utilizando una Función S de 2do. Nivel de Simulink (2 Level M- file S-Function).

6.1.5. Forma de Onda de Referencia u(k)

La salida del controlador Δu_{fc} es el cambio de la forma de onda de referencia, la cual determina la variación en el ciclo de trabajo del convertidor. La forma de onda de referencia u(k) se define mediante la suma de la forma de onda de referencia anterior u(k-1) más el cambio forma de onda de referencia Δu_{fc} actual. Es decir:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u_{fc}(k) \tag{6.1.3}$$

La ecuación anterior, es una ecuación en diferencias que representa un proceso de integración, el cual tiene como objetivo disminuir el error de estado estable del sistema. Al igual que el bloque derivador, esta expresión se aplica utilizando una Función S de 2do. Nivel de Simulink (2 Level M- file S-Function).

6.1.6. Bloque de Comparación con Rampa (V_{RAMP})

La señal u(k) se compara con una señal rampa (V_{RAMP}) para generar la señal modulada por ancho de pulso (PWM *Pulse Width Modulation*) que se aplica al convertidor.

Para concluir la descripción del sistema, hay que mencionar que las simulaciones se realizaron en tiempo discreto, con el objetivo de facilitar la implementación de los controladores, ya que esta realización fue llevada a cabo mediante estructuras de programación. Además, el uso de de ecuaciones en diferencias (las cuales definen varios bloques elementales del sistema) implica el empleo de tiempo discreto en la simulación. La frecuencia de muestreo usada en todo el sistema fue de 1MHz. Esta frecuencia fue configurada en Simulink y heredada a cada una de los elementos del sistema.

TESIS TESIS TESIS TESIS

6 Resultados

6.2. Caso Nominal (Sin Variaciones)

En este caso las simulaciones del sistema se desarrollaron sin hacer cambios en la Resistencia de Carga (R_L) ni en el Voltaje de Alimentación (V_{IN}). La Figura 6.2.1 muestra de forma general el esquema de las simulaciones realizadas, cada una de ellas teniendo solamente como variación el uso de los diferentes tipos de controladores implementados: controlador PI, controlador difuso tipo 1 y controlador difuso tipo 2. El tiempo de duración de cada simulación fue de 0.7 segundos. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la Tabla 6.2.1.

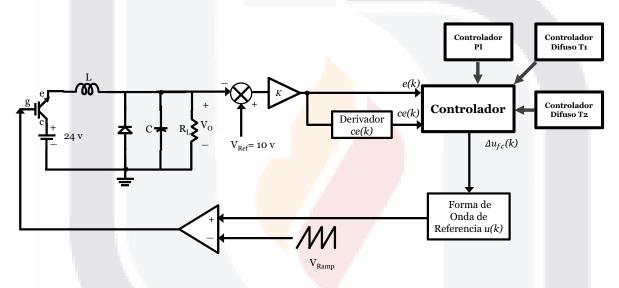


Figura 6.2.1: Diagrama de Bloques de las Simulaciones del Caso Nominal.

En la Tabla 6.2.1 y en las Figuras 6.2.2, 6.2.3 y 6.2.4, se puede apreciar que el controlador difuso tipo 2 tuvo un desempeño superior en el Caso Nominal que el obtenido por los controladores PI y difuso tipo 1, usando como parámetros de comparación al Voltaje Promedio de Salida, al Error en Estado Estable y al Voltaje de Rizo de Salida.

Haciendo un análisis más detallado, el Voltaje Promedio de Salida al utilizar el controlador difuso tipo 2 es de 10.395 volts, es decir tiene un Error en Estado Estable de 0.395 volts, por tanto, en comparación con los otros controladores se acerca más al valor de referencia deseado V_{REF} =10 volts. En este parámetro el uso del controlador difuso tipo 2 presenta una mejora del 10.9% respecto al valor obtenido por el controlador difuso convencional (tipo 1) y de un 18.7% con relación al controlador PI.

SES TESIS TESIS TESIS TESIS

Tabla 6.2.1: Resultados de Simulaciones en el Caso Nominal.

Tipo de Controlador	Voltaje de Salida Promedio (volts)	Error Estado Estable (volts)	Voltaje de Rizo de Salida (<i>volt</i> s)
Proporcional Integral (PI)	10.486	0.486	0.0781
Difuso Tipo 1 (T1FLC)	10.443	0.443	0.0403
Difuso Tipo 2 (T2FLC)	10.395	0.395	0.0365

Tomando en cuenta al Voltaje de Rizo de Salida, el controlador difuso tipo 2 obtiene un valor de 0.0365 volts con respecto a un valor de 0.0403 volts conseguido por el controlador difuso tipo 1 y de un valor de 0.0781 volts alcanzado por el controlador PI. Hay que recordar que mientras más cercano sea el valor del Voltaje de Rizo de Salida a cero, mejor es el desempeño del controlador. Por tanto, el controlador difuso tipo 2 tiene una mejora del 9.42% con respecto al valor obtenido por el controlador difuso convencional (tipo 1) y de un 53.2% con relación al controlador PI.

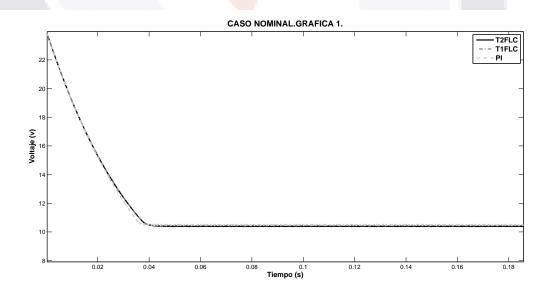


Figura 6.2.2: Caso Nominal. Gráfica 1.

6 Resultados

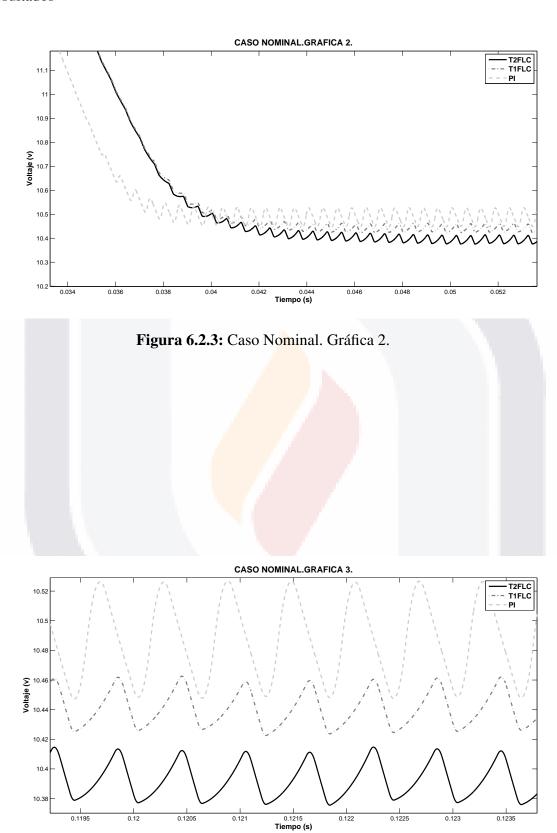


Figura 6.2.4: Caso Nominal. Gráfica 3.

TESIS TESIS TESIS TESIS

6.2 Caso Nominal (Sin Variaciones)

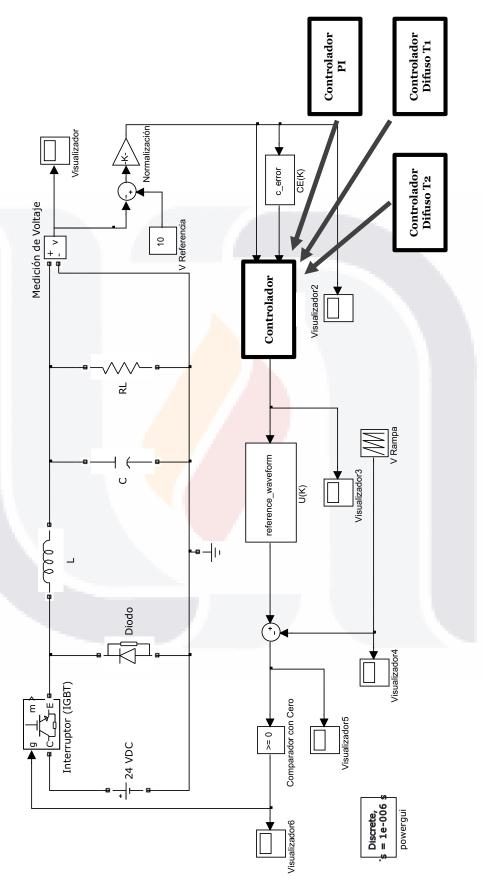


Figura 6.2.5: Diagrama de Bloques en Simulink. Caso Nominal.

6 Resultados

6.3. Caso con Variaciones en Carga (100 a 50 Ω)

Para este caso, las simulaciones realizadas presentan una variación en la Resistencia de Carga (R_L) de 100 Ω a 50 Ω . Esta variación se genera al activar de forma alternada los interruptores T_1 y T_2 . Es decir, el interruptor T_1 está activado en el intervalo de tiempo de 0 a 0.35 segundos. Una vez que se ha cumplido este intervalo, el interruptor T_1 se apaga y de forma simultánea se activa el interruptor T_2 en un intervalo de tiempo de 0.35 a 0.7 segundos. El tiempo de duración de cada simulación fue de 0.85 segundos, esto con el objetivo de poder visualizar el cambio de 100 Ω a 50 Ω y de nueva cuenta el cambio de 50 Ω a 100 Ω .

En la Figura 6.3.1 se muestra de forma general el esquema de las simulaciones realizadas, en las cuales se puede observar el cambio de los diferentes tipos de controladores implementados: controlador PI, controlador difuso tipo 1 y controlador difuso tipo 2 de forma análoga a lo presentado en la sección caso anterior. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la Tabla 6.2.1.

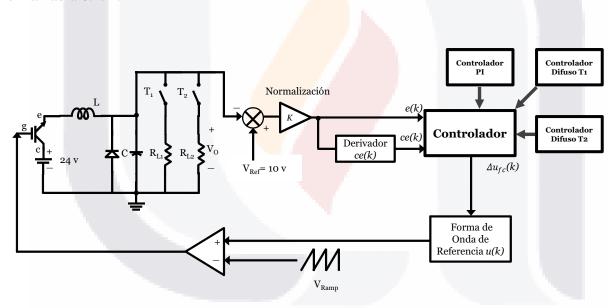


Figura 6.3.1: Diagrama de Bloques de las Simulaciones del Caso con Variación de Carga.

En la Tabla 6.3.1 y en las Figuras 6.3.2, 6.3.3, 6.3.4 y 6.3.5, es posible apreciar de nueva cuenta que el desempeño del controlador difuso tipo 2, analizado bajo los parámetros de Voltaje de Salida Promedio y de Error en Estado Estable, es superior que el obtenido por los otros controladores implementados. Al emplear un controlador difuso tipo 2 se obtiene un valor de Voltaje de Salida Promedio de 9.996 volts, es decir, sólo tiene un Error en Estado Estable de 0.004 volts (valor absoluto).

0.004

0.047

Tipo de Controlador	Voltaje de Salida Promedio (volts)	Error Estado Estable (volts)	Voltaje de Rizo de Salida (volts)
Proporcional Integral (PI)	10.287	0.287	0.111
Difuso Tipo 1 (T1FLC)	10.095	0.095	0.0572
Difuso Tipo 2	0.006	0.004	0.047

9.996

(T2FLC)

Tabla 6.3.1: Resultados de Simulaciones en el Caso con Variaciones de Carga.

El controlador difuso convencional presenta un Voltaje de Salida Promedio de 10.095 volts y por ende, un Error en Estado Estable de 0.095 volts. Finalmente, al aplicar el controlador PI, se alcanza un Voltaje de Salida Promedio de 10.287 volts y un Error en Estado Estable de 0.287 volts. Es decir, el controlador difuso tipo 2 tiene una reducción del 95.7% del Error en Estado Estable con respecto al controlador difuso tipo 1 y una disminución del 98.6% con respecto al valor obtenido por el controlador PI.

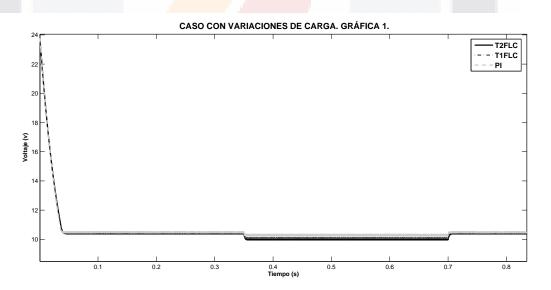


Figura 6.3.2: Caso con Variación de Carga (100 a 50 Ohms). Gráfica 1.

Analizando los resultados obtenidos bajo el parámetro de Voltaje de Rizo de Salida,con el controlador difuso tipo 2 se obtiene un valor de 0.047 volts con respecto a un valor de 0.0572 volts conseguido por el controlador difuso tipo 1 y de un valor de 0.111 volts alcanzado por el controlador PI.

6 Resultados

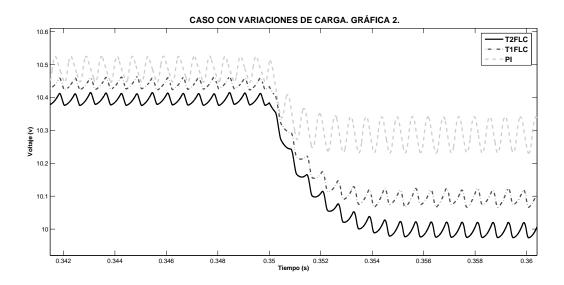


Figura 6.3.3: Caso con Variación de Carga (100 a 50 Ohms). Gráfica 2.

Por tanto, el controlador difuso tipo 2 tiene una mejora del 17.8% con respecto al valor obtenido por el controlador difuso convencional (tipo 1) y de un 57.6% con relación al controlador PI.

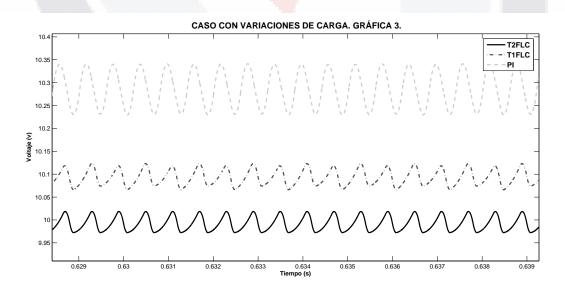


Figura 6.3.4: Caso con Variación de Carga (100 a 50 Ohms). Gráfica 3.

FESIS TESIS TESIS TESIS

6.4 Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts)

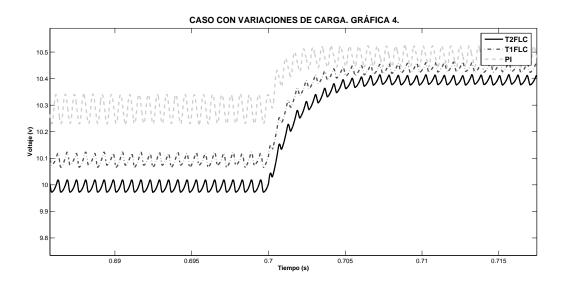


Figura 6.3.5: Caso con Variación de Carga (100 a 50 Ohms). Gráfica 4.

6.4. Caso con Vari<mark>ación de Vo</mark>ltaje de Alimentación (24 a 20 volts)

Las simulaciones realizadas en esta ocasión presentan una variación en el Voltaje de Alimentación (V_{IN}) de 24 volts a 20 volts. De forma análoga al caso anterior, esta variación se genera al activar de forma alternada los interruptores T_1 y T_2 . El interruptor T_1 está activado en un intervalo de tiempo de 0 a 0.35 segundos. Una vez que ha pasado este lapso de tiempo, el interruptor T_1 se apaga y de forma instantánea se activa el interruptor T_2 en un intervalo de tiempo de 0.35 a 0.7 segundos. El tiempo de duración de cada simulación fue de 0.85 segundos, lo cual permite poder visualizar el cambio de 24 a 20 volts y de nueva cuenta, el cambio de 20 a 24 volts.

En la Figura 6.4.2 se muestra un diagrama general de las simulaciones realizadas para cada uno de los controladores implementados: controlador PI, controlador difuso tipo 1 y controlador difuso tipo 2. La Tabla 6.4.1 muestra los resultados de estas simulaciones.

Como observa en la Tabla 6.4.1 y en las Figuras 6.4.3, 6.4.4, 6.4.5 y 6.4.6, el desempeño del controlador difuso tipo 2 analizado bajo los parámetros del Voltaje de Salida Promedio, del Error en Estado Estable y del Voltaje de Rizo de Salida, es superior que el obtenido por los otros controladores aplicados.

6 Resultados

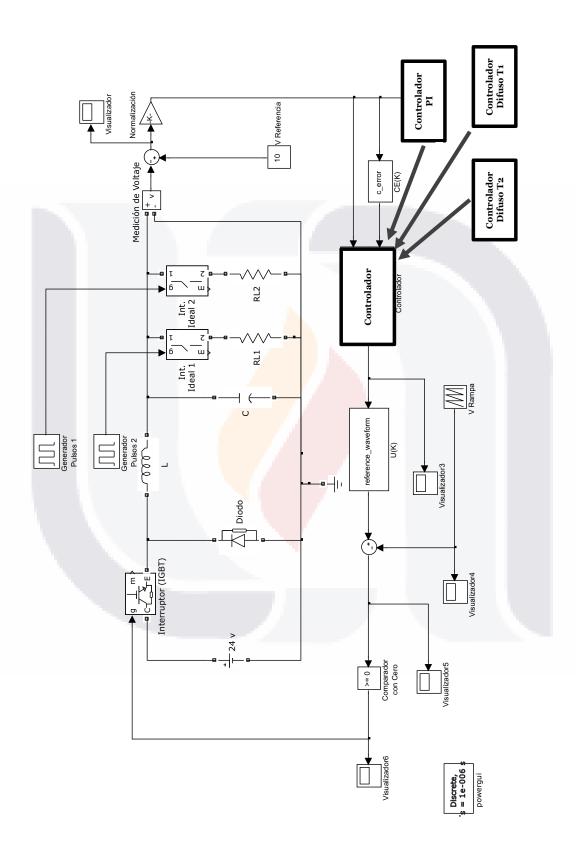


Figura 6.4.1: Diagrama de Bloques en Simulink. Caso Variación de Carga.

6.4 Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts)

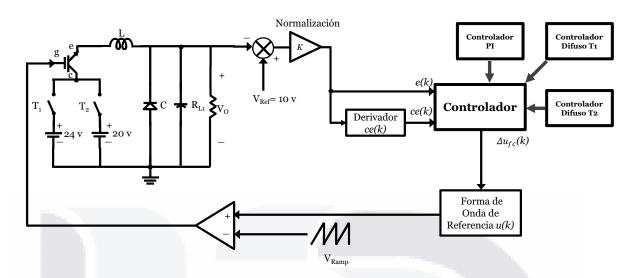


Figura 6.4.2: Diagrama de Bloques de las Simulaciones del Caso con Variación de Voltaje de Alimentación.

Usando un controlador difuso tipo 2 se obtiene un valor de Voltaje de Salida Promedio de 9.979 volts, esto implica que sólo presenta un Error en Estado Estable de 0.021 volts (valor absoluto). En comparación, el controlador difuso tipo 1 presenta un Voltaje de Salida Promedio de 10.069 volts y por ende, un Error en Estado Estable de 0.066 volts. Finalmente, al aplicar el controlador PI, se alcanza un Voltaje de Salida Promedio de 10.323 volts y un Error en Estado Estable de 0.323 volts. Por tanto, el controlador difuso tipo 2 tiene una reducción del 68.2% del Error en Estado Estable con respecto al controlador difuso tipo 1 y una disminución del 93.5% con respecto al valor obtenido por el controlador PI.

Tabla 6.4.1: Resultados de Simulaciones en el Caso con Variaciones de Voltaje de Alimentación.

Tipo de Controlador	Voltaje de Salida Promedio (volts)	Error Estado Estable (volts)	Voltaje de Rizo de Salida (volts)
Proporcional Integral (PI)	10.323	0.323	0.0715
Difuso Tipo 1 (T1FLC)	10.066	0.066	0.042
Difuso Tipo 2 (T2FLC)	9.979	0.021	0.0399

TESIS TESIS TESIS TESIS

6 Resultados

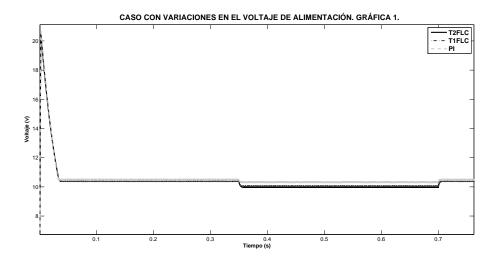


Figura 6.4.3: Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts). Gráfica 1.

Examinando los resultados obtenidos bajo el parámetro de Voltaje de Rizo de Salida, el controlador difuso tipo 2 obtiene un valor de 0.0399 volts con respecto a un valor de 0.042 volts conseguido por el controlador difuso tipo 1 y de un valor de 0.0715 volts alcanzado por el controlador PI. Por tanto, el controlador difuso tipo 2 presenta una mejora del 5% con respecto al valor obtenido por el controlador difuso convencional (tipo 1) y de un 44.2% con relación al controlador PI.

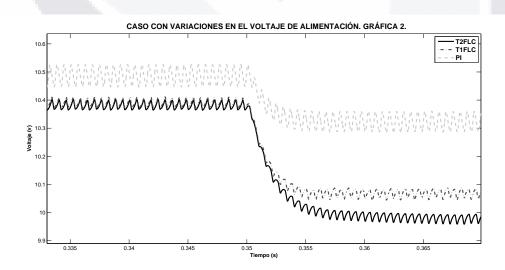


Figura 6.4.4: Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts). Gráfica 2.

6.4 Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts)

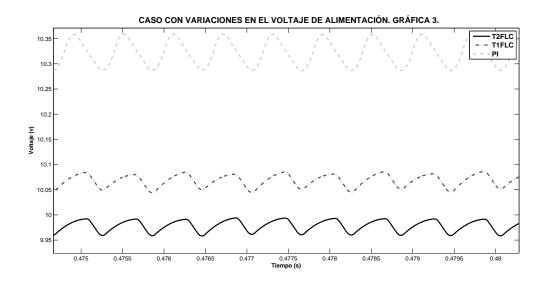


Figura 6.4.5: Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts). Gráfica 3.

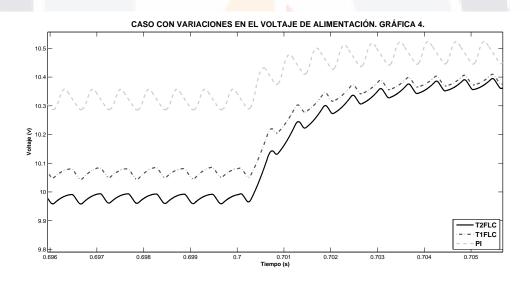


Figura 6.4.6: Caso con Variación de Voltaje de Alimentación (24 a 20 volts). Gráfica 4.

6 Resultados

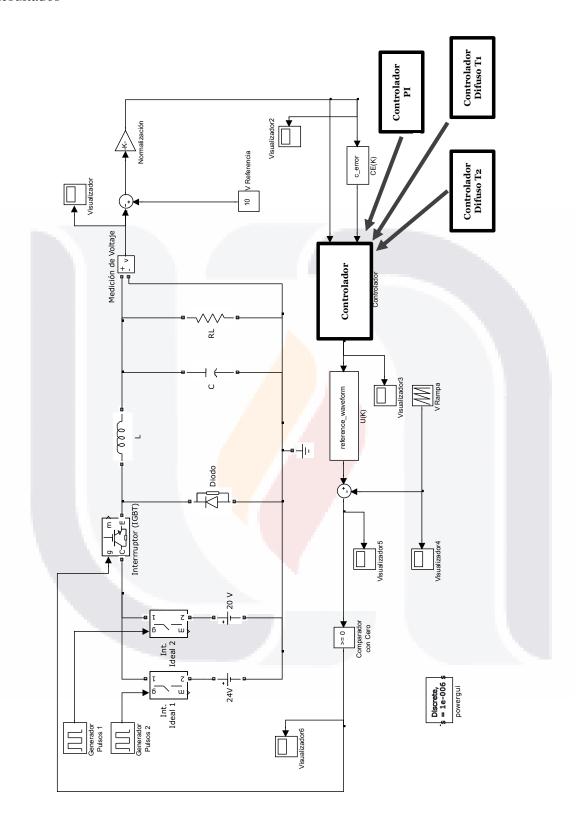


Figura 6.4.7: Diagrama de Bloques en Simulink. Caso Variación de Voltaje de Alimentación.

TES94S TESIS TESIS TESIS

7 Conclusiones y Trabajo Futuro

7.1. Conclusiones

El procedimiento empleado para implementar los controladores difusos tipo 1 y tipo 2 es sumamente robusto, ya que, en todo el desarrollo de esta investigación, no hubo la necesidad de modificar en forma sustancial su estructura; incluso para el desarrollo del controlador difuso tipo 2, sólo fue necesario añadir algunos recursos de software. Además la manera en que se han llevado a cabo, permite de forma simple, desarrollar controladores difusos convencionales (tipo 1) y tipo 2 adecuados para una implementación computacional sin perder su eficacia, sobre todo cuando son usados en problemas de naturaleza no lineal o que presentan incertidumbre en alguno de sus parámetros de diseño. Esta implementación puede aplicarse sin problemas en diversas plataformas como una PC, un μC, una FPGA, un DSP, etc.

Un convertidor de DC/DC, como ya se mencionó anteriormente, es un sistema altamente no lineal, lo que implica que su modelado matemático y control no sean triviales, por tanto, la aplicación de controladores basados en Lógica Difusa tipo 1 y tipo 2 es sumamente adecuada ya que elimina la necesidad de emplear el modelo matemático del sistema y concentra el trabajo en el uso de la experiencia de un experto.

Los controladores difusos tipo 1 han demostrado un desempeño adecuado al controlar convertidores de DC/DC, sobre todo en casos donde se presentan variaciones en la carga y en el voltaje de alimentación. Pero, su principal deficiencia es que son incapaces de manejar la incertidumbre en las reglas difusas y por ende en las funciones de membresía de los conjuntos difusos. En cambio, los controladores difusos tipo 2, no solamente pueden manejar esta incertidumbre sino que la usan para mejorar su desempeño.

Al realizar un estudio comparativo entre un controlador PI, un controlador difuso tipo 1 y un controlador difuso tipo 2 aplicados a un convertidor Buck, el controlador difuso tipo 2 tuvo un desempeño superior en todos los casos analizados. Es decir, en el caso nominal (sin variaciones), en el caso con variaciones en la carga y en el caso donde se presentaron variaciones en el voltaje de alimentación. Este análisis se efectuó tomando como parámetros

7 Conclusiones y Trabajo Futuro

de comparación al Error en Estado Estable, al Voltaje Promedio de Salida y al Voltaje de Rizo de Salida.

Es importante mencionar que el desempeño del controlador difuso tipo 2 se incrementa en sistemas que presentan variaciones en sus parámetros de diseño (incertidumbre), es decir, en sistemas en los cuales su punto de operación cambia. Lo anterior se pudo observar en los casos donde se aplicó una variación en la resistencia de carga y/o en el voltaje de alimentación.

Se considera que se podría mejorar el desempeño de un controlador difuso tipo 2 aplicado a un convertidor de DC/DC si se incluye como variable de entrada a la corriente del inductor, esto con el objetivo de modelar de forma más precisa el comportamiento del sistema. Por ejemplo, en un convertidor Boost o Sepic, la corriente en el inductor proporciona más información de la dinámica del sistema que el que la suministrada por el Voltaje de Salida.

Un inconveniente encontrado en la implementación de estos controladores es que necesitan una velocidad de procesamiento alta, ya que si no se cuenta con un valor adecuado de este parámetro, el desempeño de los controladores decae.

A partir de las revisiones bibliográficas realizadas, se puede concluir que la Lógica Difusa tipo 2 es una gran área de oportunidad para desarrollar investigaciones futuras, ya que su estudio no se ha generalizado. Lo anterior hace pensar en la pertinencia y novedad de este tema de tesis.

7.2. Trabajo Futuro

Algunos puntos que se pueden desarrollar en el futuro son:

- Aplicar los controladores difusos tipo 1 y tipo 2 en otros convertidores de DC/DC como pueden ser las topologías: Boost, Buck-Boost, Cuk, Sepic, etc.
- Explorar nuevos esquemas de control basados en variables diferentes a las usadas en este trabajo, por ejemplo, el cambio en la corriente del inductor. Comparar el desempeño de estos nuevos esquemas de control con los resultados obtenidos en esta investigación.
- Emplear otros tipos de conjuntos difusos tipo 2 para desarrollar nuevos controladores.
 Comparar el desempeño de estos nuevos controladores con los resultados alcanzados en este trabajo.
- Implementar todos estos controladores en diferentes plataformas de desarrollo como: dispositivos reconfigurables (FPGA, CPLD), microcontroladores, DSP's o incluso fabricarlos en un tecnología CMOS estándar.

Glosario

Controlador Componente o conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados.

Controlador PID Un controlador PID se caracteriza por combinar tres acciones (P, I y D) mediante el siguiente algoritmo de control:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] = P + I + D$$

A continuación se resumen los términos básicos:

- Acción proporcional (P): es la acción que produce una señal proporcional a la desviación de la salida del proceso respecto al punto de consigna.
- Acción integral (I): es la acción que produce una señal de control proporcional al tiempo que la salida del proceso ha sido diferente del punto de consigna.
- Acción derivativa (D): es la acción que produce una señal de control proporcional a la velocidad con que la salida del proceso está cambiando respecto del punto de consigna.
- Constante de tiempo integral (T_i) : es el tiempo que debe transcurrir para que la acción integral alcance (iguale o repita) a la acción proporcional.
- Constante de tiempo derivativa (T_d) : es el intervalo de tiempo en el que la acción derivativa adelanta a la acción proporcional.

Defuzzificar Es el proceso o acción de convertir un valor difuso en un valor exacto.

Diferencia de Potencial La diferencia de potencial entre dos puntos A y B de un campo eléctrico es un valor escalar que indica el trabajo que se debe realizar para mover una carga q_0 desde A hasta B. Su unidad de medida es el Volt (v).

Enunciado Difuso Un enunciado vago o difuso es aquél que se le aplica a los elementos de un conjunto, en un cierto grado. Un enunciado de este tipo, en general, no clasifica el universo en dos categorías, es decir, no produce una distinción en dos clases diferenciadas.

Error en Estado Estable El error en estado estable o estacionario es una medida de la exactitud de un sistema de control para seguir una entrada dada, después de desaparecer la respuesta transitoria.

Fuzzificar Es el proceso o acción de convertir un valor duro en un valor difuso.

Intensidad de Corriente La intensidad de corriente es la cantidad de carga eléctrica q que pasa a través del conductor por unidad de tiempo. Se mide en Amperes (A).

Lógica Difusa La lógica difusa es una extensión de la lógica tradicional (booleana) que utiliza conceptos de pertenencia de conjuntos más acordes a la manera de pensar humana. Pretende introducir un grado de vaguedad o imprecisión en las cosas que evalúa.

Lógica Difusa Tipo 2 La lógica difusa tipo 2 es una generalización de la lógica difusa convencional en la cual se involucra al menos un conjunto difuso tipo 2.

Planta Es cualquier objeto físico a controlar.

Producto Cartesiano Para los conjuntos $A_1, A_2, ... A_n$, el conjunto de todas la *n-tuplas* $(a_1, a_2, a_3, ... a_n)$ donde $a_1 \in A_1, a_2 \in A_2...$ y $a_n \in A_n$, es llamado Producto Cartesiano de $A_1, A_2, ... A_n$ y se denota por $A_1 \times A_2 \times ... \times A_n$.

Relación n-aria Una relación *n-aria* sobre $A_1, A_2, ... A_n$, es un subconjunto del producto cartesiano $A_1 \times A_2 \times ... \times A_n$. Si n=2, la relación sería un el conjunto generado por el producto cartesiano $A_1 \times A_2$, subconjunto del producto cartesiano $A_1 \times A_2 \times ... \times A_n$. A este tipo de relación se le nombra *binaria*.

Rizado El rizado o fluctuación (*ripple* en inglés), es la pequeña componente de corriente alterna (CA) que queda tras rectificarse una señal a corriente continua (CD).

Variable Lingüística Una variable lingüística, como su nombre lo sugiere, es una variable cuyos valores son palabras o sentencias en un lenguaje natural o sintético.

Bibliografía

- [1] P. R. K. Chetty, *Switch-mode power supply design*. Tab Professional and Reference Books, 1986.
- [2] S. Cuk and R. Middlebrook, "Advances in switched-mode power conversion part i," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. IE-30, no. 1, pp. 10–19, Feb. 1983.
- [3] S. Cuk and R. Middlebrook, "Advances in switched-mode power conversion part ii," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. IE-30, no. 1, pp. 19–29, Feb. 1983.
- [4] I. Atacak and O. Bay, "A type-2 fuzzy logic controller design for buck and boost dc/dc converters," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 23, pp. 1023–1034, 2012.
- [5] K. Wan, J. Liao, and M. Ferdowsi, "Control methods in dc-dc power conversion a comparative study," in *Power Electronics Specialists Conference*, 2007. *PESC* 2007. *IEEE*, pp. 921–926, Jun. 2007.
- [6] A. Ofoli and A. Rubaai, "Real-time implementation of a fuzzy logic controller for switch-mode power-stage dc ndash;dc converters," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 6, pp. 1367–1374, Nov.-Dec. 2006.
- [7] C.-H. Cheng, P.-J. Cheng, and M.-T. Wu, "Fuzzy logic design of self-tuning switching power supply," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 4, pp. 2929 2936, 2010.
- [8] C. Tse and K. Adams, "Quasi-linear modeling and control of dc-dc converters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 2, pp. 315–323, Apr. 1992.
- [9] W.-C. So, C. Tse, and Y.-S. Lee, "Development of a fuzzy logic controller for dc/dc converters: design, computer simulation, and experimental evaluation," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 1, pp. 24–32, Jan. 1996.
- [10] P. Mattavelli, L. Rossetto, G. Spiazzi, and P. Tenti, "General-purpose fuzzy controller for dc-dc converters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 1, pp. 79–86, Jan. 1997.

Bibliografía

- [11] T. Gupta, R. R. Boudreaux, R. Nelms, and J. Hung, "Implementation of a fuzzy controller for dc-dc converters using an inexpensive 8-b microcontroller," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 5, pp. 661–669, Oct.1997.
- [12] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. SMC-3, no. 1, pp. 28–44, Jan. 1973.
- [13] C.-C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. i," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 2, pp. 404–418, Mar/Apr. 1990.
- [14] C.-C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. ii," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 2, pp. 419–435, Mar/Apr. 1990.
- [15] B. K. Bose, Modern Electronics and AC Drivers. Prentice-Hall, 2002.
- [16] N. Karnik, J. Mendel, and Q. Liang, "Type-2 fuzzy logic systems," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 6, pp. 643–658, Dec. 1999.
- [17] J. Mendel and R. John, "Type-2 fuzzy sets made simple," Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, vol. 10, no. 2, pp. 117–127, Apr. 2002.
- [18] P.-Z. Lin, C.-F. Hsu, and T.-T. Lee, "Type-2 fuzzy logic controller design for buck dc-dc converters," in *Fuzzy Systems*, 2005. *FUZZ '05*. The 14th IEEE International Conference on, pp. 365–370, May. 2005.
- [19] O. Castillo and P. Melin, *Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications*, vol. 223 of *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Springer-Verlang Berlin Heidelberg, 2008.
- [20] T. J. Ross, Fuzzy Logic With Engineering Applications. John Wiley & Sons, second ed., 2004.
- [21] E. M. Jyh-Shing Roger Jang, Chuen-Tsai Sun, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. Prentice Hall, 1997.
- [22] L. Zadeh, "Fuzzy sets," Information and Control, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [23] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International Journal of Human-computer Studies / International Journal of Man-machine Studies*, vol. 7, pp. 1–13, 1975.

- [24] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis," *Computers, IEEE Transactions on*, vol. C-26, no. 12, pp. 1182–1191, 1977.
- [25] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116–132, 1985.
- [26] M. Sugeno and G. Kang, "Structure identification of fuzzy model," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 15 33, 1988.
- [27] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning ii," *Information sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 301–357, 1975.
- [28] N. N. Karnik and J. M. Mendel, "Operations on type-2 fuzzy sets," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 122, no. 2, pp. 327 348, 2001.
- [29] H. Hagras, "Developing a type-2 flc through embedded type-1 flcs," in *Fuzzy Systems*, 2008. FUZZ-IEEE 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Conference on, pp. 148–155, 2008.
- [30] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1st ed., 1997.
- [31] S. Bennett, "A brief history of automatic control," *Control Systems, IEEE*, vol. 16, no. 3, pp. 17–25, 1996.
- [32] R. Sepúlveda, O. Castillo, P. Melin, A. Rodríguez-Díaz, and O. Montiel, "Experimental study of intelligent controllers under uncertainty using type-1 and type-2 fuzzy logic," *Inf. Sci.*, vol. 177, pp. 2023–2048, May 2007.
- [33] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*. Academic Press Series in Engineering, 2001.
- [34] A. Perry, G. Feng, Y.-F. Liu, and P. Sen, "A new analysis and design method for fuzzy logic controllers used in power converter," in *Industrial Electronics Society*, 2005. *IE-CON* 2005. 31st Annual Conference of IEEE, pp. 6 pp.—, 2005.
- [35] http://www.mathworks.com. Última revisión 21/07/2013.

TESIS TESIS TESIS TESIS



Anexo A. Diagrama de Flujo del Controlador Difuso Tipo 1

Variables Utilizadas

i, j y k =Indices de ciclos.

e= Variable de entrada error del controlador.

ce= Variable de entrada cambio del error del controlador.

n_inputs= Número de entradas del contr<mark>olador.</mark>

n_regions= Número de conjuntos difusos a utilizar.

n_outputs= Número de salidas del controlador.

n_rules= Número de reglas difusas que conforman la base de conocimiento.

in_regions= Arreglo bidimensional con los límites de las funciones de membresía de los conjuntos difusos.

out_values= Arreglo unidimensional con los valores de los Singletons de salida.

m_ship= Arreglo bidimensional con los grados de membresía de los valores de entrada en los conjuntos difusos.

pointer= Apuntador para referenciar una posición de arreglo ya sea r_array, r_array2 o r_array3.

r_array= Arreglo bidimensional que contiene a la base de conocimiento (reglas difusas) en forma numérica.

 r_array2 = Arreglo bidimensional que contiene a la base de conocimiento (reglas difusas) expresada con grados de membresía.

r_array3= Arreglo bidimensional con los reglas difusas que fueron disparadas.

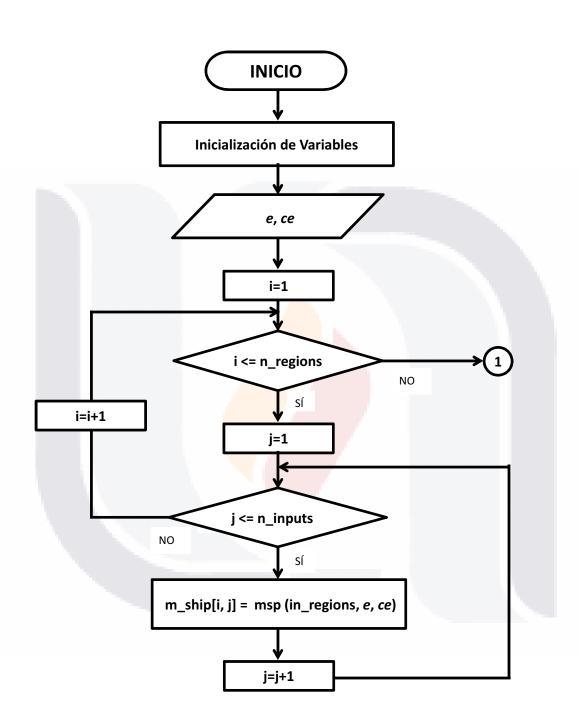
last_row_firing= Valor de la última regla difusa disparada.

minimun= valor mínimo de fuerza de activación de las reglas difusas.

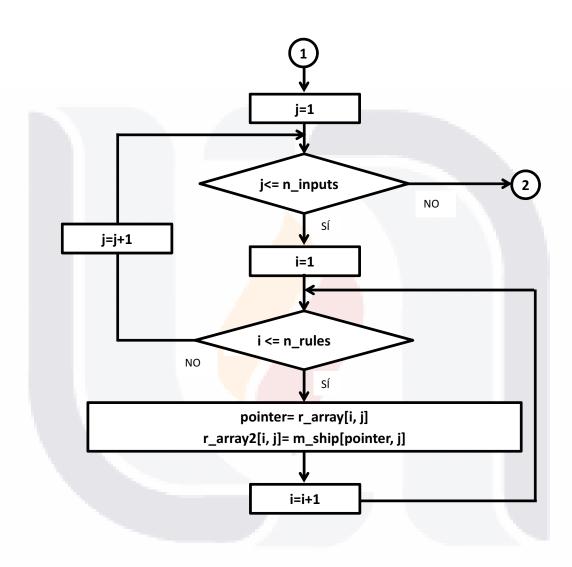
z_num= Arreglo unidimensional que contiene sumatoria de la fuerza de activación de las reglas difusas multiplicada por el valor del correspondiente Singleton.

z_den= Arreglo unidimensional que contiene la sumatoria de la fuerza de activación de las reglas difusas.

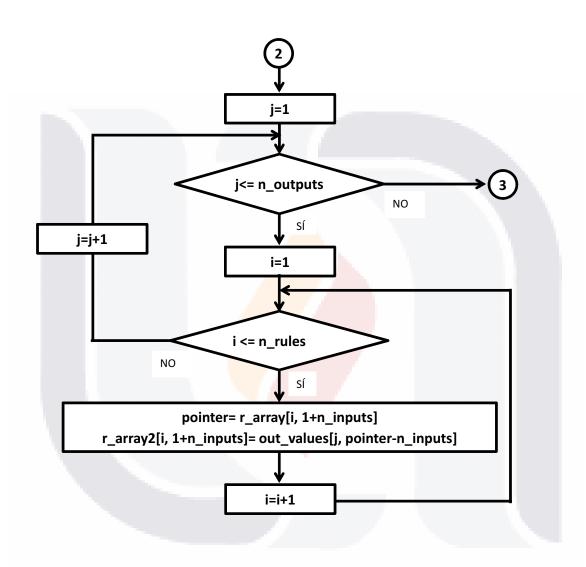
 Δu = Valor duro de salida que es el cambio de la forma de onda de referencia.



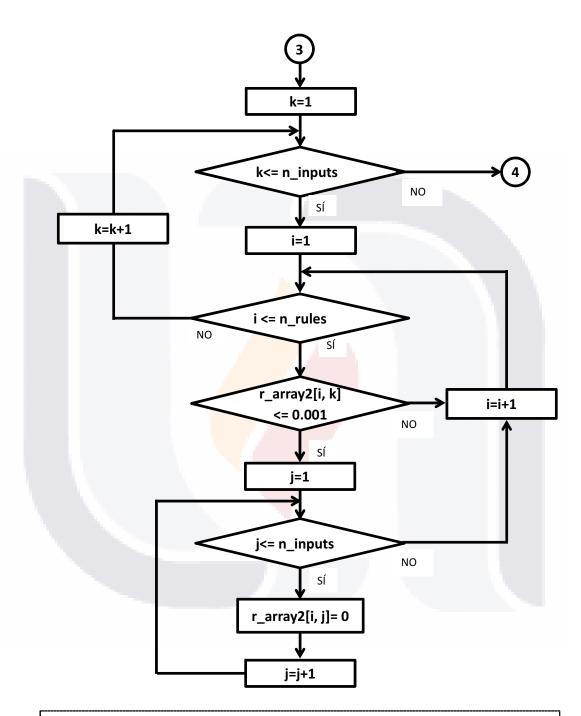
Cálculo de los grados de membresía



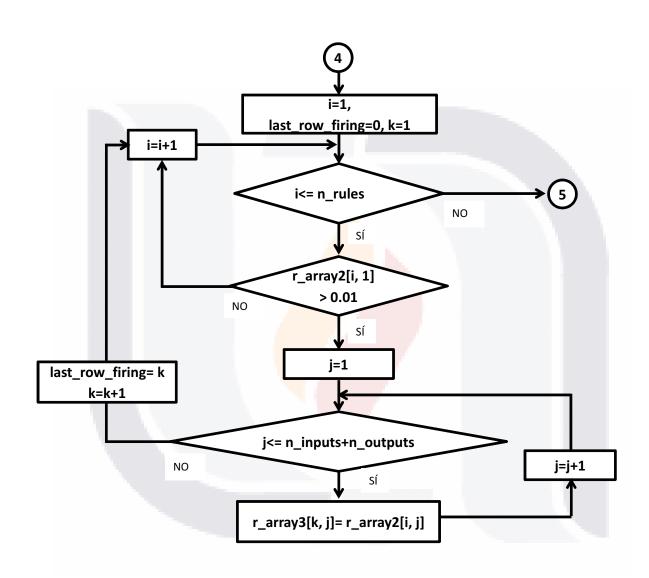
Generación de arreglo de reglas con grados de membresía: Primero Columnas de Entradas.



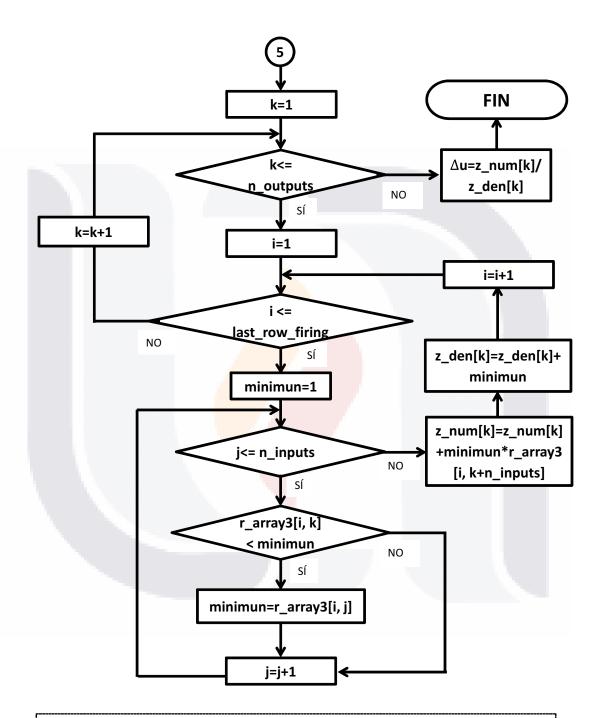
Generación de arreglo de reglas con grados de membresía: Segundo Columnas de Salidas.



Asignar ceros a las celdas de una fila, si algún algún cero aparece en la misma.



Generación de arreglo de reglas activadas.



Cálculo para obtener la salida \(\Delta \text{ total del Controlador} \)

TESIS TESIS TESIS TESIS



Anexo B. Diagrama de Flujo del Controlador Difuso Tipo 2

Variables Utilizadas

i, j y k =Indices de ciclos.

ku= Contadores de reglas difusas superiores activadas.

kl= Contadores de reglas difusas inferiores activadas.

e= Variable de entrada error del controlador.

ce= Variable de entrada cambio del error del controlador.

n_inputs= Número de entradas del controlador.

n_regions= Número de conjuntos difusos a utilizar.

n_outputs= Número de salidas del controlador.

n_rules= Número de reglas difusas que conforman la base de conocimiento.

in_regionsu= Arreglo bidimensional con los límites de las funciones de membresía superiores de los conjuntos difusos.

in_regionsl= Arreglo bidimensional con los límites de las funciones de membresía inferiores de los conjuntos difusos.

out_valuesu= Arreglo unidimensional con los valores de los Singletons de salida superiores.

out_valuesl= Arreglo unidimensional con los valores de los Singletons de salida inferiores.

 m_shipu = Arreglo bidimensional con los grados de membresía superiores de los valores de entrada en los conjuntos difusos.

m_shipl= Arreglo bidimensional con los grados de membresía inferiores de los valores de entrada en los conjuntos difusos.

pointer= Apuntador para referenciar una posición de arreglo ya sea r_array, r_array2 o r_array3.

r_array= Arreglo bidimensional que contiene a la base de conocimiento (reglas difusas) en forma numérica.

 $r_array2u$ = Arreglo bidimensional que contiene a la base de conocimiento (reglas difusas) expresada con grados de membresía superiores.

TESIS TESIS TESIS TESIS

r_array2l= Arreglo bidimensional que contiene a la base de conocimiento (reglas difusas) expresada con grados de membresía inferiores.

 $r_array3u$ = Arreglo bidimensional con los reglas difusas superiores que fueron disparadas.

r_array3l= Arreglo bidimensional con los reglas difusas inferiores que fueron disparadas.

last_row_firingu= Valor de la última regla difusa superior disparada.

ast_row_firingl= Valor de la última regla difusa inferior disparada.

minimunu= valor mínimo de fuerza de activación de las reglas difusas superiores.

minimun l= valor mínimo de fuerza de activación de las reglas difusas inferiores.

z_numu= Arreglo unidimensional que contiene sumatoria de la fuerza de activación de las reglas difusas superiores multiplicada por el valor del correspondiente Singleton superior.

z_numl= Arreglo unidimensional que contiene sumatoria de la fuerza de activación de las reglas difusas inferiores multiplicada por el valor del correspondiente Singleton inferior.

z_denu= Arreglo unidimensional que contiene la sumatoria de la fuerza de activación de las reglas difusas superiores.

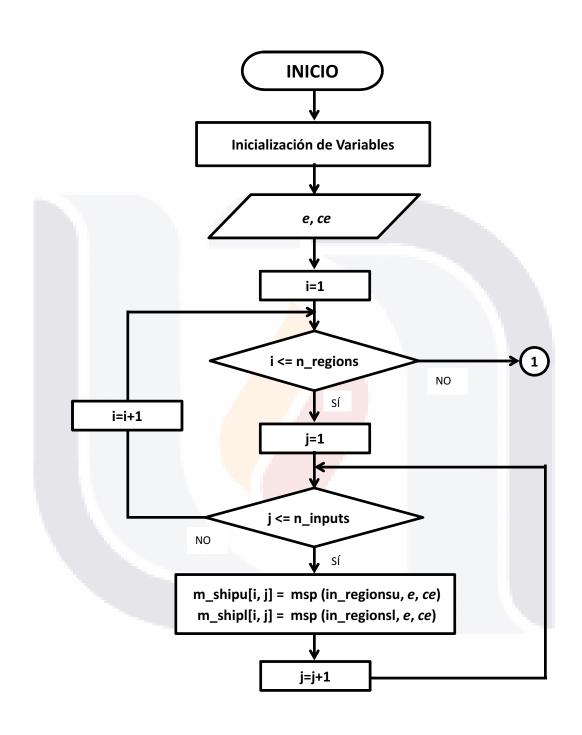
z_denl= Arreglo unidimensional que contiene la sumatoria de la fuerza de activación de las reglas difusas inferiores.

 Δuu = Valor duro de salida superior.

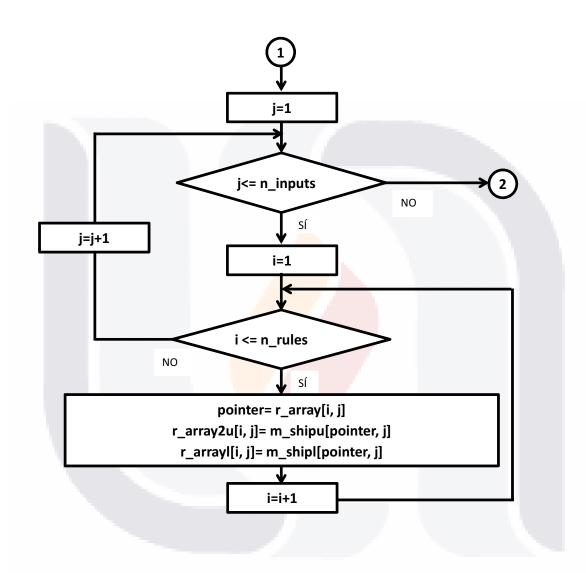
 $\Delta ul = \text{Valor duro de salida inferior.}$

 Δu = Valor duro de salida que es el cambio de la forma de onda de referencia.

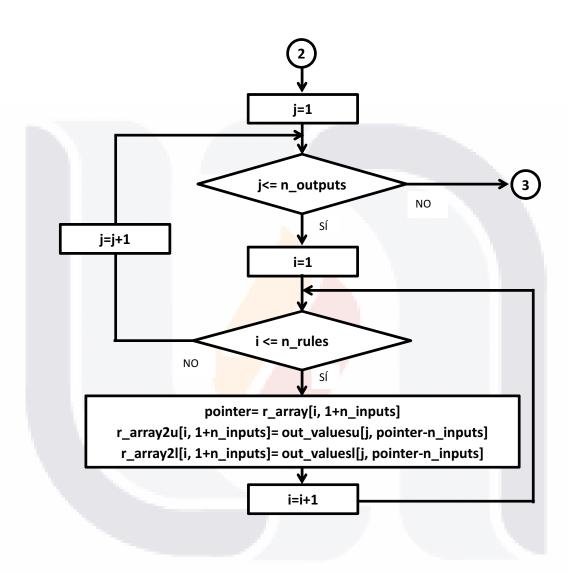




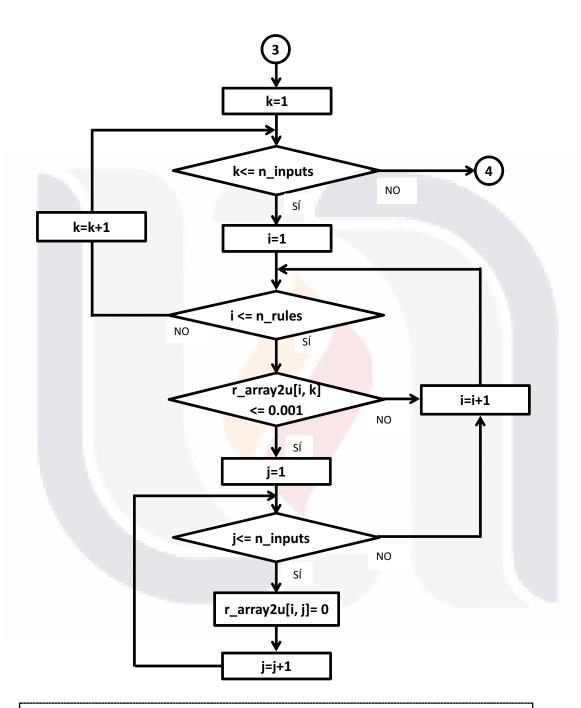
Cálculo de los grados de membresía superior (u) e inferior (l)



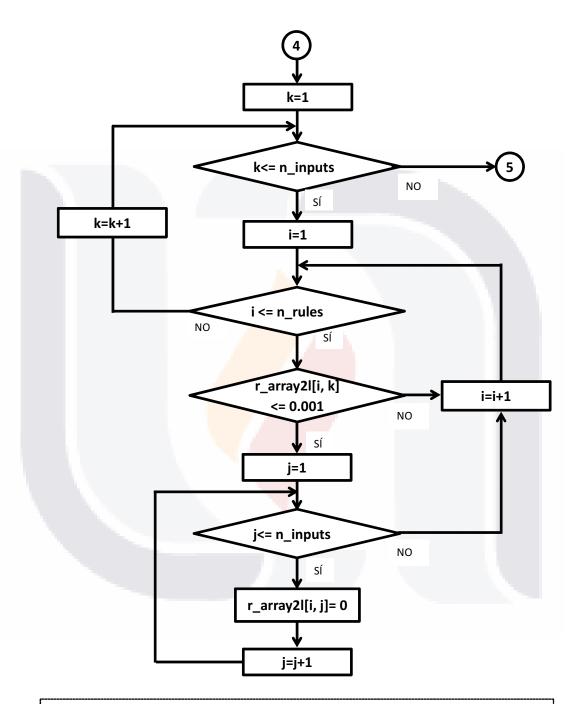
Generación de arreglos de reglas superior e inferior con grados de membresía: Primero Columnas de Entradas.



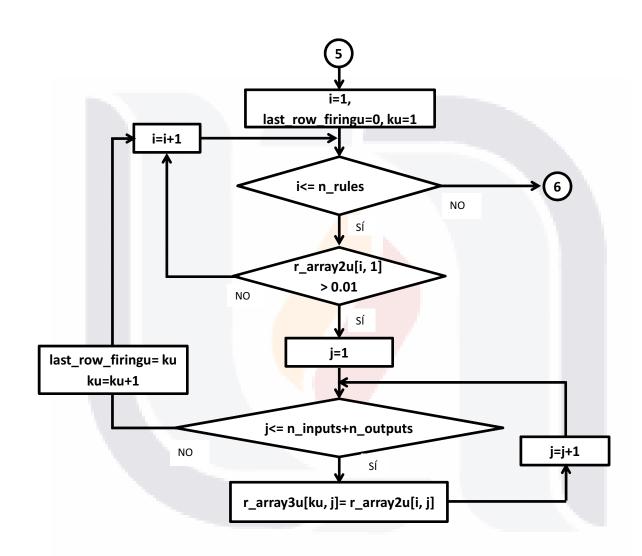
Generación de arreglo de reglas superior e inferior con grados de membresía: Segundo Columnas de Salidas.



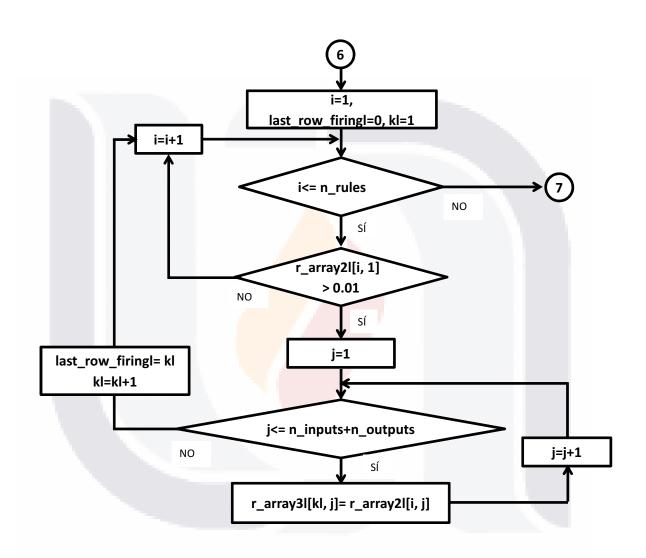
Asignar ceros a las celdas de una fila de r_array2u si algún algún cero aparece en la misma.



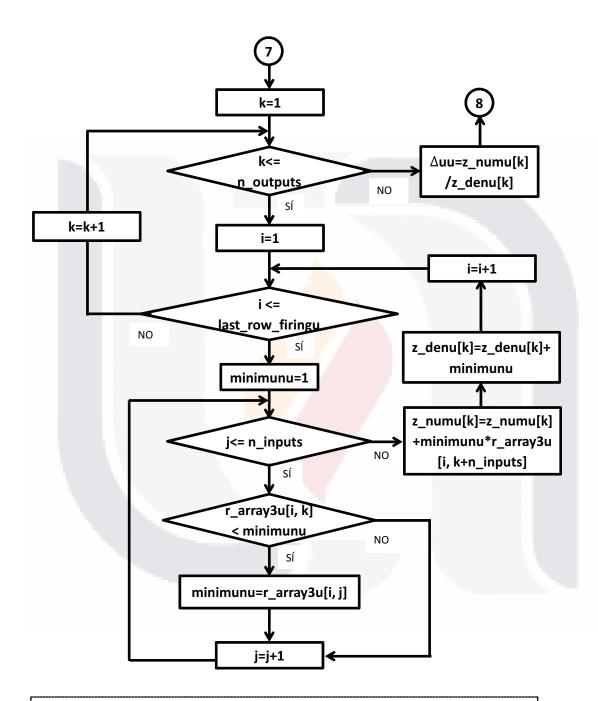
Asignar ceros a las celdas de una fila de r_array2l si algún algún cero aparece en la misma.



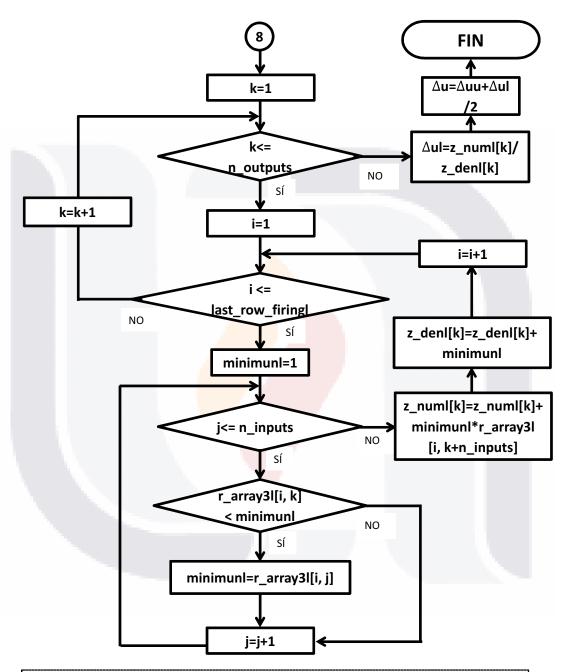
Generación de arreglo superior de reglas activadas.



Generación de arreglo inferior de reglas activadas.



Cálculo para obtener la salida superior \(\Delta uu \) del Controlador



Cálculo para obtener la salida inferior ∆ul y total ∆u del Controlador





Madrid, 12 de julio de 2013

ÓSCAR GARCÍA SUÁREZ, coordinador del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación 2013 (SAAEI'13), celebrado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, España, los días 10, 11 y 12 de julio de 2013

CERTIFICA

que Alfonso Vela Rivera, Luis Alejandro Flores Oropeza, y Edgar Lopez Delgadillo han presentado el artículo *Controladores Difusos en Convertidores de DC/DC* en dicho Congreso.

Óscar García Suárez Coordinador General



