

METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES
DIFUSOS TIPO II EN PROCESOS INDUSTRIALES

ING. JAIR ELIAS ARAUJO VARGAS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES
PAMPLONA
2020

METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES
DIFUSOS TIPO II EN PROCESOS INDUSTRIALES

ING. JAIR ELIAS ARAUJO VARGAS

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGÍSTER
EN CONTROLES INDUSTRIALES

DIRECTOR: M.SC. JORGE LUIS DÍAZ RODRÍGUEZ
CODIRECTOR: M.SC. OSCAR MANUEL DUQUE SUAREZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES
PAMPLONA
2020

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

PAMPLONA, 24 de noviembre de 2020

Dedico este trabajo como primero a Dios, que me a dado la oportunidad de seguir vivo. A mis padres Yomara Vargas, David Araujo, hermanos Jhoan Araujo y Nicolle Araujo que me motivan a ser mejor, a mi esposa Cinthia Trejos que gracias a su apoyo y amor me inspira a continuar, con su cariño y calidez me hace ser una mejor persona y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por darme la oportunidad de llegar a esta etapa, por colocar mi vida profesional en la ruta de la universidad que me ha visto crecer como lo es la universidad de Pamplona, a los docentes que me han acompañado en mi crecimiento como profesional.

A mis Padres y Hermanos por su amor, compañía, por ser quienes me motivan a seguir adelante; ser una mejor persona y profesional, este logro es de ustedes y para ustedes, los amo, doy gracias a Dios por permitirme tenerlos junto a mí, también a mi prima Marlen Lara por su compañía, apoyo y por siempre estar ahí en las buenas, en las malas y las que mejor no recordamos, Dios nos de muchos años más de vida con una vida sana para poder disfrutar más tiempo juntos.

A mi esposa Cinthia Trejos quien es un gran motor en mi vida, por ser especial y brindarme su amor, por estar conmigo en los buenos y malos momentos dándome apoyo para salir de estos, por ayudarme a ser mejor, aconsejarme y ser motivación en mi vida personal y profesional, por ser parte a lo largo de este proceso y los buenos momentos vividos, este triunfo también lleva tu sello, te amo y doy gracias a Dios por ponerte en mi camino.

A mi director de tesis M.Sc. Oscar Duque gracias por los consejos, enseñanzas y apoyo brindado, así como a mi codirector de tesis M.Sc. Jorge Luis Díaz por sus valiosos aportes y experiencia a lo largo de esta investigación, también a mis compañeros de trabajo en el programa, en especial al Ph.D. Rocco Tarantino Alvarado por ser motivación, inspiración y modelo, para los estudiantes y compañeros; al M.Sc. Adrián Carvajal por la colaboración y motivación a crecer profesionalmente, al Esp. Evelio Prado por su apoyo y compromiso.

A mis estudiantes y ahora colegas Ing. Mauro Ibarra e Ing. Jhonattan Sandoval por ser de gran motivación al verlos crecer profesionalmente, fue muy grato ver esa transición en su carrera profesional, Dios los bendiga.

A mi compañero de equipo en la maestría Ing. Guillermo Mendoza es un gran placer contar con personas como usted, bendiciones en su vida personal y profesional.

Contenido

RESUMEN DEL PROYECTO	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	17
OBJETIVOS	19
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
METODOLOGÍA.....	19
CAPITULO I. Estudio sobre los procedimientos de desarrollo de controladores difusos tipo II	20
1.1 Lógica difusa	20
1.2 Sistemas de control difuso.....	31
1.3 Diseño de controladores difusos.....	34
1.4 Implementación del control difuso.....	42
1.5 Lógica difusa tipo 2.....	46
1.6 Sistemas difusos tipo 2.....	57
1.7 Aportes actuales en sistemas difusos tipo 2	66
1.8 diseño de sistemas difusos tipo 2	71
1.9 Aplicaciones actuales en sistemas difusos tipo 2.....	72
1.10 Análisis del desarrollo de los controladores difusos tipo 2.	77
1.11 Definición y verificación de los procedimientos de desarrollo de controladores difusos tipo 2.....	78
1.12 Establecimiento de los criterios de desarrollo de controladores difusos tipo 2. 95	
1.13 Implementación del control difuso tipo 2.....	96
1.14 Clasificación de los procesos en los que se desarrollaron controladores difusos tipo 2.....	112
CAPITULO II. Diseño de las fases de la metodología para el desarrollo de controladores difusos tipo 2.	116
2.1 Definición de las fases contempladas para el desarrollo de la metodología. 117	
2.1.1 Fases contempladas en el desarrollo del sistema difuso tipo 2:	118

2.1.2	Pasos llevados a cabo para el desarrollo del controlador difuso tipo 2:	
	118	
2.2	Desarrollo de las diferentes fases planteadas para el desarrollo de la metodología.	119
2.3	Diseño del experimento	134
CAPITULO III. Implementación la metodología desarrollada para controladores difusos tipo II.		
136		
3.1	Desarrollo de la metodología	136
3.1.1	Estudio del comportamiento del proceso a controlar.	136
3.1.2	Evaluación de la necesidad de un controlador lógico difuso.	148
3.1.3	Elección del tipo de sistema difuso tipo 2, generalizado o de intervalo.	149
3.1.4	Definición del tipo de controlador según el proceso a controlar.	149
3.1.5	Definición de las entradas y salidas	149
3.1.6	Dimensionamiento del controlador difuso tipo 2 mediante el rango de las variables de entrada y salida.	149
3.1.7	Establecimiento de la cantidad de funciones de membresía.	155
3.1.8	Elección del tipo de funciones de membresía.	155
3.1.9	Definición de la huella de incertidumbre.	155
3.1.10	Definición de la base de reglas	156
3.1.11	Elección del método de inferencia.	158
3.1.12	Establecimiento del método de reducción de tipo y fusificación. ..	158
3.1.13	Puesta en marcha del sistema.	158
3.1.14	Análisis de rendimiento	166
3.1.15	Ajuste de los parámetros de ser necesario.	168
3.1.16	Ampliación del rango de control	170
CAPITULO IV. Validación de la metodología implementada para controladores difusos tipo II.		
175		
4.1	Diseño del proceso de validación	175
4.2	Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 3 métodos de control	176

4.2.1	Puesta del sistema de control difuso IT2 en planta real.....	176
4.2.2	Puesta del sistema de control difuso tipo 1 en planta real	179
4.2.3	Puesta del sistema de control PID en planta real	180
4.3	Validación estadística de los resultados	182
4.3.1	Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control difuso IT2.....	182
4.3.2	Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control difuso tipo 1	193
4.3.3	Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID	203
4.4	Análisis de resultados	215
4.4.1	Escenarios comparativos	218
	CONCLUSIONES	220
	REFERENCIAS	223
	ANEXOS	233

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 funciones de pertenencia de los conjuntos difusos definidos del ejemplo anterior	23
Figura 2 algunos modificadores y su representación gráfica y matemática	26
Figura 3 sistema de inferencia difusa tipo Mamdani	27
Figura 4 sistema de inferencia difusa tipo Takagi-Sugeno	28
Figura 5 sistema de inferencia difusa tipo Tsukamoto	28
Figura 6 Estructura básica de inferencia Mandani	29
Figura 7 Estructura básica de Inferencia Takagi-Sugeno	30
Figura 8 Lazo de control difuso	34
Figura 9 Diagrama de bloques de un controlador difuso genérico basado en el error y la variación del error	34
Figura 10 función de membresía de $E(t)$ y $dE(t)$	35
Figura 11 función de membresía de la salida	36
Figura 12 Significado del error y variación del error	36
Figura 13 Diagrama de control difuso tipo PID	38
Figura 14 diagrama de control difuso modificado	39
Figura 15 Diagrama de control difuso con ganancias	39
Figura 16 Esquema de control adaptativo en el cual un sistema de inferencia difusa modifica parámetros en un control clásico	40
Figura 17 Esquema de control adaptativo en el cual un sistema de inferencia difusa interactúa con un controlador clásico	41
Figura 18 Esquema de control adaptativo con modelo de referencia.....	42
Figura 19 Vista tridimensional de una función de membresía tipo 2.	47
Figura 20 Un conjunto difuso de tipo 2 que representa un conjunto difuso de tipo 1 con desviación estándar incierta	48
Figura 21 Un conjunto difuso de tipo 2 que representa un conjunto difuso de tipo 1 con media incierta. La media es incierta en el intervalo $[0.4, 0.6]$	49
Figura 22 Un conjunto difuso de tipo 2 en el que el grado de membresía de cada punto de dominio es un conjunto gaussiano de tipo 1	50
Figura 23 Uncertainty trace (FOU), superior membership function (UMF) and lower membership function (LMF).	51
Figura 24 Gaussiana con desviación estándar fija y valor medio "incierto"	52
Figura 25 Gaussiana con valor medio fijo y desviación estándar "incierto"	53
Figura 26 Forma triangular	53
Figura 27 dos funciones de membresía gaussianas	54
Figura 28 Unión de dos funciones de membresía gaussianas	55
Figura 29 Intersección de dos funciones de membresía gaussianas	55
Figura 30 . Sistema lógico difuso tipo 2.	57

Figura 31 proceso de fusificación.	58
Figura 32 Resultados de los conjuntos de datos del National Mall basados en los métodos T1FCM, FGFCM, m-IT2FCM, s-IT2FCM y nr-IT2FCM.	69
Figura 33 diagrama de bloques de sistema de control difuso tipo 1 y tipo 2 genérico	78
Figura 34 Controlador lógico difuso óptimo tipo 2 propuesto (OT2FLC)	81
Figura 35 Siete funciones de membresía triangular tipo 2	81
Figura 36 Representación de Membresía tipo 2	82
Figura 37 Propuesta de controlador tipo 2 neural difuso PI (T2FN PI).	83
Figura 38 Representación de control difuso genérico	84
Figura 39 Resultados comparativos de T1FLC, IT2FLC y GT2FLC con un nivel de ruido de 0.5	89
Figura 40 Comparación entre respuestas obtenidas con diferentes controladores en la investigación de Raj y Mohan	93
Figura 41 diagrama de bloques del sistema de control general	99
Figura 42 estructura de la DGIT2FNC	100
Figura 43 Comportamiento de varios índices de rendimiento en relación con la cantidad de perturbaciones de ruido presentes en el sistema, cuando se utilizan T1FC, IT2FC y GT2FC. (a) ITAE, (b) ITSE, (c) IAE y (d) ISE.	101
Figura 44 control adaptativo difuso tipo 2	102
Figura 45 Geometría de RSS	106
Figura 46 Arquitectura de control de seguimiento de trayectoria tridimensional de RSS.	107
Figura 47 El diagrama de flujo del control de retroceso adaptativo basado en PSO para optimizar los parámetros del controlador	110
Figura 48 diagrama de bloques de sistema de control difuso tipo 1 y tipo 2 genérico	117
Figura 49 etapas de un sistema difuso tipo 2	118
Figura 50 Metodología propuesta por el autor	133
Figura 51. Puntos críticos para la distribución T Student.	140
<i>Figura 52. Puntos críticos para la distribución T de Student</i>	141
Figura 53 Grafica Data promedio 30%.	142
Figura 54 Grafica Data promedio 70%.	142
Figura 55 Diagrama en bloques para la identificación.	143
Figura 56. Identificación del sistema bajo el método de la pendiente	144
Figura 57 Principio de proporcionalidad	147
Figura 58 Principio de aditividad	148
Figura 59. Lazo de control simulado con PID calculado por el tercer método de Ziegler and Nichols	151

Figura 60. Valores de KP, KI y KD en el bloque PID	151
Figura 61 Respuesta del controlador PID	151
Figura 62 Lazo de control con ANTI-WINDUP	152
Figura 63 respuesta del controlador PID con ANTI-WINDUP	152
Figura 64 Diagrama en bloques del mejor controlador clásico PID para el proceso	153
Figura 65 Error para un setpoint de 15 cm.....	153
Figura 66 Comportamiento del delta del error ante un Setpoint de 15cm.....	154
Figura 67 Comportamiento del controlador ante un setpoint de 15 cm	154
Figura 68 Análisis de interpretabilidad del controlador	156
Figura 69 Selección del método de fusificación	158
Figura 70 Selección del método de reducción de tipo	159
Figura 71 Definición de las variables de entrada y salida	159
Figura 72 Dimensionamiento de los universos de discurso.....	159
Figura 73 Funciones de membresía del Error	161
Figura 74 Funciones de Membresía de la derivada del error	162
Figura 75 Funciones de membresía de la acción de control.	163
Figura 76 Base de reglas.....	164
Figura 77 Superficie del sistema difuso tipo 2 de intervalo.....	164
Figura 78 Diagrama en bloques del sistema de control difuso IT2 del proceso de nivel.....	165
Figura 79 Respuesta del sistema de Nivel ante un Sp de 15 cm	165
Figura 80 Respuesta del controlador difuso IT2 ante un Sp de 15 cm	166
Figura 81 Diagrama de bloques de la implementación para el estudio del IAE ...	167
Figura 82 Análisis de la respuesta con IAE.....	167
Figura 83 Diagramas en bloques del Sistema de control difuso IT2 con implementación de ganancias	168
Figura 84 Comparación de la respuesta del sistema con un control difuso IT2 con y sin ganancias.....	169
Figura 85 Comparación del análisis del rendimiento con IAE con y sin ajuste	169
Figura 86 Función de la ganancia del error con respecto al Setpoint	171
Figura 87. bloque de funciones polinomiales para la ganancia del error	172
Figura 88. Función de la ganancia de la salida del controlador con respecto al Setpoint	173
Figura 89 bloque de funciones polinomiales para la ganancia de la salida del controlador.....	174
Figura 90 Diagrama de bloques del sistema con control difuso tipo 2 de intervalo de amplio rango	174

Figura 91 Respuesta del sistema ante dos S_p , un primer de 7 cm y un segundo de 12 cm.....	174
Figura 92 Programa preestablecido en la placa para la comunicación	177
Figura 93 Lazo de control real con controlador difuso IT2.....	178
Figura 94 Lazo de control real con controlador difuso IT1	180
Figura 95. Lazo de control real con controlador PID	181
Figura 96 Respuesta del sistema con controlador difuso IT2 en condiciones normales.....	182
Figura 97 Respuesta del sistema en estado estable del controlador difuso IT2 ..	184
Figura 98 Márgenes de respuesta transitoria de controlador difuso IT2.....	184
Figura 99 Respuesta del sistema con controlador difuso IT2 con ruido	185
Figura 100 Respuesta del sistema en estado estable del controlador difuso IT2 con ruido	186
Figura 101 Márgenes de respuesta transitoria de controlador difuso IT2 con ruido	186
Figura 102 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control difuso IT2.....	188
Figura 103 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso IT2.....	188
Figura 104 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso IT2.....	189
Figura 105 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante ruido	190
Figura 106 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante ruido	191
Figura 107 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante ruido	191
Figura 108 Respuesta del controlador difuso IT2 ante perturbación	192
Figura 109 Respuesta del sistema con controlador difuso IT1 en condiciones normales.....	193
Figura 110 Respuesta del sistema en estado estable del controlador difuso IT1	194
Figura 111 Márgenes de respuesta transitoria de controlador difuso IT1	195
Figura 112 Respuesta del sistema con controlador difuso IT1 con ruido	195
Figura 113 Respuesta del sistema en estado estable del controlador IT1 con ruido	196
Figura 114 Márgenes de respuesta transitoria de controlador difuso IT1 con ruido	197
Figura 115 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1	198

Figura 116 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1	199
Figura 117 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1	199
Figura 118 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante ruido	201
Figura 119 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante ruido	201
Figura 120 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante ruido	202
Figura 121 Respuesta del controlador difuso IT1 ante perturbación	203
Figura 122 Respuesta del sistema con controlador PID en condiciones normales	204
Figura 123 Máximo pico y tiempo pico de la respuesta del controlador PID	205
Figura 124 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID	205
Figura 125 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID	206
Figura 126 Respuesta del sistema con controlador PID con ruido	207
Figura 127 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID con ruido	208
Figura 128 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID con ruido	208
Figura 129 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID	210
Figura 130 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID	210
Figura 131 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID	211
Figura 132 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID ante ruido.....	212
Figura 133 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID ante ruido	213
Figura 134 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID ante ruido.....	213
Figura 135 Respuesta del controlador PID ante perturbación.....	214

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de las T-normas y T-conormas.....	24
Tabla 2 Principales T-normas y T-conormas.....	25
Tabla 3 Ventajas de las reglas difusas de Mamdani y Takagi-Sugeno	33
Tabla 4 Notación de la función de membresía del error	35
Tabla 5 Conjunto de reglas difusas para una arquitectura mamdani.....	37
Tabla 6 Conjunto de reglas difusas para una arquitectura Takagi-Sugeno	37
Tabla 7 lista de los métodos de reducción de tipo GT2 existentes.....	62
Tabla 8 Algoritmo de Karnik-Mendel	65
Tabla 9 Comparación de la tasa de clasificación correcta por los métodos T1FCM, FGFCM, s-IT2FCM, m-IT2FCM y nr-IT2FCM	68
Tabla 10 Base de reglas Mac Vicar-Whelan	80
Tabla 11 Resultados de la simulación para el tanque de agua al agregar perturbaciones de ruido Pulse Generador	85
Tabla 12 GT2FLC con variaciones en Alpha Planes of the Water Tank.....	87
Tabla 13 GT2FLC con variaciones en la perturbación del controlador del tanque de agua	88
Tabla 14 clasificación de los procesos donde se desarrollan controladores difusos tipo II.....	113
Tabla 15 Estudio de Criterios importantes a tener en cuenta según Wu y Mendel en referencias citadas.....	121
Tabla 16 Estudio de Criterios importantes a tener en cuenta para el diseño de un controlador difuso tipo según autor no contemplados por Wu y Mendel en referencias citadas.....	125
Tabla 17 Sintonización de Ziegler & Nichols	150
Tabla 18. Conjuntos de las variables lingüísticas.....	155
Tabla 19. Controlador fuzzy ideal entradas.....	156
Tabla 20. Descripción de los puntos críticos más importantes	157
Tabla 21 Reglas del controlador difuso tipo 2 del proceso de Nivel	157
Tabla 22. Ganancia del error y la salida del controlador para valores de Setpoint	170
Tabla 23 Plantilla de la ficha técnica muestral	176
Tabla 24 ficha técnica muestral experimento control difuso IT2 en condiciones normales.....	187
Tabla 25 ficha técnica muestral experimento control difuso IT2 ante ruido	189
Tabla 26 ficha técnica muestral experimento control difuso IT2 ante perturbación	192
Tabla 27 ficha técnica muestral experimento control difuso tipo 1 en condiciones normales.....	197

Tabla 28 ficha técnica muestral experimento control difuso tipo 1 ante ruido.....	200
Tabla 29 Ficha Técnica Muestral experimento T1 ante perturbación	202
Tabla 30 ficha técnica muestral experimento control PID en condiciones normales	209
Tabla 31 ficha técnica muestral experimento control PID ante ruido en condiciones normales.....	211
Tabla 32 ficha técnica muestral experimento control PID ante perturbación normales.....	214
Tabla 33 Resultados generales de los experimentos.....	215
Tabla 34 Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia	216
Tabla 35 Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control	217
Tabla 36 FODA de los controladores difusos Tipo 2.	219

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto tuvo como objetivo desarrollar una metodología para la implementación de controladores difusos tipo II. Para lo cual se realizó un estudio sobre los procedimientos de desarrollo de controladores difusos tipo II, donde con dicho estudio se lograron determinar las aplicaciones en la que han sido usados los controladores difuso tipo II, se realizó un análisis de los métodos más usados y se seleccionaron las mejores prácticas, obteniendo así los criterios suficientes con los cuales se diseñaron de las fases metodológicas para el desarrollo de controladores difusos tipo II, posteriormente se implementó la metodología realizada y una vez implementada se realizó una validación de la metodología con el fin de realizar ajustes en el planteamiento de la metodología.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que permite el análisis de la información del mundo real, con estrategias de pertenencia manejando conceptos del lenguaje natural los cuales no son precisos, tales como “temperatura alta”, “temperatura baja”, “temperatura media”. A través de la lógica difusa se puede controlar o describir un sistema, realizando un mecanismo de inferencia basado en el sentido común e información dada por un experto.

¿Cómo entender la lógica difusa?

La lógica difusa actualmente es muy usada en diferentes sectores como por ejemplo el control y la robótica, aunque esta metodología se considera compleja, el ser humano todos los días maneja instrucciones con este tipo de enseñanza. Ejemplo: Un padre le dio una bebida a su hijo, él le indicó que la bebida estaba caliente para que este tuviera prudencia a la hora de beberla, nunca el padre le expresó la temperatura en grados a la cual se encontraba la bebida; tan solo le dijo “muy caliente”, “poco caliente” y entonces el niño entendió cuanto es mucho y cuanto es poco, determinando los rangos de temperatura dadas estas posibilidades.

En la actualidad la lógica difusa tiene una variante la cual es conocida como lógica difusa tipo II, esta se caracteriza principalmente por ser una extensión de la lógica difusa tipo I, donde el grado de pertenencia no está dado por un valor nítido de pertenencia en el conjunto difuso.

¿Por qué desarrollar controladores difusos tipo 2?

Los controladores difusos tipo 2 pueden ser expuestos a variaciones en los parámetros del modelo del sistema, teniendo variaciones en la respuesta transitoria poco significativas, notándose un controlador más robusto, tolerante a ruido y perturbaciones.

La lógica difusa tipo 2 aun cuando ofrece una variedad de ventajas con respecto a la respuesta transitoria del sistema, dado ruido y perturbaciones en el sistema siendo un controlador más robusto y contemplando que tuvo su nacimiento unos pocos años después de la lógica difusa tipo I, no ha sido usada con la misma frecuencia que la lógica difusa tipo 1, dada la heurística de la lógica difusa tipo 1 y tipo 2, no se logra evidenciar una metodología para el desarrollo para controladores difusos tipos 2, que facilite aplicar esta estrategia de control inteligente.

¿Es necesario una metodología para el desarrollo de controladores difusos tipo 2?

Los sistemas de lógica difusa se han aplicado con éxito a una extensa gama de

problemas y aplicaciones. Un tipo de aplicación, de este tipo está relacionada con el uso de la lógica difusa para el modelado y la aproximación de sistemas donde se usa un sistema de inferencia difusa para modelar el conocimiento humano o para aproximar sistemas dinámicos y no lineales; y a partir de ello generar una estrategia de control realimentada. Sin embargo, la existencia de incertidumbres y falta de información en muchos casos reales, hacen que estos problemas sean difíciles modelar a nivel difuso utilizando únicamente el conocimiento experto. Los ejemplos de tales problemas incluyen la identificación de sistemas sin bases de reglas conocidas y sistemas altamente complejos, o cuando la estrategia de control no es expresable fácilmente a nivel heurístico. Resulta claro que, al diseñar un sistema de lógica difusa simple o tipo 1, los expertos pueden proporcionar reglas eficientes, pero, a medida que la complejidad del sistema crece, el establecimiento de base de reglas y membresía se vuelven difíciles de adquirir. Por lo tanto, algunos métodos para la creación de estos sistemas difusos suelen utilizarse. El objetivo de estos métodos es obtener las funciones parametrizadas que modelan mejor estos problemas de acuerdo con el "Criterio de Chosen". El uso de métodos automatizados para diseñar sistemas de lógica difusa ha ayudado a modelar muchos problemas del mundo real que son difíciles de entender por los expertos y ahora es una metodología bien establecida para aplicaciones de modelado y aproximación, lo mismo puede hacerse para lograr representaciones de control difuso tipo 2. La motivación de esta investigación fue que los sistemas de lógica difusa Tipo 2 están dotados de la capacidad de manejar numerosos parámetros que deben ser determinados en el diseño del control de un sistema en específico. La determinación de estos parámetros es una pregunta de investigación abierta, lo cual motivó el enfoque para crear una metodología de diseño de sistemas difusos tipo 2. El crecimiento en el interés por la lógica difusa tipo 2 no se ha manifestado completamente en aplicaciones del mundo real utilizando conjuntos difusos tipo 2 en general. El énfasis se ha puesto en los conjuntos difusos tipo 1, contando ya con una metodología para lograr sistemas de control y representaciones en control difuso tipo 2 se logró extender su uso y sus prestaciones, dado que como método no solo es complejo de entender y de aplicar, más difícil aún; si no se cuenta con una ruta de creación que guíe el proceso.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para la implementación de controladores difusos tipo II en procesos industriales

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio sobre los procedimientos de desarrollo de controladores difusos tipo II.
- Diseñar las fases de la metodología para el desarrollo de controladores difusos tipo II.
- Implementar la metodología desarrollada para controladores difusos tipo II.
- Validar la metodología implementada para controladores difusos tipo II.

METODOLOGÍA

La metodología de investigación de esta propuesta es de tipo descriptiva experimental. En esta investigación se desarrolló una metodología de implementación de controladores difusos tipo 2, que tiene como resultado la mejora en los parámetros de respuesta transitoria ante perturbaciones y ruido.

Se realizó el estudio sobre los procedimientos de desarrollo de controladores difusos tipo 2, una vez realizado el estudio de los procedimientos se diseñaron las fases de la metodología para el desarrollo de controladores difusos tipo 2, se implementó la metodología desarrollada para controladores difusos tipo 2 y para finalizar se validó la metodología implementada en controladores difusos tipo 2.

Las fuentes de información contempladas para la información fueron conformadas por las bases de datos de acceso libre en internet, fuentes bibliográficas y artículos disponibles en la red y en bibliotecas de acceso público; formaron parte de las consideraciones éticas en este proyecto de investigación, el buen uso de la información y el respeto por la propiedad intelectual.

CAPITULO I. Estudio sobre los procedimientos de desarrollo de controladores difusos tipo II

1.1 Lógica difusa

El uso de reglas lingüísticas vagas le permiten al ser humano comunicar su experiencia de manera práctica, donde para el procesamiento de dichas reglas la lógica convencional no resulta adecuada, por ejemplo, la habilidad de un ser humano para expresar la técnica adecuada de jugar al golf y la de otro para percibir y aprender de esta información, donde al expresar una regla tan vaga como: si el hoyo se encuentra muy cerca y el campo se encuentra ligeramente inclinado, entonces se debe dar un golpe firme a la bola con un ángulo ligeramente inclinado un poco hacia la izquierda de la vadera ¹, el aprendiz es capaz de tomar toda esta información y dar un golpe certero y jugar bien al golf, ahora si bien al humano le pudiese resultar de fácil interpretación, para una máquina que analiza la información con una la lógica convencional resulta de imposible interpretación, ya que para una máquina que interpreta mediante esta lógica, también conocida como binaria, donde solo existen dos estados de verdadero o falso, las fronteras de argumentos como ligeramente inclinado no están definidas, debido a que no existe una verdad ligeramente cierta o ligeramente falsa.

La lógica difusa permite simular el proceso de razonamiento humano a través de mecanismos de inferencia, lo cuales pueden ser expresados matemáticamente, lo que permite el modelamiento de la incertidumbre del proceso cognitivo humano, y por ende tratar los mismos en un computador.

Según Gonzales C. existen muchas maneras de tratar la incertidumbre, las cuales inicialmente eran netamente probabilísticas, y se dieron para el siglo XIX, donde antes de esto los sistemas expertos modelaban el conocimiento desde un enfoque netamente lógico, por lo que el surgimiento del enfoque probabilístico era prometedor, sin embargo, el problema de este enfoque era un crecimiento exponencial de las probabilidades necesarias para realizar un cálculo cuando se tenían procesos con un aumento considerable del número de variables ². Por lo que surgieron otros métodos, los cuales se dividen en los métodos no numéricos y numéricos.

¹ Carlos González, "Lógica Difusa. Una introducción práctica", *Técnicas de Softcomputing*, 2011, 29

<https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf>.

² González.

Cuando se habla de los métodos no numéricos, se hace referencia a aquellos que hacen aproximaciones a través de información cualitativa, es decir toman un razonamiento más cercano al humano, teniendo como uno de estos métodos más estudiados el razonamiento por defecto, el cual toma como válida una conclusión hasta no tener otra que se crea sea mejor, así como también se tienen las redes cualitativas y los sistemas de mantenimiento de coherencia. En cuanto a los métodos numéricos, se tienen todos los métodos probabilísticos, los cuales asignan el grado de verdad entre 0 y 1, resumiendo así la incertidumbre de cualquier oración. Así como también se tienen métodos numéricos no probabilísticos para el tratamiento de la incertidumbre, como el basado en la teoría de Dempster-Shafer ³ que define los grados de creencia mediante intervalos de valores.

En definitiva, la lógica difusa es un método de razonamiento aproximado no probabilístico, y es una lógica multivaluada, por medio la cual se puede modelar matemáticamente la vaguedad y la incertidumbre, por lo cual su implementación provee de las herramientas necesarias para resolver problemas de gran complejidad, donde básicamente se le puede dar solución a cualquier problema dado un conjunto de variables de entrada, si se obtienen valores adecuados de las variables de salida, donde con la lógica difusa dicha salida es tratada con criterios de significado y no de precisión.

Es claro que, para profundizar en el concepto de lógica difusa, se debe conocer porque se caracteriza la misma, donde para ello González C. define que para poder caracterizar a la misma se debe destacar el principio de incompatibilidad, con el cual se describe el funcionamiento de un sistema complejo, donde dicha descripción no puede realizarse de forma absolutamente precisa, lo cual obliga a desarrollar la representación de información imprecisa y la inferencia sobre información imprecisa, y a partir de esto describir las principales características de la lógica difusa y sus sistemas ⁴. Teniendo como una de sus características el razonamiento exacto, lo que da paso a que cualquier sistema lógico puede ser fuzzificado, caracterizándose también porque el conocimiento es interpretado como una colección de restricciones difusas, lo que proporciona la capacidad de modelar sistemas cuyo modelo exacto es difícil de obtener, tercero por ver a la inferencia como un proceso de propagación de estas restricciones y cuarto por permitir tomar decisiones con valores incompletos o información incorrecta.

³ González.

⁴ González.

En la lógica Difusa se agrupan diversas concepciones, entre ellas las de la teoría de conjuntos difusos, las reglas si-entonces, las aritméticas, entre otras. En cuanto a la teoría de conjuntos difusos Duarte O. sugiere que una buena técnica para presentar la teoría de conjuntos difusos es recordar algunos aspectos de la teoría de conjuntos convencionales y a partir de allí hacer una extensión de los conjuntos difusos ⁵. Donde un conjunto convencional es una colección de elementos que existen dentro de un universo, así entonces cada uno de los elementos del universo pertenecen o no a un conjunto, a su vez cada conjunto puede definirse completamente por una función de pertenencia, la cual asigna un valor de 1 si el elemento pertenece al conjunto y de 0 si no pertenece al mismo.

Ya habiendo definido un poco sobre los conjuntos convencionales, un conjunto difuso se define de manera similar, teniendo en cuenta que ya no se define el grado de pertenencia exclusivamente con 1 y 0 si pertenece o no pertenece al conjunto, ahora un elemento puede pertenecer parcialmente a dicho conjunto, es decir, un elemento X puede pertenecer cierto porcentaje al conjunto y por tanto $1-X$ al complemento de dicho conjunto. Duarte O. ⁶ destaca las siguientes diferencias entre los conjuntos convencionales y difusos:

- La función de pertenencia asociada a los conjuntos concretos sólo puede tener dos valores: 1 o 0; mientras en los conjuntos difusos puede tener cualquier valor entre 0 y 1.
- Un elemento puede pertenecer (parcialmente) a un conjunto difuso y simultáneamente pertenecer (parcialmente) al complemento de ese conjunto. Lo anterior no es posible en los conjuntos concretos, ya que constituiría una violación al principio del tercer excluido.
- Las fronteras de un conjunto concreto son exactas, en tanto que las de un conjunto difuso son, precisamente, difusas, ya que existen elementos en las fronteras mismas, y estos elementos están a la vez dentro y fuera del conjunto.

Un ejemplo clásico para denotar la importancia de los conjuntos difusos es el definir los conjuntos de la altura de un humano, donde el universo se divide en 3 conjuntos, bajo, mediano y alto, en un sistema convencional se considera mediano de 160 cm a 180 cm y alto igual o mayor a 180 cm, en el ejemplo se tienen dos personas, una mide 179 cm y la otra 180 cm, entonces una se categoriza como mediana y la otra como alta, ahora bien, si se observa a estas dos personas una al lado de la otra,

⁵ Osear G Duarte, "Sistemas de lógica difusa. Fundamentos", 1999, 22–30.

⁶ Duarte.

¿está bien dicha afirmación?, cualquier humano que haga la evaluación dice que esto es incorrecto, debido a que a la percepción del ser humano ambos miden prácticamente lo mismo y que ambos son altos. Es aquí la importancia de los conjuntos difusos, ya que estos permiten evaluar el grado de verdad, pudiendo dar un grado de pertenencia para cada conjunto, definiendo así los conjuntos difusos en rangos que aumenten las fronteras para una toma de decisión, en la cual se consideren las posibilidades de pertenecer a diversos conjuntos, como se observa en la figura 1.

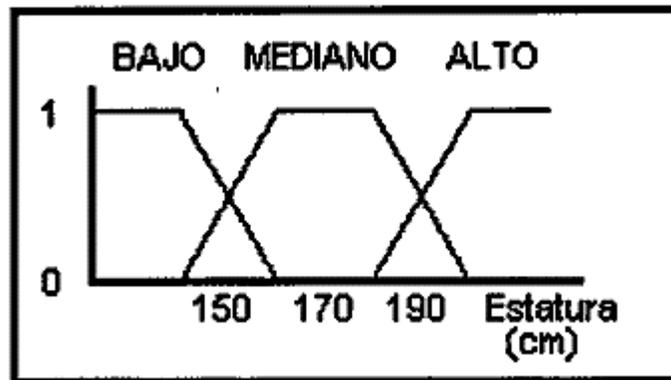


Figura 1 funciones de pertenencia de los conjuntos difusos definidos del ejemplo anterior ⁷

Existen diversas operaciones que se pueden realizar con los conjuntos difusos, como con la definición, las operaciones también se pueden fundamentar en las operaciones de los conjuntos convencionales, siempre teniendo en cuenta el significado de dichas operaciones. Se tienen así tres operaciones fundamentales, la unión, la intersección y el complemento. Donde dichas operaciones se definen en las Ecuaciones (1) (2) y (3).

$$\mu_{A \cap B}(x) = T[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \text{Ecu. (1)}$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \perp [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \text{Ecu. (2)}$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \text{Ecu. (3)}$$

⁷ Duarte.

Teniendo ya una forma generalizada para cada operación, siendo la forma generalizada para la intersección la T-norma y para la unión la T-conorma. Se define la T-norma en la Ecuación (4) y (5).

$$T: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad \text{Ecu. (4)}$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = T[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \text{Ecu. (5)}$$

Y se define la T-conorma en la Ecuación (6) y (7).

$$\perp: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad \text{Ecu. (6)}$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \perp [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \text{Ecu. (7)}$$

Funciones las cuales deben satisfacer las propiedades que se aprecian en la tabla 1.

Tabla 1 Propiedades de las T-normas y T-conormas

<i>Propriedade</i>	<i>T-norma</i>	<i>T-conorma</i>
Comutatividade	$x \top y = y \top x$	$x \perp y = y \perp x$
Associatividade	$(x \top y) \top z = x \top (y \top z)$	$(x \perp y) \perp z = x \perp (y \perp z)$
Monotonicidade	$x \top w \leq y \top z$, se $x \leq y, w \leq z$	$x \perp w \leq y \perp z$, se $x \leq y, w \leq z$
Elemento neutro	$x \top 1 = x \quad 0 \top 0 = 0$	$x \perp 1 = x \quad 1 \perp 1 = 1$

Fuente: ⁸

Siendo las T-normas y T-conormas más utilizadas las encontradas en la tabla 2.

⁸ Ernesto Araujo, "Lógica Difusa (Fuzzy) e Raciocínio Aproximado : Conceitos e Aplicações Lógica Difusa (Fuzzy) e Raciocínio Aproximado : Conceitos e Aplicações Fuzzy Logic and Approximate Reasoning : Concepts and Applications", 2014.

Tabla 2 Principales T-normas y T-conormas

<i>Nome</i>	<i>T-norma</i>	<i>T-conorma</i>
Zadeh	$\min(a, b)$	$\max(a, b)$
probabilística	$a.b$	$a + b - a.b$
Lukasiewicz	$\max(a + b - 1, 0)$	$\min(a + b, 1)$
Weber	$\begin{cases} 0, & \text{se } b = 1 \\ b, & \text{se } a = 1 \\ 0, & \text{senão} \end{cases}$	$\begin{cases} 0, & \text{se } b = 0 \\ b, & \text{se } a = 0 \\ 1, & \text{senão} \end{cases}$

Fuente :⁹

En cuanto al complemento, este está definido por una función del tipo

$$c: [0,1] \rightarrow [0,1] \quad \text{Ecu. (8)}$$

Donde dicha función debe satisfacer:

- Condiciones límite o frontera: $c(0) = 1$ y $c(1) = 0$.
- Monotonicidad: $8a; b \in [0; 1]$ si $a < b$ entonces $c(a) \geq c(b)$.
- c es una función continua.
- c es involutiva $8a \in [0; 1]$ se tiene $c(c(a)) = a$.

Además de los conjuntos difusos, las concepciones que se deben tener en cuenta antes de comenzar a comprender el funcionamiento de un sistema difuso como tal son varias, debiendo definir conceptos como el de una variable lingüística, donde una variable lingüística no es más que una variable difusa, es decir, que está conformada por palabras o sentencias en un lenguaje natural. Así como también se debe comprender el significado de un universo de discurso, el cual refiere al rango de posibles valores de una variable lingüística. Una variable lingüística a su vez lleva consigo el concepto de modificadores difusos¹⁰, estos normalmente se asocian con adverbios como: un poco, muy, ligeramente, entre otros, pudiendo emplear estos para cambiar la forma de los conjuntos difusos como se observa en la figura 2.

⁹ Araujo.

¹⁰ Eduardo Estrada Kassir, "Sistemas de control difuso", 2002.

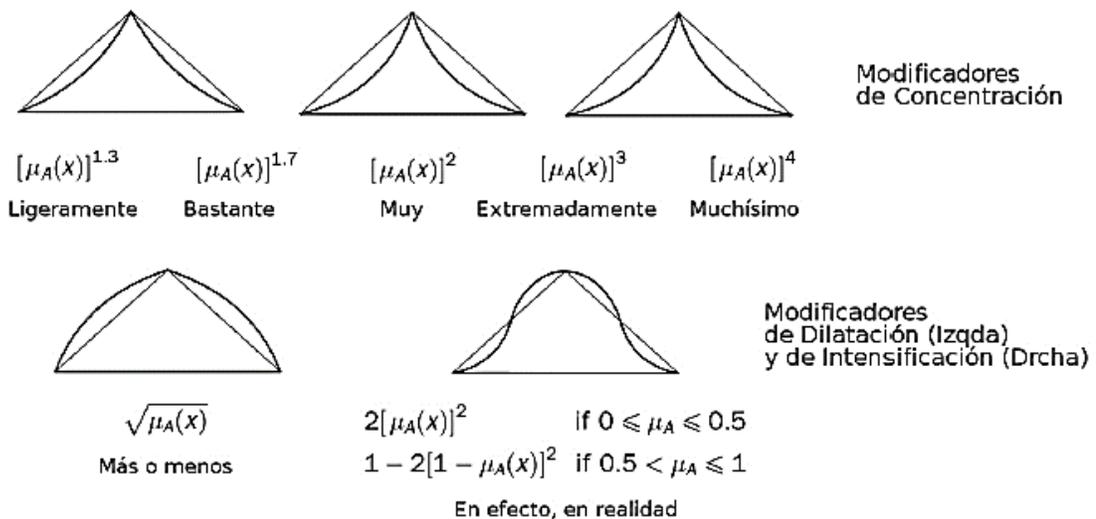


Figura 2 algunos modificadores y su representación gráfica y matemática ¹¹

Conociendo ya los fundamentos propios de la lógica difusa, a continuación, se prosigue a adentrar en los fundamentos que permiten llevar a un razonamiento aproximado, como lo son las reglas difusas, las cuales son una expresión lingüística que refleja una causa y un efecto ¹² y los mecanismos o sistemas de inferencia los cuales son aprovechados por un sistema lógico difuso, utilizándolos como motor de cálculo, ya que en un sistema difuso las entradas y salidas son números concretos, es decir, no son difusas. Donde la inferencia difusa se define más específicamente como el proceso de obtener un valor de salida para un valor de entrada empleando la teoría de conjuntos difusos ¹³. Un sistema de inferencia difusa (SID) consta de una etapa de fuzzificación, de evaluación de reglas, un proceso de agregación y una etapa de defuzzificación, donde en general los sistemas de inferencia difusa son mapeadores universales no lineales que requieren a su vez de operaciones intermedias lineales ¹⁴. Siendo en la fuzzificación donde se calculan los valores de verdad de cada entrada, en la agregación donde estos se relacionan mediante operadores como T-norma y T-conorma, es decir, se realizan intercesiones y/o uniones de dos o más conjuntos difusos; y en la defuzzificación donde se obtiene un valor concreto para la salida. U. Antonio define como los sistemas de inferencia

¹¹ González.

¹² Arnaldo Matute y William Bernal, "Técnicas de Lógica Difusa en Ingeniería de Control Fuzzy Logic Techniques in Control Engineering", III (2017), 125–34.

¹³ González.

¹⁴ Matute y Bernal.

más usados al Mamdani, el Takagi-Sugeno y el Tsukamoto, resumiendo cada uno de ellos de la siguiente manera:

Mamdani: calcula el valor de la verdad para cada entrada del sistema. El mínimo entre ellos o su producto, son las T-normas que se suelen emplear. Para la defuzzificación, se considera la función de membresía cortada a nivel del valor de la T-norma. La salida concreta es el centroide de esta figura que se ha formado como lo muestra la figura 3.

Takagi-Sugeno: se trata de un SID que mejoró a Mamdani en cuanto a su menor procesamiento computacional. No considera funciones de membresía para la salida, sino combinaciones lineales concretas de los valores de entrada. La salida concreta es un promedio ponderado entre los resultados de las combinaciones lineales de salida y los valores arrojados por la T-norma. La figura 4 muestra gráficamente en qué consiste.

Tsukamoto: en este caso, como en Mamdani, se consideran funciones de membresía de salida siempre inyectivas, ya que debe conseguirse la preimagen del valor de la T-norma. Estas se promedian luego ponderadamente para obtener una salida concreta como lo muestra la figura 5.

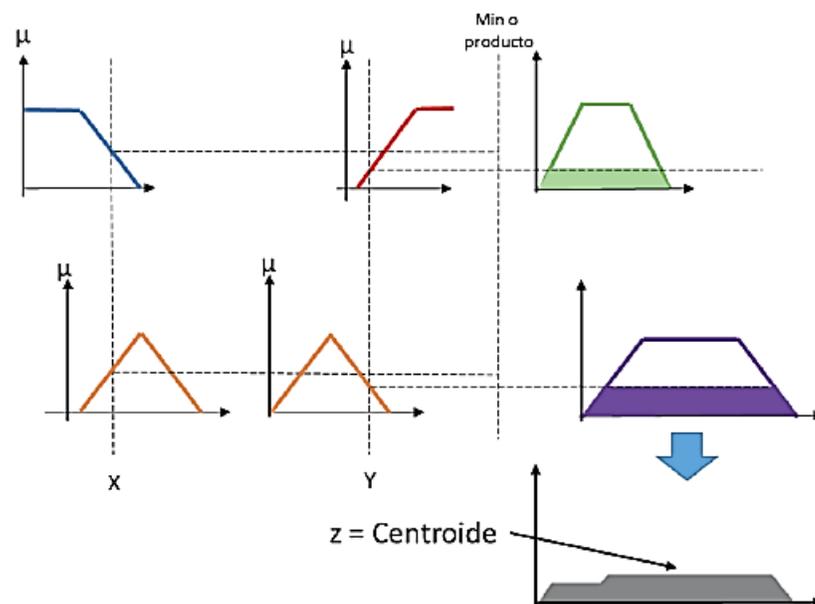


Figura 3 sistema de inferencia difusa tipo Mamdani ¹⁵

¹⁵ Matute y Bernal.

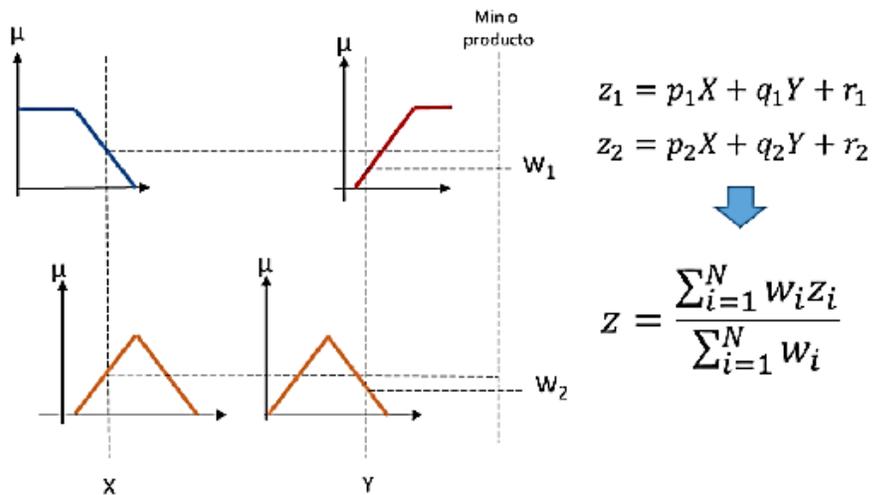


Figura 4 sistema de inferencia difusa tipo Takagi-Sugeno ¹⁶

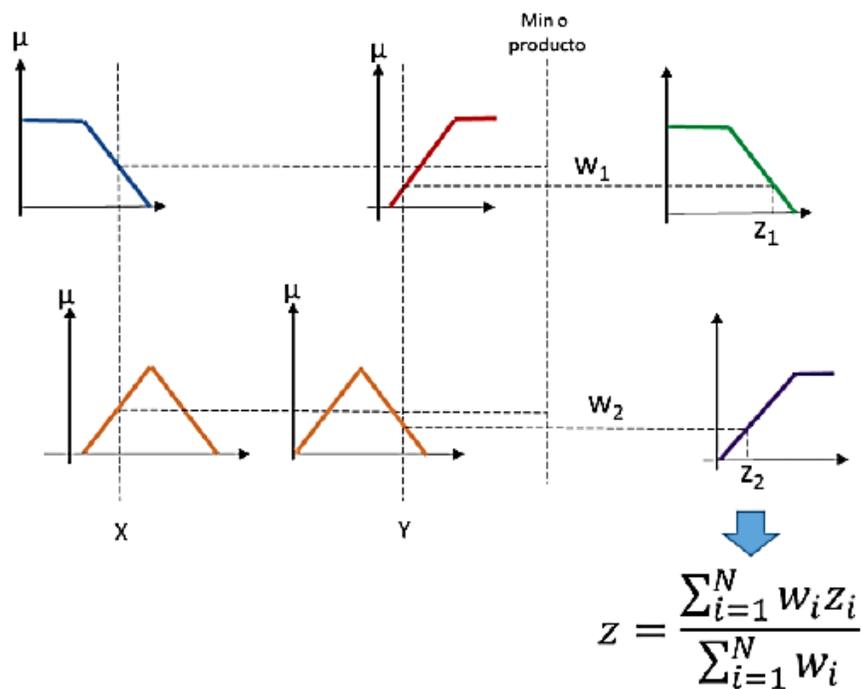


Figura 5 sistema de inferencia difusa tipo Tsukamoto ¹⁷

¹⁶ Matute y Bernal.

¹⁷ Matute y Bernal.

En cuanto a las reglas difusas U. Antonio define que su calidad de difusa radica en la implementación de adjetivos imprecisos y relativos, *como Si X pertenece a A, entonces Y pertenece a B*, donde X y Y son elementos y, A y B conjuntos difusos ¹⁸.

Para comprender mejor el Proceso de inferencia González C. propone una estructura básica para los métodos de Mandani y Takagi-Sugeno, los cuales se aprecian en las figuras 6 y 7.

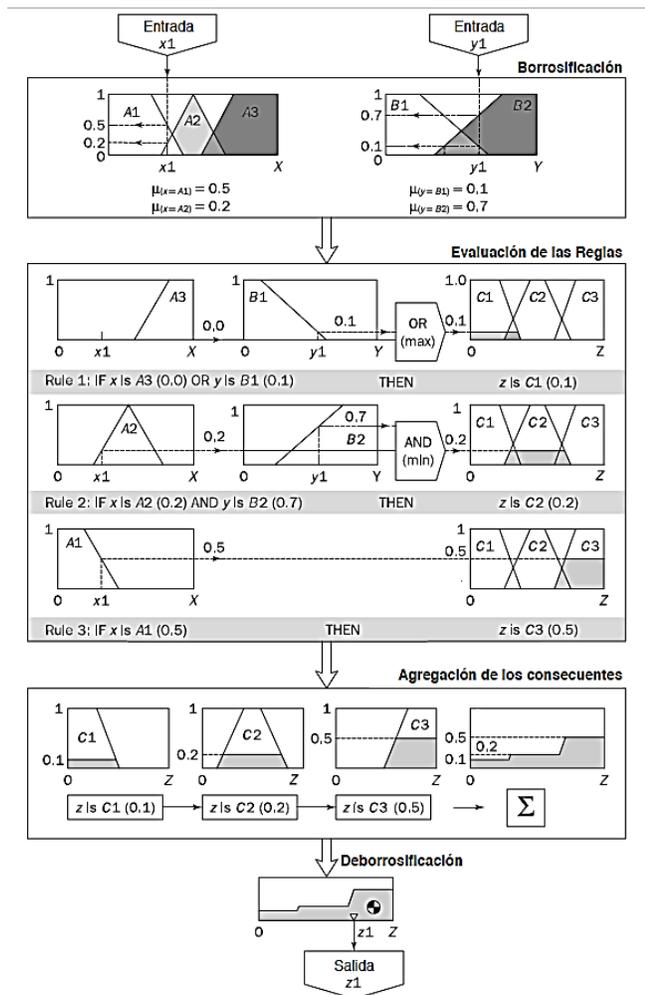


Figura 6 Estructura básica de inferencia Mandani ¹⁹

¹⁸ Matute y Bernal.

¹⁹ González.

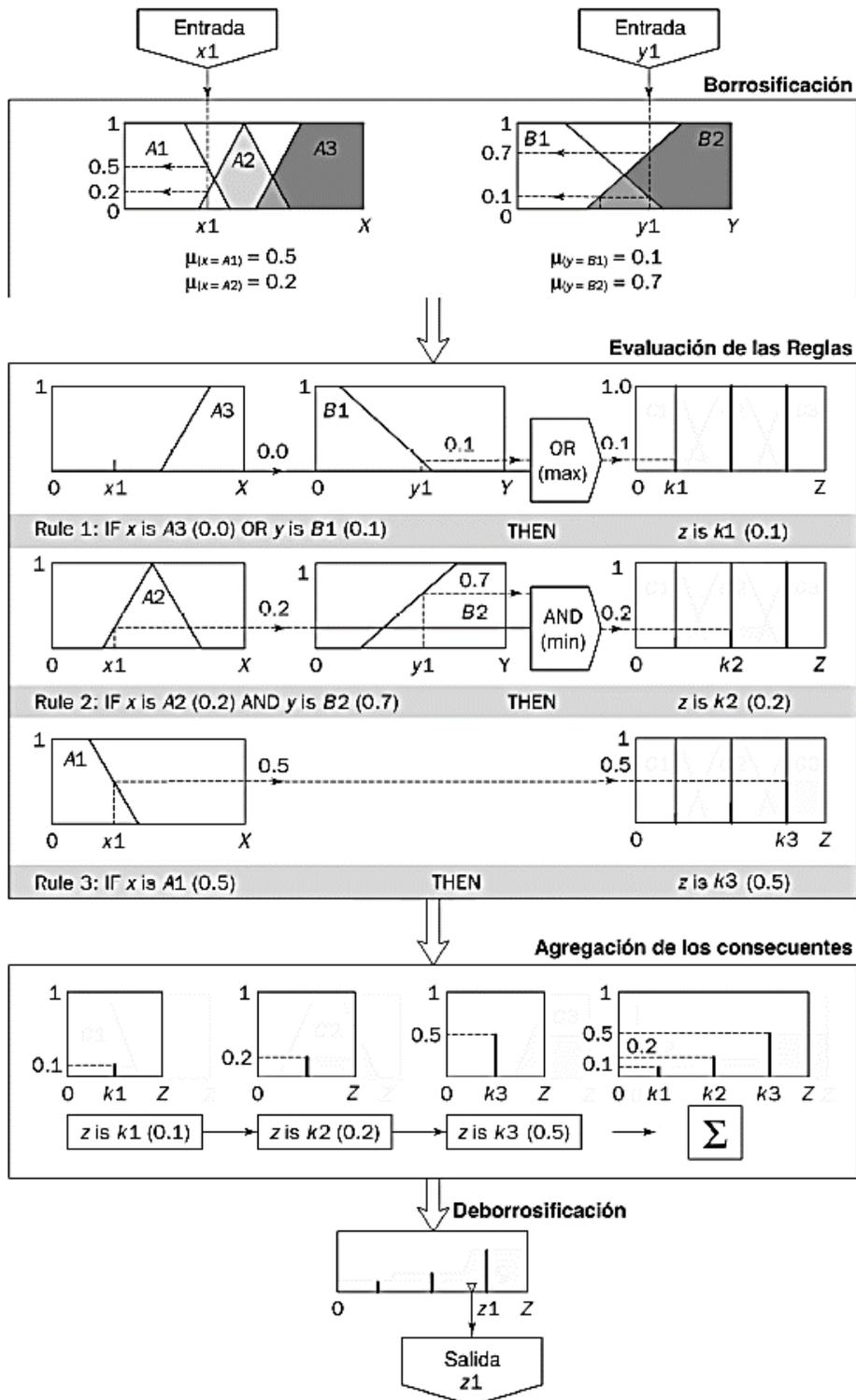


Figura 7 Estructura básica de Inferencia Takagi-Sugeno ²⁰

1.2 Sistemas de control difuso

El concepto de lógica difusa fue concebido a mediados de los años sesenta por Lofti Zadeh, ingeniero eléctrico iraní y profesor de la Universidad de California, en Berkeley, quien en 1965 publica el primer artículo de lógica difusa llamado “*Fuzzy Sets*”²¹, donde se dan a conocer por primera vez los conceptos de esta técnica. Más tarde, en 1974 Ebrahim Mamdani aplica los conceptos de lógica difusa en el control de procesos y desarrolla el primer control difuso para la regulación de un motor de vapor y en 1985 Takagi y Sugeno aportan a la teoría del control difuso un nuevo método llamado Takagi-Sugeno-Kang (TSK), como alternativa del método Mamdani, siendo estos los inicios de la lógica difusa en el control. Ya para el año 2000 según Tejada G. las líneas de investigación que abordaban el control difuso principalmente estaban orientadas a la eficiencia y sistematicidad en el proceso de adquisición de los conocimientos de la persona experta hacia la base de conocimientos del control de lógica difusa, el modelado difuso de procesos y uso de esos modelos en el diseño de controladores de lógica difusa, procedimientos sistemáticos para el diseño de lazos de control borroso y la correspondiente teoría de sistemas dinámicos difusos, el diseño de sistemas capaces de aprender con la eventual combinación de lógica difusa y las redes neuronales y el hardware para el control difuso tal que se aportaron soluciones como en el caso de la velocidad en el control de robots²².

Un controlador basado en lógica difusa busca resolver procesos complejos a partir de soluciones simples, donde la experiencia que se tiene sobre el proceso es la base de conocimiento, denotando que estos responden de mejor manera que los controladores lineales ante la variación de parámetros, no linealidades, perturbaciones, tiempos muertos, entre otros²³. En todo caso normalmente se asume que el controlador debe emular el comportamiento de un operario, donde la base de reglas representa dicha experiencia, y su formulación se puede obtener de la experiencia del operario y de conocimientos adquiridos de ensayos o simulaciones, donde la información que se obtiene de las simulaciones debe estar relacionada al comportamiento del sistema en lazo cerrado y/o abierto. La base de reglas suele representarse por tablas. Esta es clara en el caso de 2 variables de

²¹ D Guzmán, “La lógica difusa en ingeniería : Principios , aplicaciones y futuro”, 24.2 (2006), 87–107.

²² Guillermo Tejada, “tutorial de lógica difusa” (Lima, Perú: UNMSM, 2000).

²³ Regalado Crisanto y Julio César, “LÓGICA DIFUSA Y SISTEMAS DE CONTROL” (Universidad de Piura, 1999)

<http://www.bibliocentral.udep.edu.pe/search~S10*spl?/tlogica+difusa+y+sistemas+de+control/tlogica+difusa+y+sistemas+de+control/-3%252C0%252C0%252CB/frameset&FF=tlogica+difusa+aplicada+al+control+de+voltaje+y+potencia+reactiva+en+subestaciones+de+distribucion&1%25>.

entrada y una de salida, en la medida que la cantidad de variables lingüísticas crece, también lo hace la tabla, y más difícil se hace su edición. Para R. Crisanto y J. César las maneras de emplear las reglas pueden variar, sin embargo, la estructura es la misma sin importar si se trata de un controlador o un modelo, donde principalmente son dos tipos de reglas que se emplean, las reglas difusas de Mamdani y las reglas difusas de Takagi-Sugeno ²⁴, describiéndolas dichos autores de la siguiente manera:

Reglas difusas de Mamdani

IF x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C THEN u_1 is D, u_2 is E

Donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de entrada (por ejemplo, error, derivada del error y derivada segunda del error), A, B y C son funciones de membresía de entrada (p.ej., alto, medio, bajo), u_1 y u_2 son las acciones de control (p.ej., apretura de válvulas) en sentido genérico son todavía variables lingüísticas (todavía no toman valores numéricos), D y E son las funciones de membresía de la salida, en general se emplean singleton por su facilidad computacional, y AND es un operador lógico difuso, puede ser otro. La primera parte de la sentencia "IF x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C" es el antecedente y la restante es el consecuente.

Un ejemplo es

IF error is Positivo Grande AND derivada del error is Positiva Baja THEN u is Positiva Chica.

Reglas difusas de Takagi-Sugeno

IF x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C THEN $u_1=f(x_1,x_2,x_3)$, $u_2=g(x_1,x_2,x_3)$

En principio es posible emplear $f()$ y $g()$ como funciones no lineales, pero la elección de tal función puede ser muy compleja, por lo tanto en general se emplean funciones lineales.

Condensando las ventajas de cada tipo según dicho autor en la tabla 3.

²⁴ Crisanto y César.

Tabla 3 Ventajas de las reglas difusas de Mamdani y Takagi-Sugeno

	Reglas difusas de Mamdani	Reglas difusas de Takagi-Sugeno
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Es intuitivo. • Tiene una amplia aceptación. • Está bien adaptado a la incorporación de conocimiento y experiencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Es computacionalmente eficiente. • Trabaja bien con técnicas lineales (por ejemplo, como lo disponible para controladores PID). • Trabaja bien con técnicas de optimización y control adaptable. • Tiene garantizada una superficie de control continua. • Está bien adaptado al análisis matemático.

Fuente: ²⁵

En el control difuso las variables de los procesos no se miden en sentido común, sin embargo, se sabe que la lógica difusa trata las variables como palabras que interpretan el sentido común, es por ello la necesidad de que en un control difuso las variables de entrada pasen por un proceso de adaptación antes de introducir el estado de dichas variables al controlador ²⁶, etapa la cual ya se trató anteriormente en los procesos de inferencia difusa, distinguiendo a esta etapa como fusificación. En general un control difuso incluye todas las etapas de un proceso de inferencia, razón por la cual se profundizo en ellas anteriormente. En la figura 8 se pueden observar todas las transformaciones a las cuales son sometidas las variables en un lazo de control difuso, donde se definen una serie de relaciones que interpretan el sentido común las cuales permiten generar una actuación la cual es aplicada a la planta.

²⁵ Crisanto y César.

²⁶ Samir Kouro y Rodrigo Musalem, "Control Mediante Lógica Difusa", 2002, 1–7.

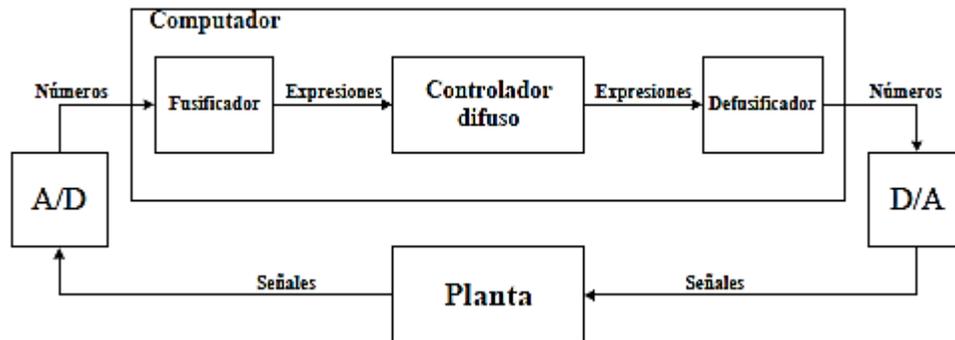


Figura 8 Lazo de control difuso ²⁷

1.3 Diseño de controladores difusos

El primer paso en el diseño del controlador es conocer el comportamiento del proceso a controlar y establecer si existe la necesidad de un controlador lógico difuso. Partiendo de la base del conocimiento y la estructura de control, luego se debe definir el tipo de controlador, es decir Mamdani o Takagi-Sugeno (TS). Lo más intuitivo es Mamdani, TS es muy bueno para estructuras con optimización ²⁸. Normalmente, para problemas de seguimiento o regulación con referencia distinta de cero, las variables que se controlan son el error y su derivada, como se observa en la figura 9.

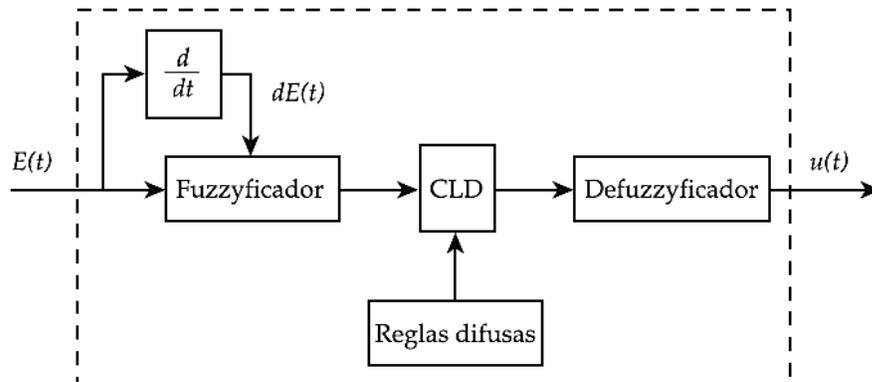


Figura 9 Diagrama de bloques de un controlador difuso genérico basado en el error y la variación del error ²⁹

²⁷ Kouro y Musalem.

²⁸ Crisanto y César.

²⁹ Guzmán.

Para dimensionar el controlador se usa el rango de las variables de entrada y de salida, donde para ello puede ser necesario pesar las entradas y la salida, principalmente para hacer un ajuste fino. La elección de las funciones de membresía no es tan crítica como su rango de representación, con esto se representa el conocimiento de las variables, como se observa en las figuras 10 y 11.

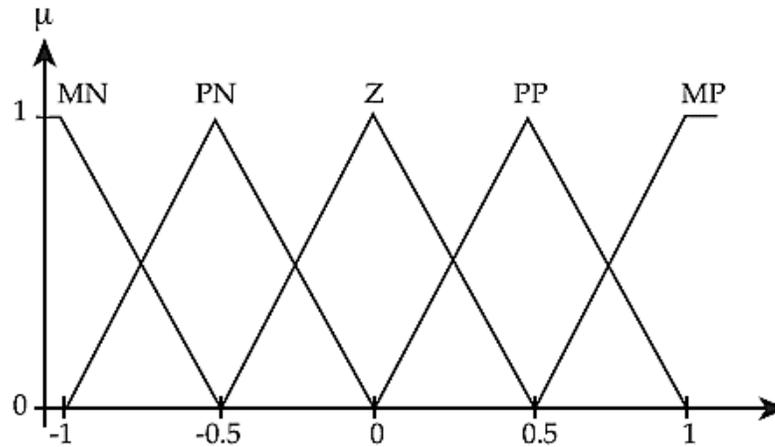


Figura 10 función de membresía de $E(t)$ y $dE(t)$ ³⁰

Donde,

Tabla 4 Notación de la función de membresía del error

Notación	Descripción
MN	Muy negativo
PN	Poco negativo
Z	Cero
PP	Poco positivo
MP	Muy positivo

Fuente: ³¹

³⁰ Guzmán.

³¹ Guzmán.

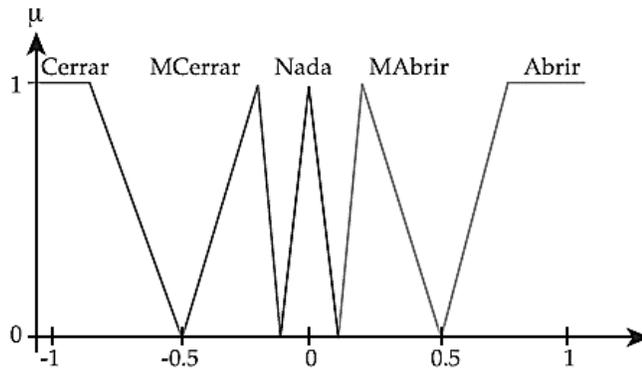


Figura 11 función de membresía de la salida ³²

Teniendo en cuenta el significado de las entradas y su efecto en la salida (figura 12), se define la base de reglas, donde naturalmente, en la edición de la base de reglas se representa la estrategia de control. La elección de los métodos de inferencia, agregado, defusificación y las definiciones en las operaciones entre conjuntos son un procedimiento de prueba y error evaluando el desempeño del controlador. Los procedimientos de análisis y diseño pueden ser iterativos hasta lograr un desempeño aceptable.

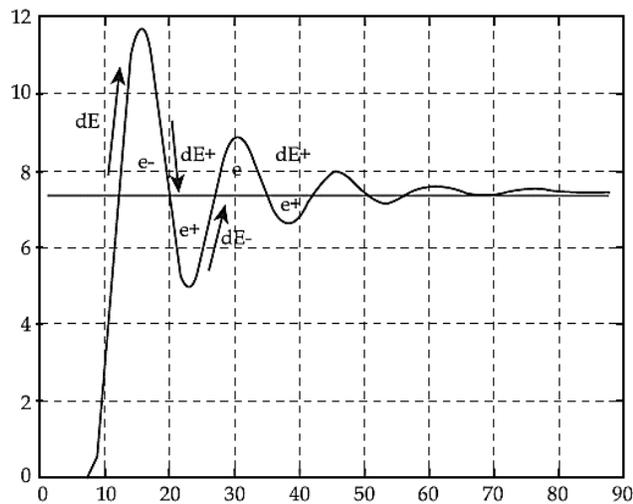


Figura 12 Significado del error y variación del error ³³

³² Guzmán.

³³ Guzmán.

Tabla 5 Conjunto de reglas difusas para una arquitectura mamdani

		$dE(t) = E(t) - E(t-T)$				
		MN	PN	Z	PP	MP
E(t)	MN	Cerrar	Cerrar	Cerrar	Cerrar	Cerrar
	PN	MCerrar	MCerrar	MCerrar	MCerrar	MCerrar
	Z	Cerrar	MCerrar	Nada	MAbrir	Abrir
	PP	MAbrir	MAbrir	MAbrir	MAbrir	MAbrir
	MP	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir

Fuente: ³⁴

Tabla 6 Conjunto de reglas difusas para una arquitectura Takagi-Sugeno

		$dE(t) = E(t) - E(t-T)$				
		MN	PN	Z	PP	MP
E(t)	MN			-1		
	PN			-0.5		
	Z	-1	-0.5	0	0.5	1
	PP			0.5		
	MP			1		

Fuente: ³⁵

Samir Kouro Establece un procedimiento para el diseño de un controlador difuso, donde básicamente las concepciones son las mismas expresadas anteriormente, con la diferencia que su metodología de diseño es realizada en base a un control PID ³⁶, definiendo que resulta conveniente utilizar como variables de entrada al controlador, el error existente en el proceso ($e=r-y$), la variación del error (de/dt) y la acumulación del error ($\int e(t)dt$), suponiendo que se desee controlar un sistema de una única entrada y salida (SISO). Donde cada una de las entradas debe ser fusificada, y al igual que en el caso de controlador únicamente basado en el error y la variación del error (PD), para realizar ese punto se dispone de una gran cantidad de funciones, la cuales pueden ser gaussianas, triangulares, trapezoidales, entre

³⁴ Guzmán.

³⁵ Guzmán.

³⁶ Kouro y Musalem.

otras. Resaltando Kouro el siguiente procedimiento para la definición de dichas funciones:

- Se elige el número de funciones, de forma se logren representar todos los estados que la variable pueda tomar.
- Se diseñan de un ancho mínimo suficiente que permita obviar el ruido de la medición.
- Se establece un cierto grado de cruzamiento entre las distintas funciones, para no incurrir en estados pobremente definidos.
- Se recomienda partir con funciones simétricas, para posteriormente realizar ajustes.
- Inicialmente se recomiendan un entrecruzamiento del 50%, de tal modo que cada elemento en al menos dos funciones.

Prosiguiendo con la definición de las reglas, asignando a cada una su actuación correspondiente, y dichas actuaciones deben ser defusificadas, definiendo el autor el método del centroide como el más utilizado. Kouro expresa en la figura 13 un diagrama que representa un controlador difuso tipo PID. Así como también en la figura 14 introduce un ajuste importante, ya que, según él, una gran cantidad de entradas refiere a una gran cantidad de reglas, razón por la cual se hace conveniente retirar el factor integrativo de las entradas del controlador difuso, para incorporarlo en forma individual sumándolo a la actuación final, teniendo así un controlador híbrido, en el que el error y la variación del error son variables difusas, y la acumulación del error es determinística (crisp).

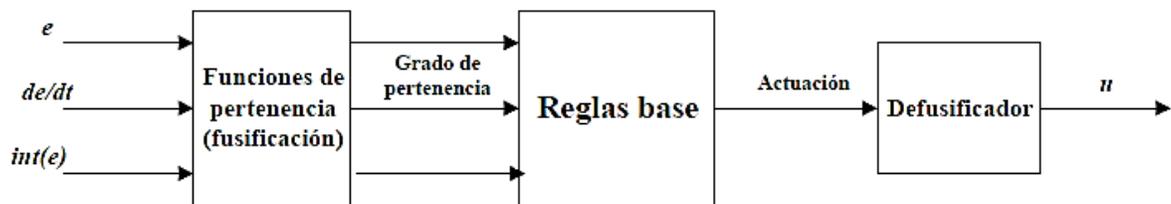


Figura 13 Diagrama de control difuso tipo PID ³⁷

³⁷ Kouro y Musalem.

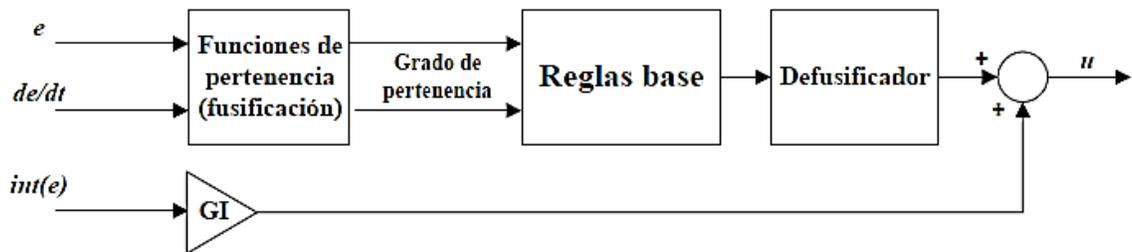


Figura 14 diagrama de control difuso modificado ³⁸

Otro factor muy importante a tener en cuenta es que ante cualquier respuesta del controlador inapropiada, o no comprendida entre los límites de los márgenes de respuesta establecidos en el diseño, el proceso de ajuste requiere una reevaluación de todo el proceso efectuado anteriormente, lo que incluye la elección de las funciones de pertenencia, de las reglas base, entre otras, Kouro expresa que prácticamente amerita empezar desde cero, por lo cual él sugiere como alternativa incorporar ganancias previas al proceso de fusificación, con valores que corrijan las falencias de interpretación difusa, como se observa en la figura 15.

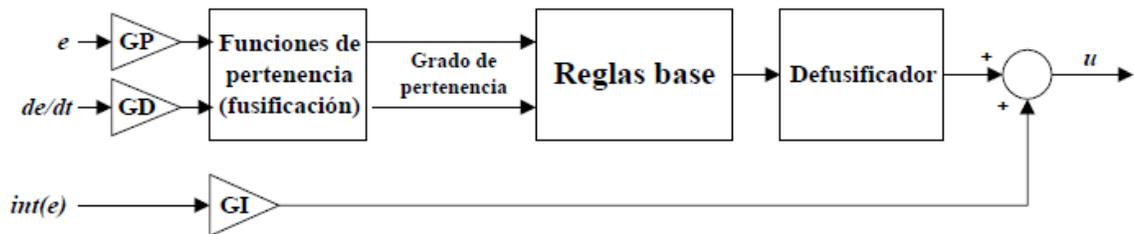


Figura 15 Diagrama de control difuso con ganancias ³⁹

Según ⁴⁰ se ha observado que los controladores difusos PI y difusos PD, pueden manejar los sistemas antes mencionados mejor que sus contrapartes convencionales, donde los controladores PI difusos se prefieren más que los controladores PD difusos ya que los controladores PD difusos no pueden eliminar los errores de estado estacionario. Sin embargo, los controladores PI difusos muestran un bajo rendimiento durante la fase transitoria para procesos de orden superior debido a su operación de integración interna, por lo cual, para obtener un rendimiento general mejorado, se prefieren los controladores PID difusos.

³⁸ Kouro y Musalem.

³⁹ Kouro y Musalem.

⁴⁰ B M Mohan y Arpita Sinha, "Analytical structure and stability analysis of a fuzzy PID controller", 8 (2008), 749–58 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.06.003>>.

Un enfoque más actual sobre el diseño de controladores lo da U. Antonio ⁴¹, orientando sus aplicaciones en el control adaptativo, describiendo que en la sección anterior, se realizó el análisis para el diseño de lo que se puede llamar un controlador difuso básico, lo que no es más que la construcción de un sistema de inferencia difusa completo que actúa como controlador para el seguimiento de una referencia por parte de una planta de segundo orden. Sin embargo, su aplicación puede ir más allá en el control adaptativo, en el cual el diseño del controlador debe ser orientado para condiciones de operación en las cuales sus parámetros deban cambiar en el tiempo. Estas son situaciones que pueden presentarse ante sistemas a controlar que presenten no linealidades o variaciones temporales en sus parámetros. Para ello, se acuden a alternativas adicionales a las presentadas en la sección anterior, o también a las que obedecen a esquemas como los que se muestran en ⁴², los cuales se representa a continuación:

Control clásico con parámetros variados por un sistema de inferencia difusa: en ocasiones, puede ser necesario que el controlador $C(s)$ que muestra la figura 16 sea tan flexible como para que sus parámetros cambien debido a condiciones de operación específicas. De tal modo, es posible que un sistema de inferencia difusa varíe, por ejemplo, las ganancias de un controlador PID u otros parámetros de un compensador en adelanto-atraso. En la figura, se propone que lo haga a partir de reglas difusas sobre el error $e(t)$ y su cambio, pero también pudiera considerarse algún estado medible de la planta $G(s)$ o la propia salida $y(t)$.

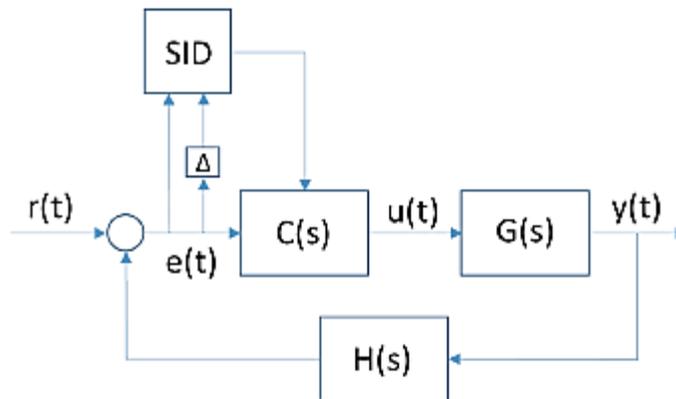


Figura 16 Esquema de control adaptativo en el cual un sistema de inferencia difusa modifica parámetros en un control clásico ⁴³

Sistema de inferencia difusa en interacción con un controlador clásico: es posible la interacción de dos controladores si el rendimiento esperado del control de

⁴¹ Matute y Bernal.

⁴² Matute y Bernal.

⁴³ Matute y Bernal.

la planta lo demanda. No solo la superposición es posible en este esquema, sino el trabajo alternado entre ellos, que pudiera obedecer a que, en ocasiones, la operación no lineal de la planta requiera un controlador difuso; pero que, en otras, un controlado clásico sea ideal. La figura 17 muestra el esquema propuesto que puede considerar un sumador a la salida de ambos controladores o un conmutador que obedezca a decisiones de control adicionales.

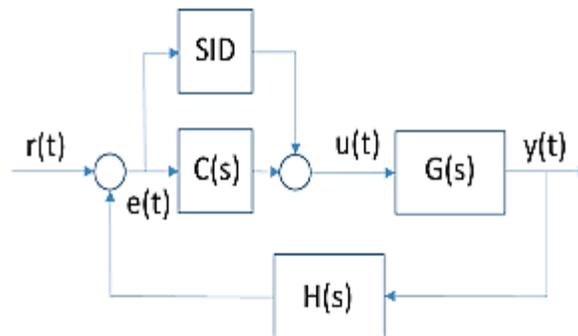


Figura 17 Esquema de control adaptativo en el cual un sistema de inferencia difusa interactúa con un controlador clásico ⁴⁴

Control adaptivo con modelo de referencia: es una de las opciones donde más desafíos de investigación pueden encontrarse. A diferencia del esquema propuesto en la figura 16, el controlador se modifica obedeciendo al error entre la salida de la planta real $G(s)$ a controlar y la salida que provee un modelo de referencia $\tilde{G}(s)$ de la misma planta que se ejecuta en tiempo real, ante la misma entrada. Con ello, se busca que la salida de planta real se parezca lo más posible a la salida de su modelo teórico, el cual evidentemente no presenta las variaciones que puede obtener la planta real. En este caso, el controlador se modifica, de manera tal, que compensa las variaciones de la planta. Para ello, es necesario un algoritmo de adaptación que puede incorporar sistemas de inferencia difusa, entre otros. Sin embargo, en este esquema se debe considerar una arquitectura de control lo suficientemente versátil y rápida para ejecutar en tiempo real el modelo teórico, con lo cual se incrementa su complejidad y, por consiguiente, sus costos y consumo de potencia. Por ello, también ha sido necesario considerar para la implementación de $\tilde{G}(s)$, técnicas de modelado difuso con las cuales se pueda reducir el costo computacional del algoritmo de control. Es así como, aunque la figura 18 no muestra en ningún bloque un sistema de inferencia difusa, es procedente considerar este esquema en las presentes reflexiones ya que las técnicas de lógica difusa son pertinentes tanto para el algoritmo de adaptación como para el requerido modelado de la planta a controlar.

⁴⁴ Matute y Bernal.

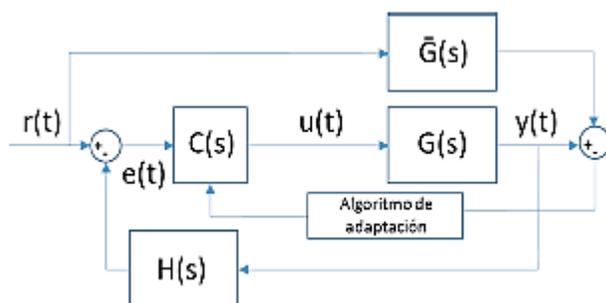


Figura 18 Esquema de control adaptativo con modelo de referencia.⁴⁵

1.4 Implementación del control difuso

La unión de los conceptos de lógica difusa desarrollados por Zadeh y el área de control de procesos encuentra numerosas aplicaciones en la industria, medicina, aeronáutica, electrónica, incluso en los últimos años, en el mundo de los aparatos electrodomésticos, y todo el proceso de transformación energética que busca la implementación de fuentes de energía renovables

A principios del siglo XXI se llevaron a cabo diversas investigaciones de control difuso aplicadas al control de motores, como lo fue el control difuso adaptativo aplicado a un control de velocidad ⁴⁶ desarrollado por Juan Arguello, donde se da a conocer la técnica de control adaptativo FRMLC (control por modelo de referencia, usado en sistemas no lineales, variantes en el tiempo y difíciles de modelar matemáticamente), aplicada a controladores difusos con el fin de ajustar su base de reglas de forma que un sistema se comporte de acuerdo a un modelo de referencia, donde en su investigación dicha técnica es aplicada al control de velocidad de un automóvil, el cual está sujeto a perturbaciones que afectan su dinámica. En cuanto al control de motores para esos mismos años también se tiene la investigación de Julio Cesar Mogollón ⁴⁷, trabajado este en el diseño e implementación de un control difuso de velocidad para un motor DC de potencia, donde de sus resultados concluye que por medio de un control FPD+I es posible controlar la velocidad de un motor D.C de potencia mejorando algunas características del control convencional

⁴⁵ Matute y Bernal.

⁴⁶ Juan Arguello y Gabriel Romero, "CONTROL DIFUSO ADAPTATIVO APLICADO A UN CONTROL DE VELOCIDAD", 2002, 18–25.

⁴⁷ JULIO CESAR MOGOLLÓN; MARÍN ULISES DAVID MÚNERA DÍAZ, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL FUZZY DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR DC DE POTENCIA", 2003.

PID tales como el sobrepaso y el tiempo de levantamiento, puesto que se elimina el compromiso que existe entre una rápida respuesta y un sobrepaso pequeño. Sin embargo, no se justifica la implementación de un controlador difuso cuando las características transitorias del lazo de control no sean críticas, las condiciones de operación en estado estable no sean exigentes y el sistema pueda ser aproximado a un modelo lineal confiable en todo el rango de operación.

Para el año 2008 ya había investigaciones relacionadas con la aplicación de controladores difusos aplicados a las energías renovables, como el control de un sistema eólico-fotovoltaico utilizando un control difuso ⁴⁸, desarrollado por Francisco López, quien prueba de manera virtual un controlador basado en lógica difusa para un sistema híbrido de generación de energía. La simulación digital empleó como herramienta el Labview, obteniéndose resultados gráficos descriptivos de la acción del controlador, así como la interfaz gráfica representativa del comportamiento del sistema.

Con los avances en el control no lineal, las investigaciones en procesos conformados por muchas variables de estado evolucionaron, con ello el control más eficiente de dispositivos de vuelo no tripulados, los cuales manejan 6 variables de estado o más, como el quadrotor más conocido hoy en día como drone, ya para el año 2009 se tenían muchas investigaciones del control difuso aplicado a estos dispositivos de vuelo, como el controlador difuso de un quadrotor ⁴⁹, desarrollado por Morata, quien desarrolla la implementación de un modelo para estabilizar el funcionamiento del quadrotor, para la estabilización utiliza un controlador difuso al que como entradas le llegan la altura deseada y los tres giros que se quieren hacer y como salida se obtendrá la potencia necesaria en los motores para alcanzar esa situación desde su estado actual, la simulación del modelo se hizo con la herramienta Simulink de Matlab con tiempos de respuesta y prestaciones muy buenas.

Las aplicaciones de la lógica difusa no solo se han orientado a las nuevas tecnologías y el control no lineal, también se han aplicado a la mejora en el control de procesos estudiados desde los inicios del mismo, como lo es el control de temperatura, como muestra de este se tiene la investigación de Palacio y García ⁵⁰ llevada a cabo en el año 2010, desarrollando un control de temperatura utilizando lógica difusa, quienes presentaron el diseño e implementación de un control de

⁴⁸ Francisco E López, "Control de un sistema eólico-fotovoltaico utilizando un controlador fuzzy", 2009.

⁴⁹ Francisco Morata, "Controlador Fuzzy de un Quadrotor", 2009.

⁵⁰ C Palacio-gómez J García-sucerquia, "Control de Temperatura Utilizando Lógica Difusa Temperature Controller by Using Fuzzy Logic", 2010, 1–5.

temperatura que utiliza lógica difusa como elemento de toma de decisiones, la temperatura fue fijada a un valor preestablecido en el rango de temperaturas de 30 hasta 100 grados centígrados.

El control difuso también ha sido muy aplicado en la robótica, en el control de manipuladores, como lo fue la implementación de un control difuso para el control cinemático directo en un robot manipulador ⁵¹, desarrollado por Tibaduiza y Amaya, la cual fue llevada a cabo en el año 2011, donde se utiliza la lógica difusa como herramienta de control para cada una de las articulaciones de un robot tipo puma, donde lograron obtener movimientos con una respuesta más suave, lo que repercute en menores picos de corriente (< 10% de sobrepico máximo) y por ende en un menor consumo de potencia, lo que genera un menor costo de utilización del manipulador.

Un robusto control adaptativo difuso de un controlador unificado de flujo de potencia ⁵² fue desarrollado en el año 2012 por Morsli en Argelia, donde en su investigación los métodos de control propuestos incluyen un controlador directo proporcional e integral (PI) y un controlador de lógica difusa adaptativa (AFLC). Las prestaciones de estos controladores fueron evaluadas bajo condiciones de funcionamiento del sistema de potencia y con los resultados se demostró que PI y AFLC son muy efectivos en la mejora de la estabilidad del sistema de potencia transitoria y muy robusto frente a parámetros de la línea de transmisión variable. Observando ya como con el paso de los años la aplicación de los sistemas difusos era cada vez más profundizada. Ya también para el mismo año se profundizaba en la aplicación de la lógica difusa en la visión artificial, teniendo por ejemplo la investigación llevada a cabo por David Cortes ⁵³ quien profundizo en técnicas de Visión y lógica difusa para la detección de la pupila, el cual argumenta que los sistemas biométricos basados en la medición de la pupila e iris estaban constantemente ganando importancia en varias aplicaciones, pero sin embargo, los métodos existentes de detección de pupila, así como detección de límite entre pupila e iris eran o son en general computacionalmente costosos, además de que no eran capaces de detectar el límite de la pupila con precisión conduciendo a errores en los diversos procesos. Por lo que en su investigación presentó resultados preliminares del uso de técnicas de visión por computadora y lógica difusa para la detección eficiente y precisa de la pupila. Otro autor que implemento la visión artificial mediante el uso de la lógica

⁵¹ D A Tibaduiza y I Amaya, "Implementación de un control fuzzy para el control cinemático directo en un robot manipulador", 19 (2011), 312–22.

⁵² Sebaa Morsli, Allaoui Tayeb, y Denai Mouloud, "A robust adaptive fuzzy control of a unified power flow", 20.1 (2012), 87–98 <<https://doi.org/10.3906/elk-1003-468>>.

⁵³ David Cortés Sáenz, Dra Nelly, y Gordillo Castillo, "Técnicas de Visión y Lógica Difusa para la Detección de la Pupila", 2012.

difusa fue Antonio Gonzales ⁵⁴ quien la utilizó para la detección de puertas, permitiéndole tanto poder medir la creencia del robot como manejar imágenes en las que las puertas se ven desde diferente perspectiva y con distintos tamaños y condiciones de luminosidad.

Las aplicaciones de la lógica difusa, no solo tomaron fuerza en la industria de la manufactura, en el desarrollo de nuevas tecnologías de control aéreo, y de transformaciones energéticas, también, también comienza a ser aplicada en el control de trenes que mejoran la velocidad de transportarse de un punto a otro, como lo demuestra la investigación de ⁵⁵ desarrollada por Liu y Han en China, quienes propusieron un sistema de control ferroviario de alta velocidad basado en el método de control difuso, el sistema de control difuso del ferrocarril de alta velocidad estaba diseñado en el software Matlab de acuerdo con la experiencia y el conocimiento de expertos y funcionaba de la siguiente manera: Al principio, las variables de entrada y salida se fusionan en el proceso de fuzzificación, luego se diseña la función de membresía y las reglas de control se discuten en detalle para que correspondan con el conocimiento experto, como la discusión de los parámetros sobre la velocidad máxima y el esfuerzo de tracción se estudian en detalle y finalmente el proceso de defuzzificación puede generar los resultados directamente para controlar el tren de alta velocidad. Donde sus resultados indicaron que el sistema de control difuso es efectivo y preciso en el proceso de control ferroviario de alta velocidad.

Adentrando un poco más en lo que es el estado del arte, en el año 2015, con la estandarización de los nuevos protocolos de comunicación, que involucran la utilización de todas las tecnologías de comunicación inalámbrica, Rico Ascensión investigó sobre la automatización y control inteligente difuso de un reactor UASB vía Wireless con Labview ⁵⁶ desarrollando un prototipo para la automatización y el control inteligente de la medición de pH, aplicado a un biorreactor de recirculación de flujo ascendente (UASB), considerando esto como una aplicación dentro del área de la salud, implementando el uso de la plataforma de LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos myRIO, para el monitoreo Wireless del mismo, el sistema permitió que el control y la acción fuera realizada de manera semejante a la que el

⁵⁴ Antonio Gonz, "Deteccion de puertas mediante vision y logica difusa Detección de puertas mediante visión y lógica difusa".

⁵⁵ W Y Liu, J G Han, y X N Lu, "Expert Systems with Applications A high speed railway control system based on the fuzzy control method", 40 (2013), 6115–24 <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.04.034>>.

⁵⁶ I. Rico Ascención, "AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INTELIGENTE FUZZY DE UN REACTOR UASB VÍA WIRELESS CON LABVIEW", 2015, 1–8.

operario realizaba, debido a que en las reglas de inferencia del sistema difuso están programadas con la experiencia y acciones dadas por el experto.

Los avances en el 2016 en cuanto a la automatización de los sistemas de energía fotovoltaica, es decir energía obtenida de la radiación solar, han permitido poder obtener una mayor cantidad de HSP (horas de sol pico), en lugares del planeta donde la incidencia es baja, aquí la aplicación de los controladores difusos también a jugado un papel muy importante, es por ellos que son muchas las investigaciones al respecto, como lo es la investigación de Víctor Patiño, Osvaldo Venturini y José Escobar ⁵⁷, quienes trabajaron en el diseño y validación de un controlador basado en lógica difusa para asegurar la perpendicularidad del sol analizando puntos críticos en la señal de control.

En el propio análisis de fallas y riesgos, se encontraron diversas aplicaciones de la lógica difusa, en el 2017 Oscar Obando investigo sobre el riesgo químico, desarrollando un modelo computacional de cálculo mediante lógica difusa ⁵⁸, permitiendo presentar un nuevo enfoque semicuantitativo en este tipo de valoración de riesgo en función del tiempo, logrando demostrar la factibilidad de la técnica para su uso en la estimación del riesgo químico por inhalación.

1.5 Lógica difusa tipo 2

El termino de conjuntos difusos tipo II, fue introducido en 1975 por Zadeh como una extensión al concepto de los conjuntos difusos tipo I ⁵⁹. Un conjunto difuso de tipo II se define por una función de pertenencia difusa, donde el valor o grado de pertenencia para cada elemento de este conjunto es un conjunto difuso en el intervalo [0,1] en lugar de un valor nítido ⁶⁰. Donde si las circunstancias son tan borrosas, que incluso hay problemas para definir el grado de pertenencia como un valor puntual, se usa entonces un conjunto difuso tipo 2 ⁶¹. Los grados adicionales

⁵⁷ Victor Patiño, Osvaldo Venturini, y José Escobar, "CONCEPÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM CONTROLADOR BASEADO EM LÓGICA CONCEPÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM CONTROLADOR BASEADO EM", *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2016.

⁵⁸ Oscar Obando y Cesar Garita, "Riesgo Químico : Un Modelo Computacional de Cálculo Mediante Lógica Difusa", 2017.

⁵⁹ Dongrui Wu y Woei Wan, "A simplified type-2 fuzzy logic controller for real-time control", 45.4 (2006), 503–16.

⁶⁰ Oscar Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications*, Springer (Berlín, 2012) <<https://doi.org/10.1007/978-3-642-24663-0>>.

⁶¹ Luis G Marín, "Introducción a Sistemas Difusos Modelo computacional Sistemas Difusos", 2016 <<https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiGgcHqzcPsAhVHmVkkKHQRmALMQFjAAegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.u->

de libertad hacen que las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos tipo II sean funciones tridimensionales ⁶², como se observa en la figura 19. Por lo tanto, los conjuntos difusos de tipo II pueden manejar más tipos de incertidumbres con magnitudes mayores utilizando una base de reglas más pequeña que sus contrapartes de tipo I.

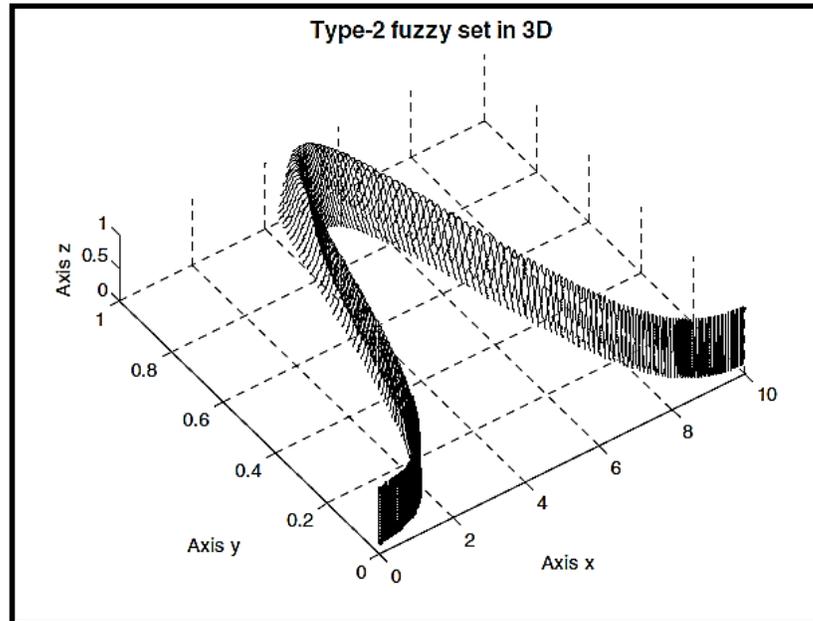


Figura 19 Vista tridimensional de una función de membresía tipo 2. ⁶³

Un conjunto difuso de tipo II, denotado como \tilde{A} (Ecuación 1), se caracteriza por una función de pertenencia de tipo II $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$, donde $x \in X$ y $u \in J_x \subseteq U = [0,1]$,

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\} \quad \text{Ecu. (9)}$$

donde $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$. Para un universo continuo de discurso, \tilde{A} puede expresarse como, reescribiendo (1) se expresa (Ecuación 2):

[cursos.cl/2Fingenieria/2F2016/2F2FEL7012/2F1%2Fmaterial_docente/2Fbajar/3Fid_material/3D1487705&usg=AOvVaw0KD-JWq>](https://www.researchgate.net/publication/3121487705).

⁶² Hicham Chaoui et al., "Computationally Efficient Adaptive Type-2 Fuzzy Control of Flexible-Joint Manipulators", *MDPI Open access robotics*, 2 (2013), 66–91 <<https://doi.org/10.3390/robotics2020066>>.

⁶³ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications*.

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_X} u_A - (x, u) | (x, u) \quad J_X \subseteq [0,1] \quad \text{Ecu. (10)}$$

donde x es la variable primaria, J_X es un intervalo $[0,1]$ que representa la pertenencia primaria de x , u es la variable secundaria y $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ es la función de pertenencia secundaria de x ⁶⁴

Oscar Castillo y Patricia Melin proponen 3 ejemplos que describen los conjuntos difusos tipo 2 ⁶⁵, los cuales se exponen a continuación:

Ejemplo 1. Considere el caso de un conjunto difuso caracterizado por una función de membresía gaussiana con una media m y una desviación estándar que puede tomar valores en $[\sigma_1, \sigma_2]$, es decir,

$$\mu(x) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - m)}{\sigma} \right]^2 \right\}; \quad \sigma \in [\sigma_1, \sigma_2] \quad \text{Ecu. (11)}$$

En correspondencia con cada valor de σ , se obtiene una curva de membresía diferente (ver Figura 20). Entonces, el grado de membresía de cualquier x particular (excepto $x = m$) puede tomar cualquier x de una serie de valores posibles dependiendo del valor de σ , es decir, el grado de membresía no es un número nítido, es un conjunto difuso. La figura 20 muestra el dominio del conjunto difuso asociado con $x = 0.7$; sin embargo, la función de membresía asociada con este conjunto difuso no se muestra en la figura.

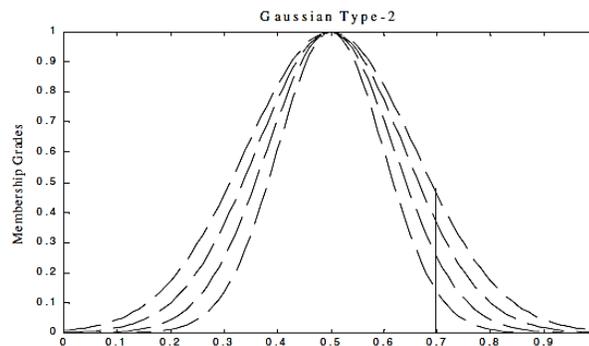


Figura 20 Un conjunto difuso de tipo 2 que representa un conjunto difuso de tipo 1 con desviación estándar incierta ⁶⁶

⁶⁴ Chaoui et al.

⁶⁵ Oscar Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*, ed. Springer (Berlin, 2008).

⁶⁶ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*.

Ejemplo 2. Considere el caso de un conjunto difuso con una función de membresía gaussiana que tiene una desviación estándar fija σ , pero una media incierta, tomando valores en $[m1, m2]$, es decir,

$$\mu(x) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - m)}{\sigma} \right]^2 \right\}; m \in [m1, m2] \quad \text{Ecu. (12)}$$

Nuevamente, $\mu(x)$ es un conjunto difuso. La Figura 21 muestra un ejemplo de tal conjunto.

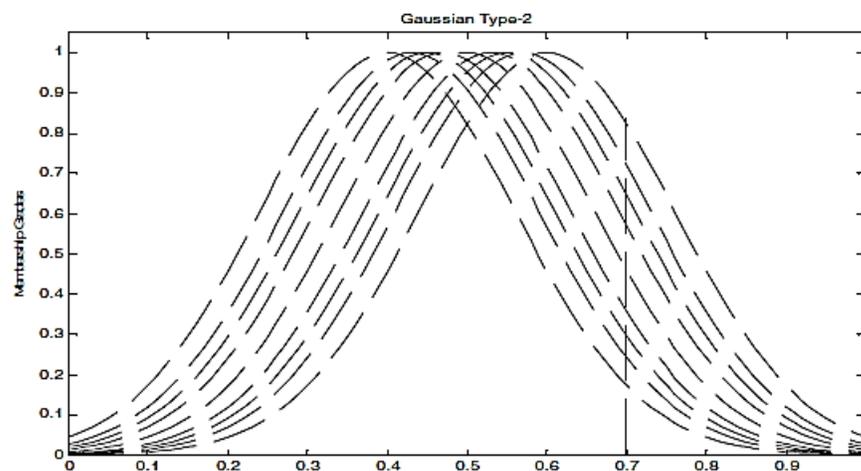


Figura 21 Un conjunto difuso de tipo 2 que representa un conjunto difuso de tipo 1 con media incierta. La media es incierta en el intervalo $[0.4, 0.6]$.⁶⁷

Ejemplo 3. Considere un conjunto difuso tipo 1 caracterizado por una función de membresía gaussiana (media M y desviación estándar σ_x), que proporciona una membresía nítida $m(x)$ para cada entrada $x \in X$, donde

$$m(x) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - M)}{\sigma_x} \right]^2 \right\} \quad \text{Ecu. (13)}$$

Esto se muestra en la Figura 26. Ahora, imagine que esta membresía de x es un conjunto difuso. Llamando a los elementos de dominio de este conjunto "membresías primarias" de x (denotado por μ_1) y los grados de membresía de estas membresías primarias "membresías secundarias" de x [denotado por $\mu_2(x, \mu_1)$]. Entonces, para una x fija, se obtiene un conjunto difuso de tipo 1 cuyos elementos de dominio son membresías primarias de x y cuyos grados de membresía

⁶⁷ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*.

correspondientes son membresías secundarias de x . suponiendo que las membresías secundarias siguen una Gauss con media $m(x)$ y desviación estándar σ_m , como en la Figura 22, se puede describir la función de membresía secundaria para cada x como

$$\mu_2(x, \mu_1) = e^{-\frac{1}{2}[(\mu_1 - m(x)) / \sigma_m]^2} \quad \text{Ecu. (14)}$$

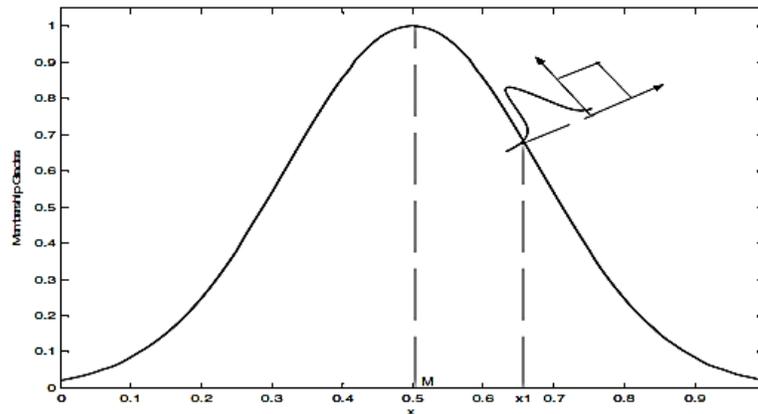


Figura 22 Un conjunto difuso de tipo 2 en el que el grado de membresía de cada punto de dominio es un conjunto gaussiano de tipo 1 ⁶⁸

Se observa como en todos los ejemplos se usan conjuntos Gaussianos, esto es debido a que es uno de los más comunes, definiendo a un conjunto difuso gaussiano de tipo 2 como aquel en el que el grado de membresía de cada punto de dominio es un conjunto gaussiano de tipo 1 contenido en $[0, 1]$. En el ejemplo 3 ya se muestra un conjunto difuso gaussiano tipo 2, pero otra forma de ver las funciones de membresía de tipo 2 es en forma tridimensional, en la cual se puede apreciar mejor la idea de borrosidad de tipo 2, esta apreciación ya se había observado anteriormente en la figura 19, solo que para el momento no se tenía una concepción tan clara como la que se tiene en este punto de la investigación.

Antes de adentrarse en los sistemas de lógica difusa tipo II, se debe comprender la totalidad de un conjunto difuso tipo II, para lo cual se deben conocer diversas definiciones de conceptos que uno a uno conforman lo que es en sí dicho conjunto y su fenomenología, como lo es un intervalo de tipo 2, la huella de incertidumbre, la distinción de las funciones de membresía superior e inferior y las operaciones que se pueden realizar con dichos conjuntos. La huella de incertidumbre (FOU), (FOU,

⁶⁸ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*.

footprint of uncertainty, por sus siglas en ingles) de los conjuntos difusos tipo II, define la incertidumbre de \tilde{A} como la unión de todas las funciones de membresías primarias ⁶⁹. Esta consiste en una región delimitada como se observa en la región sombreada de la Figura 23. En el dominio empírico, la incertidumbre aparece asociada a los errores y resoluciones en los instrumentos de medición y en el dominio cognoscitivo, la incertidumbre emerge de la vaguedad y la ambigüedad del lenguaje natural ⁷⁰

Matemáticamente, esta unión de todas las funciones de membresía primaria puede denotarse en la ecuación ⁷¹.

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad \text{Ecu. (15)}$$

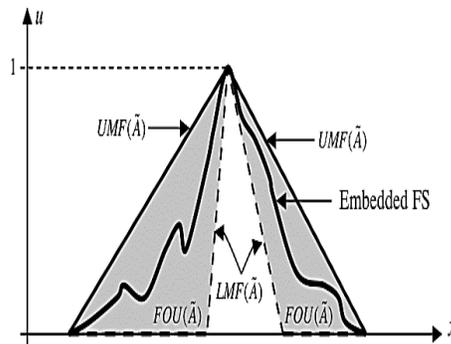


Figura 23 Uncertainty trace (FOU), superior membership function (UMF) and lower membership function (LMF). ⁷²

La función de membresía superior (UMF, upper membership function, por sus siglas en ingles) y la función de membresía inferior (LMF, lower membership function, por sus siglas en inglés) son dos funciones de membresía de tipo I, las cuales representan los límites para la huella de incertidumbre (FOU) de un conjunto difuso tipo II ⁷³.

⁶⁹ Jerry M Mendel et al., "Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple", 14.6 (2006), 808–21; Mónica Rodríguez y Yeniffer Huertas, "Metodología para el Diseño de Conjuntos Difusos Tipo-2 a partir de Opiniones de Expertos", *Revista Ingeniería*, 21.2 (2016), 121–37.

⁷⁰ Marín.

⁷¹ Jerry M Mendel y Robert I Bob John, "Type-2 Fuzzy Sets Made Simple", 10.2 (2002), 117–27; Rodríguez y Huertas.

⁷² Mendel et al.

⁷³ Qilian Liang et al., "Connection Admission Control in ATM Networks Using Survey-Based Type-2 Fuzzy Logic Systems", 30.3 (2000), 329–39.

La función de membresía superior (UMF) está asociada con el límite superior de la huella de incertidumbre (FOU), mientras que la función de membresía inferior (LMF) se asocia con el límite inferior de la huella de incertidumbre (FOU) ⁷⁴, donde matemáticamente la función de membresía superior es

$$\text{upper(FOU } (\tilde{A})) = N(m, \sigma_2; x) \quad \text{Ecu. (16)}$$

Y la función de membresía inferior es

$$\text{lower (FOU } (\tilde{A})) = N(m, \sigma_1; x) \quad \text{Ecu. (17)}$$

En la Figura 23 se representa el concepto de las funciones de membresía; la superior se grafica utilizando una línea continua, y la inferior se traza por medio de una línea discontinua. Algunos ejemplos de huellas de incertidumbre muy comunes son la Gaussiana con desviación estándar fija y valor medio incierto (ver figura 24), Gaussiana con valor medio fijo y desviación estándar incierta (ver figura 25) y la de forma triangular (ver figura 26).

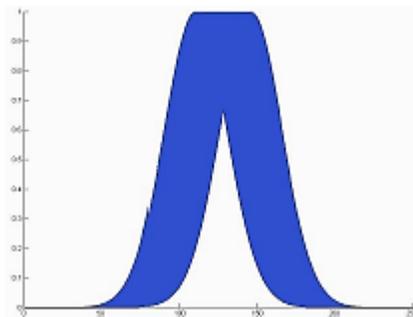


Figura 24 Gaussiana con desviación estándar fija y valor medio "incierto" ⁷⁵

⁷⁴ Liang et al.; Qilian Liang y Jerry M Mendel, "Overcoming Time-Varying Co-Channel Interference Using Type-2 Fuzzy Adaptive Filters", 2017 <<https://doi.org/10.1109/82.899635>>; Qilian Liang y Jerry M Mendel, "Equalization of Nonlinear Time-Varying Channels Using Type-2 Fuzzy Adaptive Filters", 2017 <<https://doi.org/10.1109/91.873578>>.

⁷⁵ Marín.

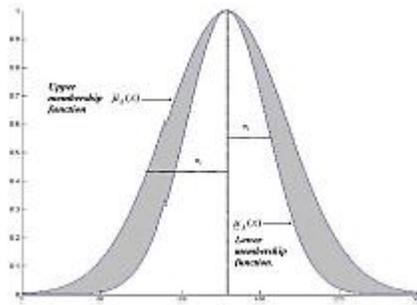


Figura 25 Gaussiana con valor medio fijo y desviación estándar "incierto" ⁷⁶

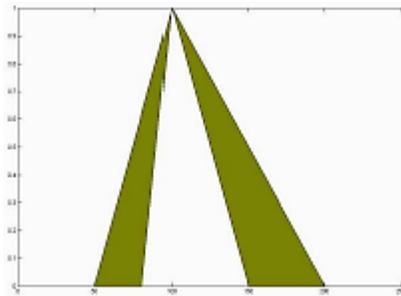


Figura 26 Forma triangular ⁷⁷

Para construir las funciones de pertenencia límite se debe capturar la vaguedad en el problema por medio de una función de pertenencia tipo uno, obtenga los parámetros de la función de pertenencia, Identificar la incertidumbre anexa, identificar como esta incertidumbre anexa afecta los parámetros de la función de pertenencia y con esta información de debe proponer una huella de incertidumbre.

En cuanto a las operaciones de los conjuntos difusos tipo 2, Castillo y Melin ⁷⁸ describen que en el caso de los conjuntos difusos de tipo 2, i ($i = 1, \dots, r$), cuyas funciones de membresía secundarias son conjuntos difusos de tipo 1. Para calcular la unión, intersección y complemento de conjuntos difusos de tipo 2, se necesita extender las operaciones binarias de mínimo (o producto) y máximo, y la operación unitaria de negación, desde números nítidos hasta conjuntos difusos de tipo 1, porque en cada x , $\mu_i(x, u)$ es una función (a diferencia del caso de tipo 1, donde $\mu_i(x)$ es un número nítido). La herramienta para computar la unión, intersección y

⁷⁶ Marín.

⁷⁷ Marín.

⁷⁸ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*.

complemento de los conjuntos difusos tipo 2 es el principio de extensión de Zadeh (Zadeh, 1975).

Para exponer las operaciones Castillo y Melin consideran dos conjuntos difusos tipo 2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 , es decir,

$$\tilde{A}_1 = \int x \mu_{\tilde{A}_1}(x) / x \quad Ecu. (18)$$

Y

$$\tilde{A}_2 = \int x \mu_{\tilde{A}_2}(x) / x \quad Ecu. (19)$$

Y definen que la unión de \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 es otro conjunto difuso de tipo 2, así como la unión de difuso de tipo 1 los conjuntos A_1 y A_2 son otro conjunto difuso tipo 1. donde más formalmente, se tiene la siguiente expresión

$$\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2 = \int x \in X \mu_{\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2}(x) / x \quad Ecu. (20)$$

Describiendo que básicamente, la unión entre dos funciones de membresía secundaria debe realizarse entre cada posible par de membresías primarias. Si hay más de una combinación de pares da el mismo punto, luego en la unión se mantiene el que tiene el máximo grado de membresía. Considerando un ejemplo simple para ilustrar la operación sindical. En La figura 27 se trazan dos funciones de membresía gaussianas de tipo 2, y la unión se muestra en la Figura 28

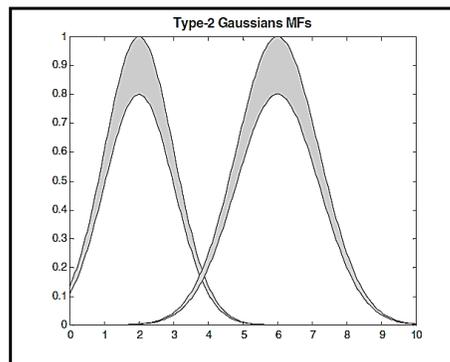


Figura 27 dos funciones de membresía gaussianas ⁷⁹

⁷⁹ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*.

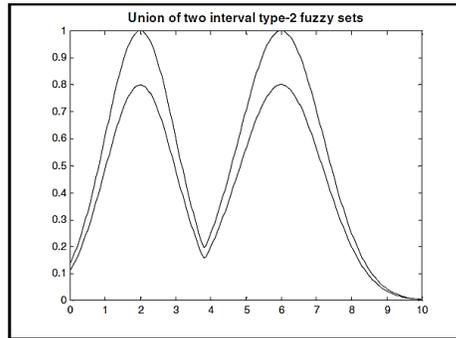


Figura 28 Unión de dos funciones de membresía gaussianas ⁸⁰

La intersección de \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 es otro conjunto difuso de tipo 2, así como la intersección de los conjuntos difusos de tipo 1 A_1 y A_2 es otro conjunto difuso de tipo 1. Más formalmente, se tiene la siguiente expresión

$$\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2 = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2}(x) / x \quad Ecu. (21)$$

Se ilustra la intersección de dos funciones de membresía gaussianas de tipo 2 en la Figura 29, se puede explicar la ecuación $\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2$ mediante la operación de "encuentro". Básicamente, la intersección entre dos funciones de membresía secundarias debe realizarse entre cada posible par de membresías primarias. Si más de una combinación de pares da el mismo punto, entonces en la intersección se mantiene el que tiene un grado máximo de membresía.

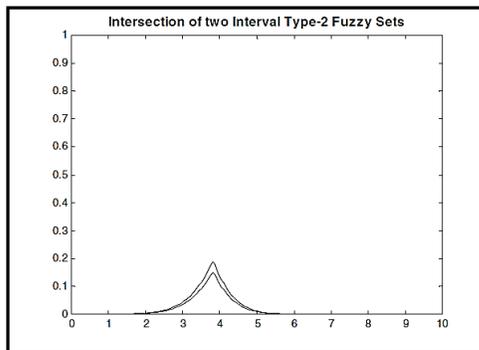


Figura 29 Intersección de dos funciones de membresía gaussianas ⁸¹

⁸⁰ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*.

⁸¹ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*.

El complemento del conjunto \tilde{A} es otro conjunto difuso de tipo 2, así como el complemento del conjunto difuso de tipo 1 A es otro conjunto difuso de tipo 1. Más formalmente se tiene

$$\tilde{A}' = \int x \mu_{\tilde{A}'}(x) / x \quad \text{Ecu. (22)}$$

donde el primo denota complemento en la ecuación anterior. En esta ecuación, μ_1 es una función de membresía secundaria, es decir, en cada valor de x μ_1 es una función (a diferencia de caso de tipo 1 donde, en cada valor de x , μ_1 es un valor de punto).

Por último, Castillo y Melin exponen un ejemplo para entender mejor las operaciones de conjuntos difusos tipo 2, donde ilustran las operaciones de unión, intersección y complemento para dos conjuntos difusos tipo 2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 , y para un elemento particular x para el que las funciones de pertenencia secundaria en estos dos conjuntos son $\mu_{\tilde{A}_1}(x) = 0.5 / 0.1 + 0.8 / 0.2$ y $\mu_{\tilde{A}_2}(x) = 0.4 / 0.5 + 0.9 / 0.9$. Usando en las operaciones la t-norma mínima y la t-conorma máxima, obteniendo los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}_1 \cup \tilde{A}_2}(x) &= \mu_{\tilde{A}_1}(x) \cup \mu_{\tilde{A}_2}(x) \\ &= (0.5 / 0.1 + 0.8 / 0.2) \cup (0.4 / 0.5 + 0.9 / 0.9) \\ &= (0.5 \wedge 0.4) / (0.1 \vee 0.5) + (0.5 \wedge 0.9) / (0.1 \vee 0.9) + \\ &\quad (0.8 \wedge 0.4) / (0.2 \vee 0.5) + (0.8 \wedge 0.9) / (0.2 \vee 0.9) \quad \text{Ecu. (23)} \\ &= 0.4 / 0.5 + 0.5 / 0.9 + 0.4 / 0.5 + 0.8 / 0.9 \\ &= \max \{0.4, 0.4\} / 0.5 + \max \{0.5, 0.8\} / 0.9 \\ &= 0.4 / 0.5 + 0.8 / 0.9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2}(x) &= \mu_{\tilde{A}_1}(x) \cap \mu_{\tilde{A}_2}(x) \\ &= (0.5 / 0.1 + 0.8 / 0.2) \cap (0.4 / 0.5 + 0.9 / 0.9) \\ &= (0.5 \wedge 0.4) / (0.1 \wedge 0.5) + (0.5 \wedge 0.9) / (0.1 \wedge 0.9) + \\ &\quad (0.8 \wedge 0.4) / (0.2 \wedge 0.5) + (0.8 \wedge 0.9) / (0.2 \wedge 0.9) \quad \text{Ecu. (24)} \\ &= 0.4 / 0.1 + 0.5 / 0.1 + 0.4 / 0.2 + 0.8 / 0.2 \\ &= \max \{0.4, 0.5\} / 0.1 + \max \{0.4, 0.8\} / 0.2 \\ &= 0.5 / 0.1 + 0.8 / 0.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}_1'}(x) &= 0.5 / (1 - 0.1) + 0.8 / (1 - 0.) \quad \text{Ecu. (25)} \\ &= 0.5 / 0.9 + 0.8 / 0.8. \end{aligned}$$

1.6 Sistemas difusos tipo 2

Un sistema de lógica difusa tipo II es un sistema basado en su estructura y componentes a un sistema de lógica difusa tipo I⁸². Un sistema de lógica difusa tipo II se compone de cinco componentes: un fuzzificador, una base de reglas, un motor de inferencia difuso, un reductor de tipo y un defuzzificador como se observa en la Figura 30⁸³

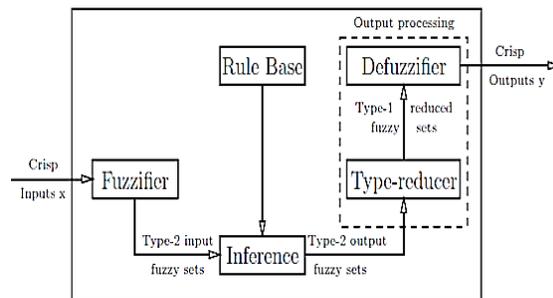


Figura 30 . Sistema lógico difuso tipo 2.⁸⁴

En el bloque de procesamiento de salida este posee un componente adicional al de un sistema de lógica difusa tipo I, llamada reductor de tipo, la cual reduce un conjunto difuso tipo II a un conjunto difuso tipo I, para posteriormente mediante la defuzzificación se obtenga una salida nítida⁸⁵.

En la etapa de fuzzificación, el fuzzificador asigna entradas nítidas a conjuntos difusos tipo II mediante el mapeo de un punto nítido $x = (x_1, \dots, x_p)^T$ ⁸⁶. El fuzzificador mapea entradas en los conjuntos difusos asociados para determinar el grado de pertenencia de cada variable de entrada⁸⁷.

En la Figura 31 se representa de manera esquemática el proceso de fuzzificación para conjuntos difusos tipo II. El resultante de la fuzzificación es un conjunto difuso tipo I que representa los grados secundarios para cada entrada⁸⁸. Las funciones de

⁸² Majid Almaraashi, "Learning of Type-2 Fuzzy Logic Systems using Simulated Annealing by Declaration of Authorship" (DE MONTFORT UNIVERSITY, 2012); Nesrine Baklouti, Robert John, y Adel M Alimi, "Interval Type-2 Fuzzy Logic Control of Mobile Robots", 2012 <<https://doi.org/10.4236/jilsa.2012.44031>>.

⁸³ Chaoui et al.

⁸⁴ Chaoui et al.

⁸⁵ Chaoui et al.; Almaraashi.

⁸⁶ Chaoui et al.

⁸⁷ Baklouti, John, y Alimi.

⁸⁸ Almaraashi.

membresía superior e inferior se calculan para cada universo del discurso, obteniendo como resultado un conjunto de tipo I ⁸⁹.

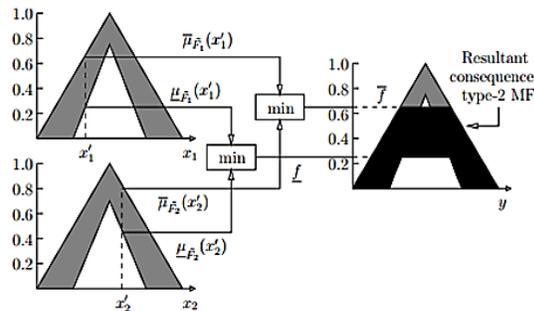


Figura 31 proceso de fusificación. ⁹⁰.

La estructura de las reglas de un sistema de lógica difusa tipo II y tipo I es la misma, es una declaración condicional en forma IF-THEN, la parte IF llamada antecedente y la parte THEN llamada consecuente ⁹¹.

Entonces, para un sistema de lógica difusa tipo II con p entradas $x_1 \in X_1, \dots, x_p \in X_p$ y una salida $y \in Y$, salida única de entrada múltiple (MISO) ⁹².

Considerando que hay reglas M en un sistema de lógica difusa tipo II, la primera regla se puede escribir de la siguiente manera ⁹³ (donde F y G son conjuntos difusos apropiados para cada regla):

$$R^l = IF x_1 \text{ es } x_1^l, \dots, x_p \text{ es } x_p^l, THEN y \text{ es } G^l \quad Ecu. (26)$$

El motor de inferencia de un sistema de lógica difusa tipo II, proporciona un mapeo de los conjuntos difusos tipo II de entrada a los conjuntos difusos tipo II de salida (Chaoui et al., 2013; John,1998). Cada regla en la base de conocimiento se interpreta como una implicación difusa tipo II que, cuando se agrega con las entradas difusas, infiere un conjunto difuso \tilde{B}^1 . ⁹⁴

⁸⁹ Chaoui et al.

⁹⁰ Dongrui Wu et al., "Enhanced Karnik – Mendel Algorithms", 17.4 (2009), 923–34.

⁹¹ Almaraashi.

⁹² Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications*.

⁹³ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications*.

⁹⁴ Castillo, *Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications*; Chaoui et al.

$$\mu_{B^l}(y) = \sqcup_{x \in X} [\mu_{\tilde{A}_x}(x) \sqcap \mu_{R^l}(x, y)]$$

Ecu. (27)

Esta es la relación entrada / salida, que se mantiene entre el conjunto difuso tipo II que activa una regla determinada en el motor de inferencia y el conjunto difuso tipo II en la salida de ese motor.

La reducción de tipo tiene como objetivo reducir los conjuntos difusos tipo II producidos por el motor de inferencia a un conjunto difuso tipo I que se denomina “conjunto de tipo reducido” ⁹⁵.

El cálculo de conjuntos de tipo reducido se realiza en dos etapas, primero se calculan los centroides de los conjuntos consecuentes de intervalos de tipo II de las reglas difusas. Esto se realiza antes de tiempo y no es parte del ciclo de control ⁹⁶.

Por ejemplo, el centro de conjuntos de tipo reductor reemplaza cada conjunto consecuente de tipo II de regla por su centroide que es un conjunto de tipo I y luego calcula un promedio ponderado de estos centroides para obtener un conjunto difuso de tipo I ⁹⁷.

Este es el cuello de botella de los sistemas de lógica difusa de tipo II, ya que este proceso requiere costosos cálculos, especialmente cuando se usan conjuntos de tipo II de no intervalo.

La reducción de tipo en conjuntos difusos tipo II de intervalo fue propuesto por Karnik y Mendel ⁹⁸, desarrollaron un algoritmo que calcula el centroide de un conjunto difuso de intervalo de tipo II, que se conoce como el algoritmo iterativo de Karnik-Mendel (KM), seguido de una versión mejorada llamada algoritmo mejorado de Karnik-Mendel en ⁹⁹.

Otro método fue presentado con el mismo propósito, conocido como el método de colapso con algunas variantes de las direcciones utilizadas al colapsar presentado por Green eld, Chiclana, Coupland y John ¹⁰⁰

⁹⁵ Chaoui et al.; Almaraashi.

⁹⁶ Chaoui et al.

⁹⁷ Almaraashi.

⁹⁸ Nilesh N Karnik, Jerry M Mendel, y Qilian Liang, “Type-2 Fuzzy Logic Systems”, 7.6 (1999), 643–58.

⁹⁹ Wu et al.

¹⁰⁰ Sarah Greenfield et al., “The Collapsing Method of Defuzzification for Discretised Interval Type-2 Fuzzy Sets”, 1–25.

Se han publicado otros trabajos para reducir el intervalo entre tipos de conjuntos difusos de tipo II en la literatura, como los límites de incertidumbre Wu y Mendel ¹⁰¹, el método WuTan (WT) ¹⁰², y el método Nie-Tan (NT) ¹⁰³. Tales métodos alentaron a los investigadores a usar sistemas de lógica difusa de tipo II de intervalo en aplicaciones prácticas.

Diego Pachón de la necesidad de defuzzificar y clasificar conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo (IT2FS), en particular los números difusos de tipo 2 de intervalo (IT2FN), utiliza el índice de Yager (YIR) para conjuntos difusos aplicados a IT2FN con el fin de encontrar una alternativa al centroide de un IT2FN, realizando una comparación entre el índice de Yager y el centroide para reducción de tipo de un Número Difuso Tipo-2 de Intervalo ¹⁰⁴, donde después de realizar las simulaciones, se calculan algunas estadísticas de su comportamiento como el grado de cobertura y la igualdad de dimensión del YIR respecto al centroide así como el tamaño de la Huella de Incertidumbre (FOU) de un IT2FN. Quien obtuvo como resultados que el YIR es menos amplio que el centroide, en general, el YIR es menos complejo de obtener que el centroide de un IT2FN, lo que es altamente deseable en aplicaciones prácticas como toma de decisiones y control.

La reducción de tipo general en conjuntos difusos tipo II, es más complicada y costosa desde el punto de vista computacional. Una estrategia de reducción de tipo computacionalmente costosa fue descrita por Mendel es el primer método conocido. Este método calcula la unión de todos los centroides de todos los conjuntos difusos de tipo II implicados en el conjunto difuso de tipo II general ¹⁰⁵, lo cual no es práctico en aplicaciones reales, ya que el número de conjuntos incrustados son normalmente astronómicos.

Por último, se tiene en un sistema difuso tipo 2 a el defusificador, siendo este quien asigna los conjuntos difusos de salida reducida de tipo I que han sido reducidos por el reductor de tipo en valores nítidos exactamente como el caso de defuzzificación en sistemas de lógica difusa de tipo I. Pueden usarse aquí cuales quiera métodos de defuzzificación de conjuntos difusos de tipo I. Sarah Greenfield y Francisco Chiclana realizan una evaluación de la precisión y complejidad de las estrategias de

¹⁰¹ Hongwei Wu y Jerry M Mendel, "Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems", 10.5 (2002), 622–39.

¹⁰² Dongrui Wu y Woei Wan Tan, "Computationally Efficient Type-Reduction Strategies for a Type-2 Fuzzy Logic Controller", 2005 <<https://doi.org/10.1109/FUZZY.2005.1452419>>.

¹⁰³ Maowen Nie y Woei Wan Tan, "logic systems", 2 (2008), 1425–32.

¹⁰⁴ Difuso Tipo- De Intervalo et al., "A Comparison Between the Centroid and the Yager Index Rank for Type Reduction of an Interval Type-2 Fuzzy Number on entre el Indice de Yager y el Centroide para", 2016, 225–34.

¹⁰⁵ Chaoui et al.

defuzzificación para el conjunto difuso de tipo 2 de intervalo discreto ¹⁰⁶, en su investigación abordan el desafío de la defuzzificación eficiente y precisa de los conjuntos difusos de intervalo tipo 2 discretos, donde el método exhaustivo de defuzzificación para conjuntos difusos de tipo 2 es extremadamente lento, debido a su enorme complejidad computacional. Razón por la cual se han ideado varios métodos aproximados en respuesta a este cuello de botella. En su investigación, analizan cuatro estrategias alternativas para defuzzificar un conjunto difuso de tipo 2 de intervalo: (1) el Procedimiento iterativo de Karnik-Mendel, (2) la aproximación de Wu-Mendel, (3) el defuzzificador colapsante Greenfield-Chiclana y (4) el método Nie-Tan. Evaluaron la precisión de los diferentes métodos de manera experimental, mediante un estudio comparativo utilizando seis conjuntos de pruebas representativos con características variadas, utilizando el método exhaustivo como estándar. Se logró una clasificación preliminar de los métodos utilizando una metodología de toma de decisiones con criterios múltiples basada en la asignación de pesos según el desempeño. La clasificación producida, en orden de precisión decreciente, es (1) el Defuzzificador Colapsante, (2) el Método Nie-Tan, (3) el Procedimiento Iterativo de Karnik-Mendel y (4) la Aproximación Wu-Mendel. Después de eso, se realizó un análisis más riguroso mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon, para validar las conclusiones preliminares de la prueba. Se encontró que no había evidencia de una diferencia significativa entre la precisión de los métodos de colapso y Nie-Tan, y entre la del procedimiento iterativo de Karnik-Mendel y la aproximación de Wu-Mendel. Sin embargo, hubo evidencia que sugiere que los métodos de colapso y Nie-Tan son más precisos que el procedimiento iterativo de Karnik-Mendel y la aproximación de Wu-Mendel. En relación con la eficiencia, se analizó la complejidad computacional de cada método, lo que resultó en una clasificación (de menos complejo computacional a más complejo computacionalmente) de la siguiente manera: (1) el Método Nie-Tan, (2) el Procedimiento iterativo de Karnik-Mendel (complejidad más baja posible), (3) el defuzzificador colapsante Greenfield – Chiclana, (4) el Procedimiento iterativo Karnik – Mendel (la mayor complejidad posible) y (5) la Aproximación Wu – Mendel.

Janusz Starczewski presenta procedimientos de cálculo exactos para el centroide de conjuntos difusos de tipo 2 con funciones de membresía secundaria triangular o gaussiana, siendo este uno de los métodos de defuzzificación ¹⁰⁷. Janusz asume la formulación estándar del centroide basada en el principio de extensión sup-min.

¹⁰⁶ Sarah Greenfield y Francisco Chiclana, "Accuracy and complexity evaluation of defuzzification strategies for the discretised interval type-2 fuzzy set", *International Journal of Approximate Reasoning*, 54.8 (2013), 1013–33 <<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2013.04.013>>.

¹⁰⁷ Janusz T Starczewski, "Centroid of triangular and Gaussian type-2 fuzzy sets", *INFORMATION SCIENCES*, 280 (2014), 289–306 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.05.004>>.

Donde el centroide de un conjunto difuso de tipo 2 triangular se puede considerar como una extensión analítica posterior del procedimiento de reducción de tipo KM dedicado a conjuntos de tipo 2 de intervalo. El centroide de un conjunto difuso gaussiano tipo 2 se expresa de forma recursiva mediante un procedimiento independiente.

Doostparast y Fazel en el 2014 argumentan que la mayoría de los estudios discutidos a la fecha no daban como resultado un valor único como representante de un GT2 FS. Por otro lado, el tiempo de convergencia de un algoritmo es un hecho importante ¹⁰⁸. Greenfield y Chiclana, habían aplicado el método de colapso simple a cada plano α para encontrar el centroide de los GT2 FS. Sin embargo, solo habían repetido iterativamente el método de colapso en cada plano α y no se hicieron más investigaciones. En su investigación, usan el método de colapso para encontrar el centroide del plano α más bajo o más alto. Luego, usan relaciones matemáticas entre α -plano de GT2 FS, se obtienen las formulaciones matemáticas entre los correspondientes T1 FS de α - planos consecutivos. También investigan las relaciones mutuas entre las funciones de pertenencia superior e inferior de cada plano α y sus relaciones con los planos α en la vecindad del plano que se está considerando. Luego, con base en las notaciones matemáticas obtenidas, presentan un algoritmo heurístico rápido que da como resultado directamente un valor único como representante del centroide de los GT2 FS. El algoritmo propuesto es comparado con algunos de los métodos más avanzados en la literatura desde los puntos de vista de precisión y velocidad. Quienes, para tener una visión integral de los enfoques de reducción de tipos existentes a la fecha en la literatura, presentan la tabla 7.

Tabla 7 lista de los métodos de reducción de tipo GT2 existentes.

No	Número de referencia en ¹⁰⁹	año	Método	Intervalo tipo-2 (I); general tipo-2 (G)	Clase de reducción de tipo	Tipo de método
1	[28]	2008	Liu	G	A	N
2	[25]	2001	KM	I	A	N
3	[50]	2009	EKM	I	A	E
4	[51]	2007	EKM	I	A	E
5	[29]	2001	CKM	I	A	N

¹⁰⁸ Abolfazl Doostparast Torshizi, Mohammad Hossein, y Fazel Zarandi, "Hierarchical collapsing method for direct defuzzification of general type-2 fuzzy sets", *Information Sciences*, 277 (2014), 842–61 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.03.018>>.

¹⁰⁹ Torshizi, Hossein, y Zarandi.

6	[30]	2012	CEKM	I	A	E
7	[30]	2012	CIEKM	I	A	E
8	[38]	2012	INT	I	A	E
9	[31]	2007	VSCTR	G	A	E
10	[10]	2005	Geometric IT2	I	G	N
11	[7]	2007	Geometric	G	E	N
12	[9]	2008	Geometric	G	G	N
13	[33]	2007	Recursive	I	A	E
14	[13]	2008	IASCO	I	A	E
15	[19]	2009	Collapsing (CM)	I	A	N
16	[46]	2013	Closed-form method	I (piecewise linear)	E	N
17	[45]	2012	Closed-form method	I (piecewise linear)	E	N
18	[5]	2013	LRIT2	I	A	N
19	[44]	2011	Dynamic Defuzzification	I	A	N
20	[17]	2012	Approximation Method	I	A	N
21	[21]	2009	Analytical	I	A	C
22	[41]	2008	NT	I	A	N
23	[57]	2011	CF	G	A	N
24	[27]	2012	MCF	G	A	E
25	[49]	2002	Uncertainty Bounds	I	U	N
26	[14]	2013	Uncertainty Bounds	I	U	N
27	[53]	2011	Yeh Method (Yeh)	G	A	N
28	[52]	2012	Fast	G	A	N
29	[58]	2012	ECF	G	A	E
30	[59]	2011	ECF	G	A	E
31	[22]	2005	Sampling	G	E	N
32	[23]	2012	Sampling	G	E	N
33	[16]	2011	Recursive	G	E	N

Fuente: ¹¹⁰

Donde,

¹¹⁰ Torshizi, Hossein, y Zarandi.

Clases de reducción de tipo: A es aproximado, E es exacto, U incertidumbre límite y G geométrico.

Tipo de método: N es nuevo, E es mejorado y C es comparativo.

las principales contribuciones de Doostparast y Fazel según ellos se pueden enumerar de la siguiente manera según:

- Proponen un algoritmo de reducción de tipo directo basado en el colapso jerárquico de planos α consecutivos.
- Extraen formulaciones matemáticas basadas en propiedades geométricas de los GT2 FS para evitar operaciones iterativas en cada plano α .
- Aumentan la precisión de la defuzzificación y la velocidad computacional en contraste con los métodos de reducción de tipo de vanguardia.

En un Mamdani Type-2 FIS, una entrada numérica nítida pasa por tres etapas de procesamiento: fuzzificación, inferencia y, por último, la etapa crucial de la defuzzificación. A través de la defuzzificación, el conjunto agregado de tipo 2 producido durante la etapa de inferencia se convierte en una salida nítida. Para conjuntos difusos tipo 1 discretizados, la eliminación de defuzzificación es un procedimiento simple; la defuzzificación de un conjunto difuso tipo 2 discretizado es más complicada, y consta de dos etapas ¹¹¹:

1) Reducción de tipo, que convierte un conjunto difuso de tipo 2 en un conjunto difuso de tipo 1 conocido como Conjunto reducido de tipo (TRS), y

2) Defuzzificación del tipo-1 TRS.

El TRS es un subproducto intermedio de la defuzzificación de tipo 2, un enlace entre el conjunto difuso de tipo 2 de origen y el TRS de tipo 1. En el caso del intervalo, Wu y Mendel argumentan que la longitud del TRS proporciona una medida de la incertidumbre relacionada con el conjunto. El método más ampliamente adoptado para reducir el tipo de un conjunto difuso de tipo 2 de intervalo según Greenfield y Chiclana ¹¹² es el procedimiento iterativo de Karnik-Mendel (KMIP), que da lugar a un intervalo, cuyo punto medio se considera el valor deslucido. Los puntos finales del intervalo se denominan límites de incertidumbre, lo que refleja la creencia de que la longitud del intervalo cuantifica la incertidumbre relacionada con el conjunto

¹¹¹ Sarah Greenfield y Francisco Chiclana, "Type-Reduced Set structure and the truncated type-2 fuzzy set", *Fuzzy Sets and Systems*, 352 (2018), 119–41
<<https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.02.012>>.

¹¹² Greenfield y Chiclana, "Type-Reduced Set structure and the truncated type-2 fuzzy set".

difuso de tipo 2. Según ellos el procedimiento iterativo es un método de búsqueda eficiente para localizar estos puntos finales.

Este proceso de reducción de tipo ha sido estudiado por varios investigadores para reducir el costo computacional de la evaluación de los IT2 FS. Y a pesar de que hoy en día (2019) existen muchos métodos de reducción de tipo. Al igual que Greenfield y Chiclana ¹¹³ Oscar Castillo coincide con que el más utilizado y el que ha inspirado varias variaciones es el algoritmo Karnik-Mendel, propuesto originalmente por Karnik y Mendel ¹¹⁴, La Tabla 8 describe de manera resumida el método de reducción de tipo original y más utilizado, que se denomina reducción de KM.

Tabla 8 Algoritmo de Karnik-Mendel ¹¹⁵

Paso	Punto izquierdo	Punto correcto
1	Ordenar x_i aumentando el orden	Ordenar x_i aumentando el orden
2	Inicializar w_i como: $w_i = \frac{\bar{w}_i + \underline{w}_i}{2}$	Inicializar w_i como: $w_i = \frac{\underline{w}_i + \bar{w}_i}{2}$
3	Calcular: $y = \frac{\sum_{i=1}^N x_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$	Calcular: $y = \frac{\sum_{i=1}^N x_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$
4	Encuentre el punto de conmutación k donde $x_k < y < x_{k+1}$	Encuentre el punto de conmutación k donde $x_k < y < x_{k+1}$
5	Conjunto $w_i = \begin{cases} \bar{w}_i, & i \leq k \\ \underline{w}_i, & i > k \end{cases}$	Conjunto $w_i = \begin{cases} \underline{w}_i, & i \leq k \\ \bar{w}_i, & i > k \end{cases}$
6	Calcular: $y' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$	Calcular: $y' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$
7	Si $y == y'$ luego detente $y_l = y$ y $L = k$, si no, vaya al paso 8.	Si $y == y'$ luego detente $y_r = y$ y $R = k$, si no, vaya al paso 8.
8	Conjunto $y = y'$ y ve al paso 3.	Conjunto $y = y'$ y ve al paso 3.

¹¹³ Greenfield y Chiclana, "Type-Reduced Set structure and the truncated type-2 fuzzy set".

¹¹⁴ Oscar Castillo, Patricia Melin, et al., "A high-speed interval type 2 fuzzy system approach for dynamic parameter adaptation in metaheuristics ☆", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85.July (2019), 666–80 <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.07.020>>.

¹¹⁵ Castillo, Melin, et al.

1.7 Aportes actuales en sistemas difusos tipo 2

En el 2014 Qing Hu y Yong presentan nuevas operaciones sobre el álgebra de valores de verdad difusos, supremum extendido e infimum extendido, que son generalizaciones de las operaciones extendidas de máximo y mínimo entre valores de verdad difusos para conjuntos difusos de tipo 2, respectivamente ¹¹⁶. Usando estas nuevas operaciones, se discuten las propiedades de las relaciones difusas de tipo 2, especialmente las composiciones de las relaciones difusas de tipo 2. Para el mismo año Mo, Wang, Zhou, Li y Xiao proponen una definición nueva y comprensible para los conjuntos difusos de tipo 2 (T2 FS), y las funciones de membresía primaria y secundaria se definen respectivamente mediante el uso de mapeo de valores múltiples. Presentando también una nueva definición y fórmula para la huella de incertidumbre (FOU) ¹¹⁷, y en base a las nuevas definiciones, se discute la relación entre FOU y la definición original de T2 FS. Donde finalmente, proporcionan un método de partición de FOU para representar el grado de membresía principal, la FOU y los conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo (IT2 FS) cuando se dan las funciones de membresía superior e inferior (UMF, LMF) de FOU.

En cuanto a los métodos para comparar conjuntos difusos, Josie McCulloch realiza una investigación sobre la elección de medidas de similitud para conjuntos difusos tipo 2 ¹¹⁸, donde las medidas de similitud se encuentran entre los métodos más comunes para comparar conjuntos difusos de tipo 2 y se han utilizado en numerosas aplicaciones, como ejemplo de una investigación importante realizada anteriormente sobre este método se tiene la investigación de Hao y Mendel Medidas de similitud para conjuntos difusos de tipo 2 generales basados en la representación α -plana ¹¹⁹. A pesar de todas las investigaciones, decidir cómo medir la similitud y elegir qué medida existente usar puede ser difícil. Mientras que algunas medidas dan resultados que se correlacionan mucho entre sí, otras dan resultados considerablemente diferentes. Josie Evalúa todas las medidas de similitud actuales en conjuntos difusos de tipo 2 para descubrir qué medidas tienen propiedades comunes de similitud y, para aquellas que no lo tienen, discute por qué las

¹¹⁶ Bao Qing Hu y Chun Yong Wang, "On type-2 fuzzy relations and interval-valued type-2 fuzzy sets", *Fuzzy Sets and Systems*, 236 (2014), 1–32 <<https://doi.org/10.1016/j.fss.2013.07.011>>.

¹¹⁷ Hong Mo et al., "Footprint of uncertainty for type-2 fuzzy sets", *Information Sciences*, 272 (2014), 96–110 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.092>>.

¹¹⁸ Josie Mcculloch y Christian Wagner, "On the choice of similarity measures for type-2 fuzzy sets", 510 (2020), 135–54 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.027>>.

¹¹⁹ Minshen Hao y Jerry M Mendel, "Similarity measures for general type-2 fuzzy sets based on the α -plane representation", *Information Sciences*, 277 (2014), 197–215 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.01.050>>.

propiedades son diferentes, demostrando si y qué efecto tiene esto en las aplicaciones, y a su vez discute cómo una medida puede evitar perder una propiedad que se requiere. Analizó las medidas existentes en el contexto de la computación con palabras usando una colección completa de conjuntos difusos basados en datos. Donde es su investigación destaque y demostró cómo cada método funciona al agrupar palabras de significado similar.

Un método de generación de conjuntos difusos tipo 2 de intervalo para la clasificación de imágenes de teledetección fue propuesto este año (2019) por Xing, He, Hu, Jiang y Yu en China ¹²⁰, quienes se enfocaron en la incertidumbre en la clasificación de la cobertura del suelo causada por la heterogeneidad de objetos terrestres similares y la compleja correlación espacial de los píxeles de las imágenes de teledetección. Proponiendo un método para generar conjuntos difusos de intervalo tipo 2 que incorpora información del vecindario para mejorar la precisión de la clasificación. Primero, se establece un modelo de correlación entre píxeles vecinos y se utiliza para filtrar imágenes de teledetección. Luego, los conjuntos difusos de intervalo tipo 2 se generan utilizando los píxeles de la imagen original y los píxeles filtrados. Finalmente, se propone un método de agrupación difusa de intervalo tipo 2 basado en información del vecindario. Para demostrar las ventajas y la efectividad del método propuesto, realizaron experimentos utilizando dos imágenes de teledetección con una cubierta de tierra compleja. Los resultados indican que el método propuesto considera tanto la información de color en una muestra como su relación de vecindad. El método propuesto puede suprimir efectivamente la heterogeneidad de los mismos objetos en imágenes de teledetección y puede mejorar la precisión de la clasificación, un ejemplo de esto se observa al analizar su experimento, donde la tasa de clasificación correcta de cada método se muestra en la Tabla 8. "T1FCM" significa que no construyó conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo y realiza la agrupación difusa de medios C de tipo 1. "FGFCM" significa que el modelo de correlación se usa para filtrar la imagen primero, y luego, el modelo lleva a cabo una agrupación de C-medias difusa tipo 1. "S-IT2FCM" significa que la generación de conjuntos difusos de tipo de intervalo 2 se basa en el método simple de parámetros recíprocos, el algoritmo de IT2FCM se utiliza para la agrupación y establece el parámetro para el tipo de intervalo- 2 en la generación de conjuntos difusos. "M-IT2FCM" significa que la generación de conjuntos difusos de intervalo tipo 2 se basa en el método de medios difusos de intervalo tipo 2, el algoritmo IT2FCM se utiliza para la agrupación y dos

¹²⁰ Haihua Xing et al., "Computers and Geosciences An interval Type-2 fuzzy sets generation method for remote sensing imagery classification ☆", *Computers and Geosciences*, 133.July (2019), 104287 <<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.008>>.

fuzzificadores están configurados. "Nr-IT2FCM" significa que la generación de conjuntos difusos de intervalo tipo 2 se basa en el método que incorpora la información de vecindad que se propuso en su investigación, el algoritmo IT2FCM se utiliza para la agrupación y el parámetro se establece en nr-IT2FCM. Se puede aprender de la Tabla 8 que el método nr-T2FCM tiene ventajas obvias sobre los otros tres métodos para identificar agua, árboles, pastizales y caminos. La tasa de clasificación promedio correcta del nr-T2FCM es más alta que la de otros métodos. Muestra que la generación de conjuntos difusos de intervalo tipo 2 que se basa en el método propuesto en su investigación puede representar la incertidumbre de los datos de imágenes de detección remota mejor que otros modelos, y es más capaz de clasificar los datos de imágenes de detección remota.

Tabla 9 Comparación de la tasa de clasificación correcta por los métodos T1FCM, FGFCM, s-IT2FCM, m-IT2FCM y nr-IT2FCM

Métodos		T1FCM $m = 2$	FGFCM $m = 2$	s-IT2FCM $\alpha = 1.5$	m-IT2FCM $m_1 = 2$ $m_2 = 3$	nr-IT2FCM $m = 2$
Precisión de clasificación%	agua	97,90	97,31	97,71	97,90	98,21
	árbol	72,76	74,34	71,95	71,59	81,10
	hierba	54,61	57,68	52,44	51,97	60,98
	calle	70,83	66,49	77,89	72,98	75,06
	techo	36,25	39,98	46,76	46,25	45,15
	camino	5,03	7,29	1,54	3,01	8,63
	sombra	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
	Precisión media	48,19	49,01	49,75	49,10	52,73

Fuente: ¹²¹

¹²¹ Xing et al.

Los resultados visuales se muestran en la Fig. 32 (donde (a) muestra los resultados del algoritmo T1FCM, (b) muestra los resultados del método FGFCM, (c) muestra los resultados del método m-IT2FCM, (d) muestra los resultados del método s-IT2FCM, y (e) muestra los resultados del método nr-IT2FCM propuesto).

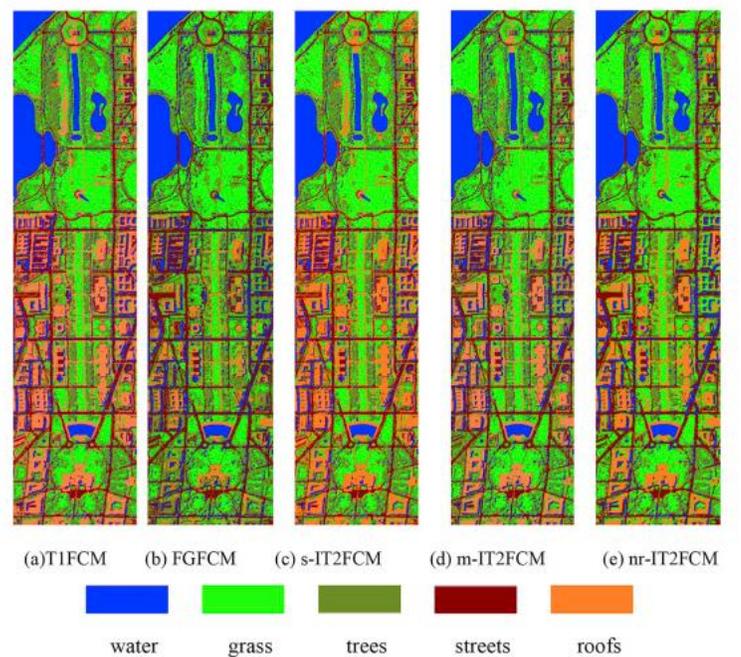


Figura 32 Resultados de los conjuntos de datos del National Mall basados en los métodos T1FCM, FGFCM, m-IT2FCM, s-IT2FCM y nr-IT2FCM. ¹²²

Un método de reducción de tipo de aproximación analítica rápida para una clase de conjuntos difusos de tipo 2 cóncavos con púas fue desarrollado por Huang, Zhao y Chen ¹²³ en el 2018, donde proponen un método de reducción de tipo analítico llamado método de reducción de tipo analítico cóncavo con picos (CATRS) de dos tipos de conjuntos difusos de tipo 2 cóncavos con púas. Los conjuntos difusos cóncavos tipo 2 que se consideran en su investigación incluyen el conjunto difuso triangular tipo 2, el conjunto difuso trapezoidal tipo 2 y sus versiones con púas. El método de reducción de tipo analítico está libre de los siguientes pasos, como la partición del discurso y el refinamiento del discurso para la implementación discreta de los algoritmos, por lo que se reduce su complejidad de cálculo. Para obtener las

¹²² Xing et al.

¹²³ Sharina Huang, Guoliang Zhao, y Minghao Chen, “A fast analytical approximation type-reduction method for a class of spiked concave type-2 fuzzy sets ☆”, *International Journal of Approximate Reasoning*, 103.61603126 (2018), 212–26 <<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2018.10.002>>.

fórmulas del conjunto difuso de tipo 2 triangular cóncavo, el método propuesto por Starczewski se extiende desde el caso convexo al cóncavo, la función de membresía secundaria con espigas se considera como una forma especial de conjunto difuso triangular. El Centroide conjunto está formado por todos los conjuntos difusos de tipo 1 que se derivan de la parte convexa de la membresía primaria con o sin picos en un punto de partición del discurso dado. Además, el método propuesto para el conjunto difuso de tipo 2 triangular cóncavo se extiende al conjunto difuso de tipo 2 trapezoidal cóncavo con un operador de aproximación de número difuso trapezoidal. Los métodos analíticos de reducción de tipo propuestos pueden abordar una clase más general de conjuntos difusos de tipo 2, es más conveniente para el modelado difuso y la inferencia de tipo 2, y la aplicación del método de reducción de tipo al universo variable del diseño del controlador de discurso muestra que el método de aproximación es aplicable para el diseño del controlador difuso adaptativo.

Un enfoque concreto y racional para la construcción de medidas de similitud difusa y de subsistencia de tipo 2 a través de un modelo fundacional generalizado es dado por Shing y Ngan en 2019 ¹²⁴, para ellos la subsistencia y la similitud entre conjuntos difusos siempre han sido conceptos intensamente estudiados en la teoría de conjuntos difusos (FST). Sin embargo, las investigaciones sobre la subsistencia y la similitud para conjuntos difusos de tipo 2 verdaderamente generales (T2FS) han sido relativamente escasas, debido a las dificultades intrínsecas de tratar directamente con las funciones secundarias de pertenencia de naturaleza muy general. A pesar de que el advenimiento de la representación α -plano / z-slice dada por Mendel y sus colegas, así como por Wagner y Hagraas ha llevado a progresar en la confrontación de este desafío, sigue habiendo bastantes limitaciones y problemas sin resolver. La contribución de Shing y Ngan es utilizar un modelo fundacional generalizado (introducido en Ngan en el 2018) para construir medidas de similitud T2FS de la manera más racional, concreta y sistemática posible, de modo que (i) estas medidas T2FS sean aplicables verdaderamente a conjuntos difusos tipo 2, que (ii) las acciones de estas medidas pueden ser simplemente entendidas, analizadas e incluso personalizadas por los usuarios de T2FS, y que (iii) estas medidas de T2FS puedan procesar y generar resultados que mantengan y reflejen adecuadamente el alto grado de borrosidad involucrado en T2FS.

Los conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo (IT2FS) pueden proporcionar más flexibilidad que los conjuntos difusos de tipo 1 (T1FS) para representar información

¹²⁴ Shing-chung Ngan, "A concrete and rational approach for building type-2 fuzzy subsethood and similarity measures via a generalized foundational model", *Expert Systems With Applications*, 130 (2019), 236–64 <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.04.002>>.

incierto, y los problemas de toma de decisiones de atributos múltiples (MADM) con información difusa de tipo 2 de intervalo han recibido una atención creciente. Razón por la cual Wang, Pan, Yan, Yao y He proponen un nuevo método de teoría de arrepentimiento basado en proyecciones para resolver problemas MADM en entornos IT2FS ¹²⁵. Para lo cual primero, se define un modelo de proyección de IT2FS que toma en cuenta la información de distancia y ángulo. En segundo lugar, integrando el modelo de proyección propuesto con la teoría del arrepentimiento, se desarrollan nuevas funciones de utilidad y arrepentimiento, respectivamente y finalmente, se proporciona un estudio de caso para demostrar la efectividad del método propuesto. Donde obtuvieron como resultado que el análisis de sensibilidad muestra la estabilidad del método propuesto, y el orden de clasificación no cambia con diferentes parámetros.

1.8 diseño de sistemas difusos tipo 2

Actualmente los diseños de sistemas difusos tipo 2 son muchos, Ojha y Abraham y Václav realizan una revisión de 3 décadas de investigación del diseño heurístico de sistemas de inferencia difusos ¹²⁶, proporcionan una revisión en profundidad del diseño óptimo de los sistemas de inferencia difusa (FIS) tipo 1 y tipo 2 utilizando cinco marcos computacionales bien conocidos: sistemas genéticos difusos (GFS), sistemas neuro-difusos (NFS), jerárquicos sistemas difusos (HFS), sistemas difusos en evolución (EFS) y sistemas difusos de múltiples objetivos (MFS), en vista de que algunos de ellos están vinculados entre sí. El diseño heurístico de GFS utiliza algoritmos evolutivos para optimizar los sistemas difusos de tipo Mamdani y Takagi-Sugeno-Kang. Mientras que, el NFS combina el FIS con los sistemas de aprendizaje de redes neuronales para mejorar la capacidad de aproximación. Un HFS combina dos o más unidades lógicas difusas de baja dimensión en un diseño jerárquico para superar la maldición de la dimensionalidad. Un EFS resuelve los problemas de transmisión de datos al evolucionar el sistema de forma incremental, y un MFS resuelve las compensaciones de objetivos múltiples, como la maximización simultánea de la interpretabilidad y la precisión. Dichos autores ofrecen una síntesis de estas dimensiones y exploran sus potenciales, desafíos y oportunidades en la

¹²⁵ Huidong Wang et al., "A projection-based regret theory method for multi-attribute decision making under interval type-2 fuzzy sets environment", *Information Sciences*, 512 (2020), 108–22 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.041>>.

¹²⁶ Varun Ojha, Ajith Abraham, y Václav Snášel, "Heuristic design of fuzzy inference systems : A review of three decades of", *Elsevier*, 85.April (2019), 845–64 <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.010>>.

investigación del FIS. dicha revisión también examina las complejas relaciones entre estas dimensiones y las posibilidades de combinar uno o más marcos computacionales agregando otra dimensión: sistemas difusos profundos.

1.9 Aplicaciones actuales en sistemas difusos tipo 2

Las aplicaciones de la lógica difusa tipo 2 son muchas, de hecho, la lógica difusa tipo 2 por sus propiedades ha permitido solucionar muchos problemas complejos y se adapta mucho más a la realidad de las situaciones, lo que expande mucho más las áreas de aplicación de la misma en comparación de la lógica difusa tipo 1, si bien la lógica difusa tipo 1 tiene una gran área de aplicación, cuanto más la lógica difusa tipo 2. Donde cada vez dichas aplicaciones resultan más interesantes. Se recopilan a continuación un estado del arte de algunas aplicaciones:

Anderson Freitas y Ginalber de Oliveira Serra realizan un modelado de caja negra de espacio de estado a través de parámetros de Márkov basados en el sistema de inferencia neural-difuso tipo 2 en evolución para sistemas dinámicos multivariables no lineales ¹²⁷, donde se propone un enfoque para la identificación neural-difusa del intervalo de estado-espacio tipo 2 de sistemas dinámicos multivariables, en un contexto de aprendizaje progresivo e incremental. En combinación con los sistemas difusos tipo 2, la metodología adoptada considera los siguientes aspectos: el aprendizaje recursivo de la huella de la incertidumbre y el aprendizaje recursivo de la regla consecuente, en parte, mediante enfoques recursivos lineales de espacio de estado donde los parámetros de Márkov se aprenden de manera incremental y sólida en muestra de manera sabia. Donde la eficiencia y la aplicabilidad de la metodología propuesta se demuestran a través de resultados experimentales y computacionales y se comparan con algoritmos de aprendizaje destacados de la literatura, donde dichos autores realizan las siguientes conclusiones respecto a su investigación:

- Metodología adaptativa totalmente basada en datos, una vez que la estructura del sistema de inferencia neural-difusa de intervalo tipo 2 se cambia de acuerdo con el nuevo comportamiento de los datos experimentales;

¹²⁷ Anderson Pablo et al., "State space black-box modelling via Markov parameters based on evolving type-2 neural-fuzzy inference system for nonlinear multivariable dynamic systems", *Fuzzy Sets and Systems*, 1 (2019), 1–39 <<https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.08.013>>.

- Robustez con el ruido y los valores atípicos, una vez que los conjuntos difusos de intervalo tipo 2 se estiman de acuerdo con el flujo de datos, calculando el grado de incertidumbre sobre el antecedente, de forma adaptativa.
- Procesamiento rápido de flujo de datos, una vez que los consecuentes se estiman en base a la aplicación de métodos consecutivos de mínimos cuadrados recursivos.

Donde, sin embargo, esta estrategia puede dar lugar a un mayor tiempo de convergencia del modelo en comparación con las metodologías basadas en el algoritmo de realización de Eygensystem.

Estos sistemas también han permitido evolucionar en problemas complejos del área de la salud, como lo demuestra el trabajo de Palacios, quien desarrollo de un sistema experto difuso tipo 2 para la evaluación del control de la nefropatía en pacientes con diabetes mellitus ¹²⁸, donde el control de la nefropatía es un problema clínico que incluye incertidumbre e inexactitud, por lo que se recomienda el uso de un FES para superar este problema, ya que los sistemas difusos ayudan a evaluar el grado de incertidumbre inherente. Obteniendo una tasa de éxito del sistema experto difuso del 93,33% y la conclusión de que el uso de este sistema permite reducir la falta de control y los tratamientos incorrectos, que el reconocimiento de las variables predictoras de falta de control evita el daño irreversible en los riñones, determinando también que su sistema es útil si se adapta al diagnóstico de otras patologías.

Siguiendo con aplicaciones en el área de la salud, en los últimos años, la llegada de los Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS) que incorporan las Guías de Práctica Clínica (GPC) ha creado la premisa para mejorar la calidad de la atención y la seguridad del paciente. Sin embargo, las GPC, generalmente codificadas en forma de reglas si-entonces, todavía no son completamente adecuadas para la implementación de la computadora, debido a los diferentes tipos de incertidumbre que las afectan. Para hacer frente a este problema, Esposito y Giuseppe proponen un enfoque novedoso para codificar automáticamente las GPC por medio de reglas if-then basadas en conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo ¹²⁹, con el objetivo final de tratar dos tipos diferentes de incertidumbre, a saber, incertidumbre intra-directriz

¹²⁸ Ramiro Meza-palacios et al., "Development of a fuzzy expert system for the nephropathy control assessment in patients with type 2 diabetes mellitus", *Expert Systems With Applications*, 72.1 (2017), 335–43 <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.10.053>>.

¹²⁹ Massimo Esposito y Giuseppe De Pietro, "Knowledge-Based Systems Interval type-2 fuzzy logic for encoding clinical practice guidelines", *Knowledge-Based Systems*, 54 (2013), 329–41 <<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.10.001>>.

e incertidumbre entre guías. El enfoque se estructura en cuatro pasos secuenciales: (i) la codificación de múltiples y diferentes GPC relacionadas con un mismo problema que las reglas if-then construidas en la parte superior de conjuntos nítidos; (ii) el mapeo de estos conjuntos nítidos primero en distribuciones de posibilidades y, luego, en conjuntos difusos tipo 1; (iii) la construcción de conjuntos difusos de intervalo final tipo 2; y (iv) la especificación de reglas difusas en la parte superior de los conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo producidos. Como prueba de concepto, el enfoque se emplea para tratar algunas GPC relacionadas con el tratamiento de la hipertensión, mostrando su viabilidad y también sugiriendo que su aplicación puede ayudar de manera simple y eficiente a la inserción de GPC en los DSS clínicos.

Otra área muy común de los sistemas difusos tipo 2 es el área de los clasificadores inteligentes, dando un aporte en esta área Shahparast y Mansoori, quien argumenta que se ha demostrado que los sistemas difusos generales de tipo 2 manejan más niveles de incertidumbre presentes en la mayoría de las aplicaciones del mundo real. Sin embargo, el rápido crecimiento de la generación de información no permite utilizar modelos generales de tipo 2 para su complejo proceso de aprendizaje. Por lo que realiza una investigación basada en el desarrollo de un clasificador difuso de tipo 2 general en línea utilizando reglas de tipo 1 en evolución ¹³⁰, en la cual presenta un novedoso clasificador difuso general en línea tipo 2 (llamado oGT2FC). Su objetivo es reducir los cálculos necesarios para obtener los conjuntos difusos de tipo 2. Como en la mayoría de los esquemas difusos en línea y en evolución, la base de reglas inicial en oGT2FC está vacía, y luego las reglas difusas se generan de manera completamente en línea; sin almacenar las muestras. Para especificar los conjuntos difusos de tipo 2, oGT2FC emplea las opiniones de algunos expertos, extraídas de los datos de entrenamiento, para generar automáticamente algunas bases de reglas difusas de tipo 1 diversas. Estas bases de reglas de tipo 1 se actualizan / evolucionan mediante nuevas muestras entrantes y se utilizan para construir el modelo general de tipo 2. Al definir un conjunto difuso de tipo 2 como la unión de cortes verticales, oGT2FC realiza la reducción de tipo de una manera rápida y eficiente. La eficiencia del oGT2FC propuesto se evalúa experimentalmente, utilizando flujos de datos sintéticos y del mundo real, mediante la comparación con otros clasificadores difusos evolutivos de tipo 2 y tipo 1, así como algunos algoritmos incrementales de última generación. Además, oGT2FC se compara con algunos clasificadores difusos en su capacidad para modelar la incertidumbre. utilizando flujos de datos sintéticos y del mundo real, mediante la

¹³⁰ Homeira Shahparast y Eghbal G Mansoori, “Developing an online general type-2 fuzzy classifier using evolving type-1 rules”, *International Journal of Approximate Reasoning*, 113 (2019), 336–53 <<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.07.011>>.

comparación con otros clasificadores difusos evolutivos de tipo 2 y tipo 1, así como algunos algoritmos incrementales de última generación. Además, oGT2FC se compara con algunos clasificadores difusos en su capacidad para modelar la incertidumbre. utilizando flujos de datos sintéticos y del mundo real, mediante la comparación con otros clasificadores difusos evolutivos de tipo 2 y tipo 1, así como algunos algoritmos incrementales de última generación. Además, oGT2FC se compara con algunos clasificadores difusos en su capacidad para modelar la incertidumbre.

En clasificadores también se tiene la investigación de Xu, Feng, Zhao, Sun y Zhu, quienes trabajan en la clasificación de imágenes de teledetección basada en el algoritmo de c-medias difuso de intervalo adaptativo semi-supervisado tipo 2 ¹³¹, quienes argumentan que debido a la incertidumbre en las imágenes de teledetección y al mal planteamiento del problema, es difícil para los algoritmos de clasificación tradicionales sin supervisión crear un modelo de clasificación preciso. Por el contrario, los métodos de reconocimiento de patrones basados en la teoría de conjuntos difusos, como el agrupamiento de c-medios difusos, pueden administrar la difusa de los datos de manera efectiva. De estos métodos, el algoritmo de c-medias difuso tipo 2 es más capaz de controlar la incertidumbre. Además, la capacitación semi-supervisada puede usar el conocimiento previo para lidiar con malas posturas y, por lo tanto, es más adecuada. Por lo tanto, proponen un nuevo método de clasificación basado en el algoritmo de c-medias difuso de intervalo adaptativo semi-supervisado tipo-2 (SS-AIT2FCM). Primero, al integrar el enfoque semi-supervisado, se propone que mejore la robustez y la buena postura del modelo utilizado en el algoritmo de agrupamiento. Esto hace que el algoritmo sea adecuado para imágenes de teledetección con alias espectral severo, grandes áreas de cobertura y características abundantes. Además, la supervisión de restricciones suaves se realiza utilizando una pequeña cantidad de muestras etiquetadas, lo que optimiza el proceso iterativo del algoritmo y determina el conjunto óptimo de características para los datos. Esto reduce aún más la mala postura del modelo en sí. Los datos experimentales consisten en tres áreas de estudio: imágenes SPOT5 de Big Hengqin Island, Guangdong, China y el Palacio de Verano, Beijing, China, así como imágenes de TM de Hengqin Island. En comparación con varios algoritmos de clasificación difusa de última generación, el algoritmo mejora la precisión de clasificación en más de un 5% en general y obtiene

¹³¹ Jindong Xu et al., "Computers and Geosciences Remote sensing image classification based on semi-supervised adaptive interval type-2 fuzzy c-means algorithm", *Computers and Geosciences*, 131.December 2018 (2019), 132–43 <<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.005>>.

límites más claros en imágenes de teledetección con píxeles mixtos serios. Además, es capaz de suprimir el fenómeno de los espectros isomórficos.

Un área donde se presenta mucha incertidumbre es en los videojuegos, donde enfocaron su investigación García, Hernández y Franco ¹³², quienes presentan algunas consideraciones computacionales y teóricas acerca de cómo incluir incertidumbre difusa en los parámetros de un problema clásico de juegos. De hecho, cuando varios expertos están involucrados en una situación de juego, sus opiniones conducen a tener incertidumbre, ya que la mayoría de las veces no están de acuerdo entre sí. Este tipo de incertidumbre se puede modelar utilizando conjuntos difusos de tipo 2, lo que implica métodos y submodelos especializados. En su investigación se presentan algunas consideraciones sobre el uso de conjuntos difusos de tipo 2 y qué implica esto al calcular soluciones. Un modelo general que incluye este tipo de incertidumbre se define sobre la base del principio de extensión y el teorema de la representación de los cortes α . Se vislumbra una posible forma de resolver este modelo y se expone para su discusión e implementación.

Roy y Mukherjee trabajaron en la predicción del rendimiento máximo de aceite de semillas de almendras en una industria química basados en un nuevo enfoque de lógica difusa tipo 2 ¹³³, dichos autores desarrollan un modelo único que utiliza el enfoque del controlador de lógica difusa tipo 2 (T2FLC) para predecir las condiciones óptimas del proceso para la extracción de aceite al máximo de las semillas de almendras. Aquí, se tomaron la presión, la temperatura, el tiempo de calentamiento y el contenido de humedad como parámetros de entrada y el rendimiento de aceite se toma como parámetro de salida para optimizar el proceso. Aunque la recuperación del cien por ciento del aceite por extracción de semillas de almendras nunca es posible, pero controlando los parámetros del proceso en condiciones adecuadas, el rendimiento del aceite puede variar dentro del rango de 40% a 45%. Usando estos cuatro parámetros de entrada y uno de salida, se forman cuatro sistemas de inferencia difusa Mamdani dependiendo de las diferentes funciones de pertenencia de las variables. En T2FLC ayuda a rastrear entradas y salidas de una manera bien organizada para construir el tren de inferencias de modo que se puedan predecir varios tipos de rendimiento de petróleo y su evaluación durante la extracción. Finalmente, se realizó un análisis estadístico utilizando el conjunto de datos difusos de tipo 2 para mejorar el control de los parámetros del

¹³² Juan Figueroa-garcía, "Towards Solving Matrix Games with Interval Type-2 Fuzzy Optimization Abstract", 2016 <<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reviving.2013.2.a06>>.

¹³³ Kunal Roy, Anupam Mukherjee, y Dipak Kumar, "South African Journal of Chemical Engineering Prediction of maximum oil-yield from almond seed in a chemical industry : A novel type-2 fuzzy logic approach", *South African Journal of Chemical Engineering*, 29.July 2018 (2019), 1–9 <<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.03.001>>.

proceso que se pueden determinar fácilmente en el modelo de predicción difusa de tipo 2 para obtener un alto rendimiento.

Un nuevo método integrado de intervalo difuso tipo 2 MCDM para mejorar la satisfacción del cliente en el transporte público de Estambul fue desarrollado por Celik, Billsik, Erdogan, Gumus y Baracli ¹³⁴, en su investigación se determinan los criterios para mejorar la satisfacción del cliente en el transporte público, el cuestionario utilizado en este estudio se aplica en paradas de autobús y estaciones de Metrobús, se propone un novedoso intervalo integrado de tipo 2 TOPSIS difuso y método GRA y se presenta una aplicación numérica en las empresas de transporte público de Estambul. Con lo que los autores concluyen que el método se puede aplicar a problemas complejos de toma de decisiones que se encuentran con vaguedad.

1.10 Análisis del desarrollo de los controladores difusos tipo 2.

Según Marco A. Márquez la lógica difusa tipo 2 sirvió para justificar la forma de los conjuntos difusos y se han conseguido mejores resultados que con la ahora llamada lógica difusa tipo 1, pero se requiere de programar un controlador más grande, con más parámetros y se emplea un mayor gasto computacional ¹³⁵. En un controlador difuso convencional (también llamado controlador difuso tipo 1 (T1FLC)) no es posible hacer frente a las incertidumbre asociada a los parámetros del controlador, debido a esto, 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 ¹³⁶. En otras palabras, los límites de las funciones de membresía en sistemas difusos tipo 2, son en sí conjuntos difusos tipo 1. La aplicación de los

¹³⁴ Erkan Celik et al., "An integrated novel interval type-2 fuzzy MCDM method to improve customer satisfaction in public transportation for Istanbul", *Transportation Research Part E*, 58 (2013), 28–51 <<https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.06.006>>.

¹³⁵ Marco Antonio y Nadia Samantha, "Intervalo difuso tipo 2 con aprendizaje aplicado en control", *Revista de Simulación Computacional*, 1.February (2017), 9–17.

¹³⁶ Alfonso Vela Rivera et al., "TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA TIPO 2" (Mexico, 2013), p. 2013 <https://investigacion.uaa.mx/seminario/memoria_abstracts/14seminario/ponencias/m_ing/ALFONSO_VELA_RIVERA.pdf>.

sistemas difusos tipo 2 en el control de sistemas, se le conoce como controladores difusos tipo 2 (T2FLC).

1.11 Definición y verificación de los procedimientos de desarrollo de controladores difusos tipo 2.

La implementación genérica del controlador difuso en términos de conjuntos difusos tipo 2 al igual que el tipo 1 tiene dos variables de entrada: el error $e(t)$, la diferencia entre la señal de referencia y la salida del proceso; y la variación de error $\Delta e(t)$ ¹³⁷,

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad \text{Ecu. (28)}$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - 1) \quad \text{Ecu. (29)}$$

Observando en la figura 33 el diagrama de bloques que dicho esquema de control genérico.

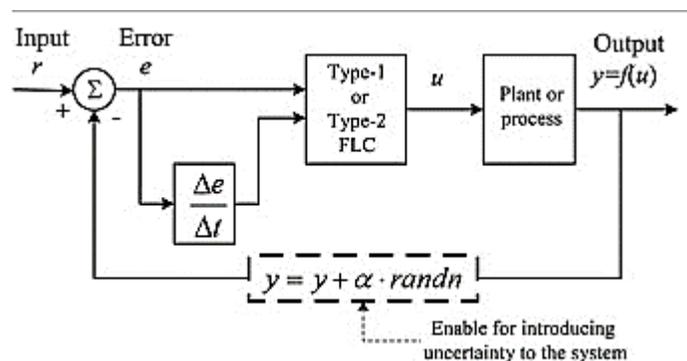


Figura 33 diagrama de bloques de sistema de control difuso tipo 1 y tipo 2 genérico ¹³⁸

Para Oscar Castillo ¹³⁹ para evaluar la respuesta transitoria de circuito cerrado de un sistema de control por computadora, se pueden usar los mismos criterios que

¹³⁷ Oscar Castillo y Patricia Melin, "A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control", *Elsevier*, 279 (2014), 615–31 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.015>>.

¹³⁸ Castillo y Melin.

¹³⁹ Castillo y Melin.

normalmente se usan para ajustar las constantes en los controladores PID (derivada integral proporcional), y estos son ¹⁴⁰:

- 1) Integral de error cuadrado (ISE).

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt \quad \text{Ecu. (30)}$$

- 2) Integral del valor absoluto del error (IAE).

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad \text{Ecu. (31)}$$

- 3) Integral del tiempo multiplicado por el valor absoluto del error (ITAE).

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad \text{Ecu. (32)}$$

En la mayoría de los casos se usa \sum , en lugar de \int . Cada medida se basa en la acumulación de errores, y la selección depende del tipo de respuesta deseada, los errores contribuirán de manera diferente para cada criterio, por lo que se tiene que los errores grandes aumentan el valor de ISE más que para IAE. ISE favorece las respuestas con un sobreimpulso menor para los cambios de carga, pero ISE da un tiempo de establecimiento más prolongado. En ITAE, el tiempo aparece como un factor y, por lo tanto, ITAE penaliza en gran medida los errores que ocurren tarde en el tiempo, pero prácticamente ignora los errores que ocurren temprano en el tiempo. Diseñar usando ITAE da el menor tiempo de asentamiento, pero produce el mayor sobrepaso entre los tres criterios considerados. El diseño que tiene en cuenta IAE da un resultado intermedio, en este caso, el tiempo de establecimiento no es tan grande como con ISE y no es tan pequeño como con ITAE, y lo mismo se aplica para la respuesta de sobreimpulso. La selección de un criterio particular depende del tipo de respuesta deseada.

Otro diseño es el de tipo PI, como el planteado por Fayek ¹⁴¹, quien seleccionó una estructura de tipo PI para eliminar cualquier error de estado estacionario que pueda resultar en el caso de una estructura de tipo derivado proporcional (PD), debido a la

¹⁴⁰ Castillo y Melin.

¹⁴¹ H M Fayek et al., "A controller based on Optimal Type-2 Fuzzy Logic: Systematic design, optimization and real-time implementation", *ISA Transactions*, 53.5 (2014), 1583–91 <<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.06.001>>.

falta de función integral en la naturaleza de control de PD. Todas las entradas y salidas están asociadas con siete funciones de pertenencia de forma triangular sobre un universo de unidad de discurso de intervalo $[-1, 1]$. Se utilizó el método Mamdani, también conocido como método Max-Min. La base de reglas se basa en la base de reglas MacVicar-Whelan como se enumera en la Tabla 10, donde, BN es Negativo grande, MN es Negativo medio, N es Negativo, Z es Cero, P es Positivo, MP es Positivo medio y BP es Positivo grande. Donde la simetría de la base de reglas garantiza la estabilidad y robustez del controlador después del proceso de optimización.

Tabla 10 Base de reglas Mac Vicar-Whelan

E/DE	BN	MN	N	Z	P	MP	BP
BN	BN	BN	BN	MN	N	N	Z
MN	BN	MN	MN	MN	N	Z	P
N	BN	MN	N	N	Z	P	MP
Z	BN	MN	N	Z	P	MP	BP
P	MN	N	Z	P	P	MP	BP
MP	N	Z	P	MP	MP	MP	BP
BP	Z	P	P	MP	BP	BP	BP

Fuente: ¹⁴²

El procedimiento de diseño propuesto incorpora dos etapas. La primera etapa es la optimización de las ganancias asociadas con las entradas (k_1 y k_2) y de salida (k_3) del controlador (figura 34). Durante esta etapa, las funciones de membresía se fijan y distribuyen equitativamente sobre el universo de unidad del discurso con una superposición del 50% entre las funciones de membresía adyacentes como se muestra en la Figura 35, que es la opción más natural e imparcial. Y la segunda etapa es la optimización de las funciones de membresía, para lo cual Fayek propone en lugar de considerar una función de membresía de tipo 2 como la mostrada en la figura 36a, donde la misma se puede definir utilizando seis puntos, denotados como

¹⁴² Fayek et al.

a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 y c_2 , considerar la función de membresía de tipo 2 utilizando solo cuatro parámetros denotados como a , b , c y σ como se muestra en la Figura 36b, donde σ representa la FOU. Ya que considerar los seis puntos en el problema de optimización de cada función de membresía es muy costoso desde el punto de vista computacional y puede no dar lugar a una solución óptima teniendo en cuenta el número de funciones de membresía asociadas a cada entrada o salida y el número de entradas y salidas del controlador, que resulta en un número total excesivamente grande de puntos.

definiendo la relación entre a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 y a , b , c , σ como:

$$P1 = P - \sigma \mid P2 = P + \sigma \mid \forall \{(P, P1, P2)\} \quad Ecu. (33)$$

$$= \{(a, a1, a2), (b, b1, b2), (c, c1, c2)\}$$

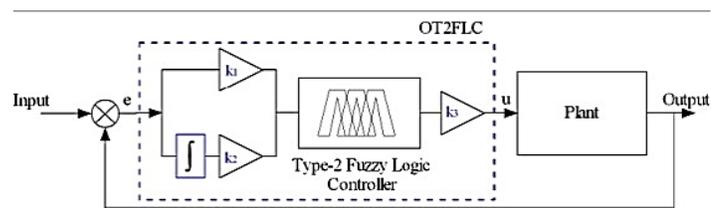


Figura 34 Controlador lógico difuso óptimo tipo 2 propuesto (OT2FLC) ¹⁴³

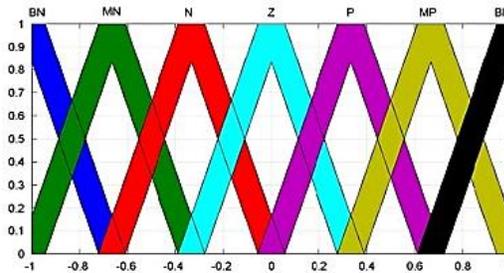


Figura 35 Siete funciones de membresía triangular tipo 2 ¹⁴⁴

¹⁴³ Fayek et al.

¹⁴⁴ Fayek et al.

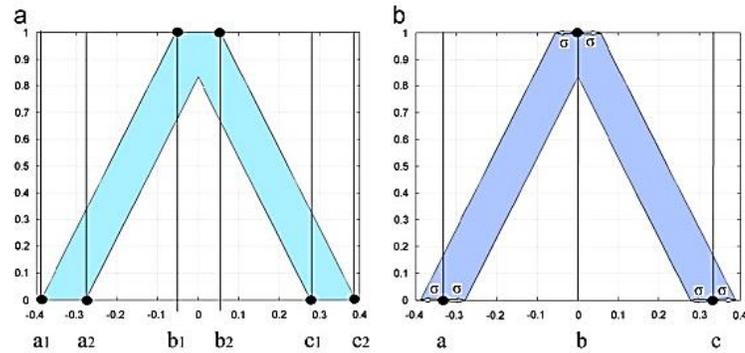


Figura 36 Representación de Membresía tipo 2 ¹⁴⁵

El controlador PI es uno de los controladores de retroalimentación que se aplica en la amplia variedad de sistemas dinámicos de control. Este controlador está formado por dos parámetros constantes separados que se denominan valores integrales y proporcionales. Estos parámetros se calculan según el punto de operación nominal del sistema. Existen diferentes métodos, tales como métodos computacionales y técnicas de optimización (como se aprecia en el método anterior propuesto por Fayek) para calcular los parámetros del controlador PI ¹⁴⁶. Este controlador tiene las ventajas de un rendimiento robusto, estructura simple y facilidad de implementación, pero el controlador PI tiene un problema principal, el cual es que sus parámetros no son constantes en el punto de operación total del sistema. En el caso práctico, en los sistemas no lineales con alto rendimiento dinámico (como el convertidor CC / CC) para un rendimiento deseable del controlador PI convencional en diferentes puntos de operación del convertidor, los parámetros del controlador PI deben recalcularse. Pero, es prácticamente imposible porque el cálculo de los parámetros del controlador PI para un nuevo punto de operación lleva mucho tiempo. Este tema lleva a la incompetencia del controlador PI en diferentes puntos de operación.

En los últimos años, el controlador inteligente (como el controlador difuso, el controlador neuronal) se utiliza para superar el problema propuesto del controlador PI. Estos controladores son muy prácticos y flexibles, pero no pueden manejar la incertidumbre asociada con la estructura del convertidor, los dispositivos de medición y las señales de control medidas. Por lo tanto, Amir, utiliza un controlador PI neuronal difuso tipo 2 (T2FN PI) para superar todos los problemas propuestos ¹⁴⁷. El controlador T2FN PI combina las ventajas del controlador PI convencional y el controlador inteligente para diseñar un controlador flexible y robusto. Además,

¹⁴⁵ Fayek et al.

¹⁴⁶ Amir Shari, Samaneh Fathi Sasansara, y Alireza Agah Balgori, "Neurocomputing A new control method based on type-2 fuzzy neural PI controller to improve dynamic performance of a half-bridge DC – DC converter", 214 (2016), 718–28 <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.07.001>>.

¹⁴⁷ Shari, Sasansara, y Balgori.

este controlador puede manejar la incertidumbre asociada a la estructura del convertidor, los dispositivos de medición y las señales de control medidas. La estructura del controlador T2FN PI propuesta por Amir, se ilustra en la figura 37.

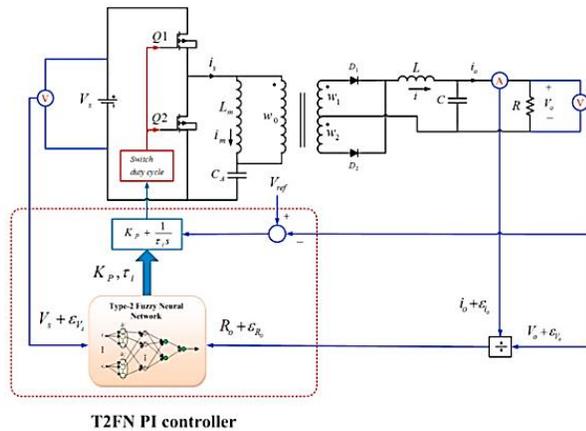


Figura 37 Propuesta de controlador tipo 2 neural difuso PI (T2FN PI). ¹⁴⁸

En este punto de la investigación ya muchas veces se ha mencionado que el control difuso tipo 2 ofrece más ventajas que el difuso tipo 1, pero no se ha corroborado con una comparación exhaustiva, como la que realiza Oscar Castillo, el cual realiza un estudio comparativo de sistemas de lógica difusa tipo 1, sistemas de lógica difusa tipo intervalo 2 y sistemas de lógica difusa tipo 2 generalizados en problemas de control ¹⁴⁹, donde en su investigación realiza pruebas de estos controladores sobre un mismo proceso, comparando el resultado en el proceso de control de nivel de un tanque, en un proceso de control de temperatura, control de un robot móvil y control de haz y bola, los cuales el los considera como procesos complejos que presentan no linealidades. Por ejemplo, en el caso del control del tanque obtuvo los siguientes resultados:

Implementado un control difuso genérico, como el que se muestra en la figura 38, Los resultados de las simulaciones se presentan en la Tabla 11

¹⁴⁸ Shari, Sasansara, y Balgori.

¹⁴⁹ Oscar Castillo, Leticia Amador-angulo, et al., "A comparative study of type-1 fuzzy logic systems , interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems", 354 (2016), 257–74 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.026>>.

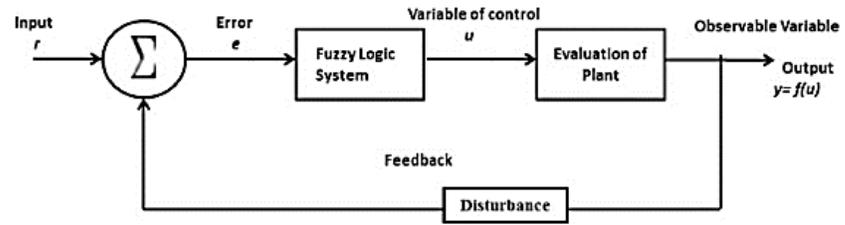


Figura 38 Representación de control difuso genérico ¹⁵⁰

¹⁵⁰ Castillo, Amador-angulo, et al.

Tabla 11 Resultados de la simulación para el tanque de agua al agregar perturbaciones de ruido Pulse Generator

Tipo de la función de membresía	Índice de rendimiento	VÁLVULA		
		T1FLC	IT2FLC	GT2FLC
Triangular	ITAE	2456.6318	2292.57479	2318.8949
	ITSE	6171.7424	5350.38023	5466.9907
	IAE	118,1053	112.610978	113,4572
	ISE	324,4240	295.958673	300,1413
	RMSE	0.15767742	0.02566181	0.01201354
Gaussiano	ITAE	2336.2659	2292.57479	2254.0702
	ITSE	5673.2466	5350.38023	5394.5037
	IAE	113,6483	112.610978	112.3051
	ISE	303.1137	295.958673	299.279427
	RMSE	0.07904827	0.02566181	0.00827921
Trapezoidal	ITAE	2519.1318	2292.57479	2336.0610
	ITSE	6551.2959	5350.38023	5505.7092
	IAE	120.2294	112.610978	114,0442
	ISE	336,9320	295.958673	302.0869
	RMSE	0.23091238	0.02566181	0.01467692
Campana generalizada	ITAE	2582.30864	2292.57479	2601.96672
	ITSE	6538.35411	5350.38023	6617.44945
	IAE	121,471442	112.610978	122.152073
	ISE	336.401794	295.958673	339.206444
	RMSE	0.19558786	0.02566181	0.16977793

Fuente: ¹⁵¹

¹⁵¹ Castillo, Amador-angulo, et al.

En la Tabla 11 se puede observar que cuando aumenta el valor de la perturbación, el error disminuye en una cantidad mínima. El GT2FLC encuentra un error de simulación más pequeño que el T1FLC y el IT2TLC, es decir, se realiza una comparación con los resultados basados en IAE; en esta métrica, cuando el tipo de funciones de membresía en las entradas es gaussiano, el error para el T1FLC es 118.1053, para IT2FLC es aproximadamente 112.261 y para GT2FLC el mejor resultado es aproximadamente 112.305, y estos experimentos se muestran con una perturbación de 1.5. Es muy importante decir que los errores en el IT2FLC y GT2GLC son similares en la minimización de los errores y en la mayoría de los experimentos el IT2FLC es mejor que el GT2FLC. Esto se debe a que el problema analizado no presenta una necesidad suficiente de robustez y el GT2FLC no mejora el rendimiento. Para la métrica del error cuadrático medio, para las tres primeras funciones de membresía, está claro que el GT2FLC obtiene mejores resultados.

El número de planos alfa también estaba bajo variación para analizar su efecto en los resultados. El número de planos alfa indica la cantidad de función de membresía secundaria que se evalúa. Se cambió el número de planos alfa de 5 a 15 para analizar y encontrar el número óptimo de planos necesarios en la evaluación en el modelo con GT2FLC. Rho es un parámetro utilizado para definir el volumen (soporte) en las funciones de membresía, e hicimos variaciones de este valor de 0.2 y 0.5. En la Tabla 12 se puede encontrar los resultados de los experimentos con variación en el número de planos alfa, el valor de rho en 0.5 y un nivel de ruido de 0.5.

Tabla 12 GT2FLC con variaciones en Alpha Planes of the Water Tank

Tipo de la función de membresía	Índice de rendimiento	VÁLVULA		
		GT2FLC		
		5 5	10	15
Triangular	ITAE	2292.7283	2222.6025	2211.97854
	ITSE	5387.3627	5310.38699	5295.64
	IAE	112.748225	111.281491	111.024056
	ISE	297.586403	295.821877	295.300678
	RMSE	0.02746781	0.02805744	0.02826925
Gaussiano	ITAE	2258.83853	2278.9592	2267.76852
	ITSE	5346.38538	5371.20269	5352.69995
	IAE	112.134083	112.672649	112.305879
	ISE	296.920303	298.242749	296.997438
	RMSE	0.01987987	0.02014303	0.02014703
Trapezoidal	ITAE	2273.71797	2307.26145	2289.46125
	ITSE	5364.78746	5388.41733	5368.71603
	IAE	112.501449	113.104372	112.727711
	ISE	297.63211	297.693609	297.188128
	RMSE	0.01666568	0.01787246	0.01819174
Campana generalizada	ITAE	2464.70028	2457.31403	2525.91311
	ITSE	6307.41519	6286.67183	6419.05127
	IAE	118.869528	118.666982	120.486606
	ISE	330.3839	329.716817	334.983859
	RMSE	0.15634243	0.14390615	0.14206562

Fuente: ¹⁵²

¹⁵² Castillo, Amador-angulo, et al.

En la Tabla 12 se puede observar que cuando aumenta el número de planos alfa a 5, 10 y 15, todos los GT2FLC encuentran los mismos errores. Por ejemplo, cuando se utilizan funciones de pertenencia trapezoidal en las entradas y con el mismo modelo, el error cuadrático medio (MSE) generado para el GT2FLC con 5 planos alfa es de 0.016665, con 10 es de 0.017872 y con 15 es de 0.018191. La experimentación también se realizó con varios escenarios de perturbaciones externas, y se utilizaron diferentes generadores de ruido: como el ruido generado por pulsos, donde la altura de la densidad espectral de potencia del pulso generado ruido para la amplitud, período, retraso de fase establecido en 1,10, 0, respectivamente y el ancho de pulso (%) se estableció en 0,1, 0,3, 0,5 y 1,5. También se aplicaron diferentes niveles de ruido como una perturbación en la planta para evaluar el controlador de lógica difusa de tipo 2 generalizado y para visualizar los resultados del modelo. La Tabla 13 muestra todos los experimentos; que se hicieron con 5 planos alfa y la métrica fue el Error Absoluto Integral (IAE).

Tabla 13 GT2FLC con variaciones en la perturbación del controlador del tanque de agua

Simulaciones del problema de referencia conocido como el tanque de agua

Experimental	Tipo de función de membresía en Entradas	GT2FLC			
		Niveles de ruido			
		0.1	0.3	0.5	1.5
1	Gaussiano	111.397396	112.820884	112.305879	112.623036
2	Triangular	112.089488	111.84549	111.024056	112.623036
3	Trapezoidal	112.797974	112.054702	112.727711	112.623036
4	Campana generalizada	120.700749	119.548436	120.486606	112.623036

Fuente: ¹⁵³

¹⁵³ Castillo, Amador-angulo, et al.

En la Tabla 13 se puede observar que aumentar los niveles de ruido hace que los errores de simulación sean más bajos, y esto se debe a que el controlador de lógica difusa tipo 2 generalizado maneja mejor la incertidumbre del proceso de control. El error cuando se usa T1FLC para los niveles de ruido 0.1, 0.3, 0.5 y 1.5, en las funciones de membresía triangular, es de 117.063, 116.988, 118.295 y 118.105 respectivamente. Entonces el GT2FLC es mejor con el nivel de ruido. La figura 39 muestra la comparación en las simulaciones con un nivel de ruido de 0,5.

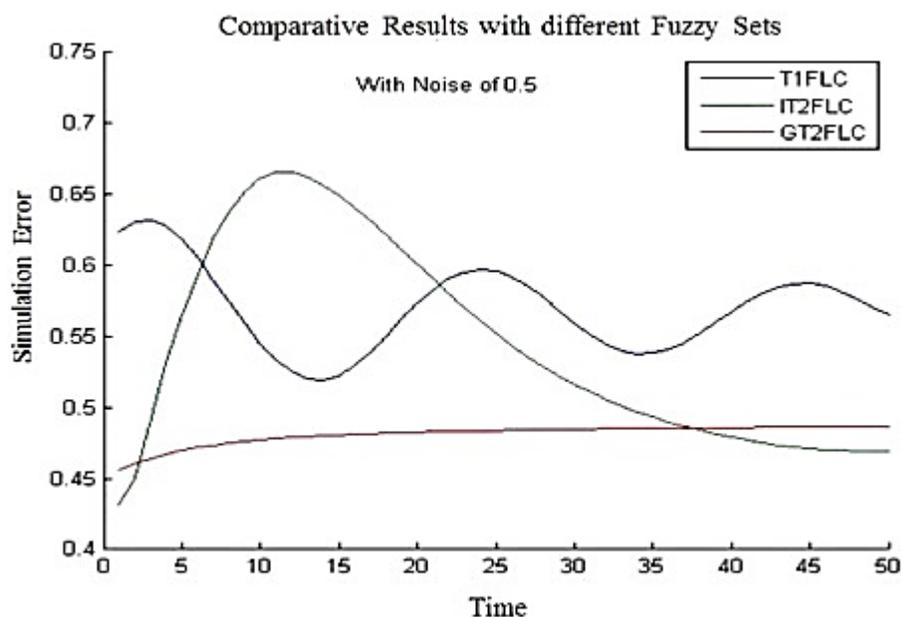


Figura 39 Resultados comparativos de T1FLC, IT2FLC y GT2FLC con un nivel de ruido de 0.5 ¹⁵⁴

En la Figura 39 se puede observar que cuando se usa el modelo de GT2FLC, el controlador difuso presenta más estabilidad. La línea azul representa el comportamiento con el Sistema de lógica difusa Tipo -1, la línea verde indica el Sistema de lógica difusa Tipo 2 de intervalo y la línea roja representa el comportamiento del Sistema de lógica difusa Tipo 2 generalizado

Otra consideración en el control difuso tipo 2, es la simplificación del mismo, Los zSlices y las representaciones en el plano α son dos métodos de simplificación que hacen que los procedimientos IT2FLS sean aplicables a los diseños GT2FLS, lo que

¹⁵⁴ Castillo, Amador-angulo, et al.

genera menos cálculos y representaciones matemáticas más simples. En la representación de zSlice, la tercera dimensión del conjunto difuso de tipo 2 general se divide en una serie de conjuntos llamados zSlices. Esta operación produce un conjunto de conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo cuyo grado de membresía en la tercera dimensión es z_i ($0 < z_i < 1$), en lugar de uno. En consecuencia, los procedimientos en IT2FLS pueden simplemente generalizarse al GT2FLS y la carga computacional de GT2FLS se reduce considerablemente. En contraste, la representación del plano α generaliza el concepto de cortes α en T1 FS que se generaliza a T2 FS. Según esta representación, un GT2 FS se descompone en varios planos α , en los que cada plano es un IT2 FS. De esta manera, los procedimientos en IT2FLS pueden volver a generalizarse a GT2FLS ¹⁵⁵. Hay relativamente pocos trabajos en ingeniería de control que hayan aplicado GT2FLS en su estructura de control. En todos los casos, las representaciones de zSlice o plano α se utilizan para disminuir las complejidades computacionales.

Rong y Wang investigan el problema de estabilización de los sistemas de control basados en el modelo difuso de intervalo tipo 2 (IT2) Takagi–Sugeno (T – S) con retraso de tiempo ¹⁵⁶. Extienden el modelo difuso T–S de conmutación tipo 1 para tratar con el modelo difuso IT2 T – S, y el nuevo modelo construido se define como el modelo difuso T – S de conmutación regional IT2. Además, proponen un nuevo controlador de retroalimentación de estados, teniendo en cuenta, el controlador difuso de conmutación regional IT2 que conmuta de acuerdo con los estados del sistema. Luego, según las funciones de membresía por partes, el enfoque dependiente de la función de membresía adopta específicamente los sistemas de retardo de tiempo y, por lo tanto, se derivan varios criterios de estabilidad utilizando la función de estabilidad Lyapunov-Krasovskii. Dado que el enfoque dependiente de la función de membresía considera más información de las funciones de membresía inferior y superior, se reduce el conservadurismo de las condiciones de estabilidad.

Chun Ming, Wan y Nie investigan sobre la diferencia en el rendimiento de control del sistema de control de PI difuso de tipo 2 con diferentes formas de FOU ¹⁵⁷, para ellos los controladores de lógica difusa tipo 2 de intervalo (IT2-FLC) han estado

¹⁵⁵ F Baghbani, M Akbarzadeh-t, y Alireza Akbarzadeh, “Indirect adaptive robust mixed H_2 / H_∞ general type-2 fuzzy control of uncertain nonlinear systems”, *Applied Soft Computing Journal*, 72 (2018), 392–418 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.049>>.

¹⁵⁶ Nannan Rong et al., “Interval type-2 regional switching T – S fuzzy control for time-delay systems via membership function dependent approach ☆”, *Fuzzy Sets and Systems*, 374.61473070 (2019), 152–69 <<https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.10.014>>.

¹⁵⁷ Chun Ming et al., “On the difference in control performance of interval type-2 fuzzy PI control system with different FOU shapes”, *Applied Soft Computing Journal*, 76 (2019), 517–32 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.12.039>>.

atrayendo mucha atención. Sin embargo, aún persisten los desafíos en el diseño de IT2-FLC. Uno de los principales desafíos es elegir la forma de FOU adecuada para los conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo (IT2-FS). Analizan las diferencias en el rendimiento de control entre tres controladores PI difusos IT2 (IT2-F-PIC) con diferentes formas de FOU como el conjunto difuso IT2 triangular superior ancho, el conjunto difuso IT2 triangular inferior ancho y el trapecoidal (también llamado paralelo). Primero, se derivan las estructuras analíticas de estos IT2-FLC y se obtienen las ecuaciones matemáticas de entrada-salida y luego se presentan tres diferencias interesantes entre las estructuras analíticas y la relación de entrada-salida. La contribución de su investigación es proporcionar información sobre las diferencias de rendimiento entre los diferentes controladores con forma de FOU, lo que a su vez permite a los diseñadores de control seleccionar la forma de FOU adecuada para cumplir con los requisitos de diseño. Los reflejos de su investigación son los siguientes:

- Análisis de la diferencia en el rendimiento del control entre tres controladores PI difusos tipo 2 de intervalo (IT2-F-PIC) con diferentes tipos de conjuntos difusos antecedentes IT2 (formas FOU).
- Se investigan los controladores con IT2 trapecoidal (paralelo, IT2-F-PI-P), triangular superior ancho (IT2-F-PI-TW) y triangular inferior ancho (IT2-F-PI-BW).
- Se revela que IT2-F-PI-P e IT2-F-PI-BW tienen un rendimiento de control similar.
- También se encuentra que IT2-F-PI-P es más robusto y mejor para rechazar perturbaciones que IT2-F-PI-TW e IT2-F-PI-BW.
- Los resultados proporcionan información para que los diseñadores de control elijan las formas de FOU apropiadas para los diferentes requisitos de control.

Otro problema común en los sistemas de control difuso de intervalo tipo 2, es el tratamiento de datos de muestreo, Du, Kao y Parque investigan sobre el problema de estabilización de dichos datos, obteniendo en esta área nuevos resultados ¹⁵⁸, para ellos algunas matrices de ponderación libre, matrices flojas y la información vinculada en las funciones de membresía se utilizan para mejorar el análisis de estabilidad. Basados en la teoría funcional de Lyapunov-Krasovskii (LKF), se deriva una nueva condición relajada suficiente con menos restricciones de desigualdad de matriz lineal (LMI). De acuerdo con este criterio, el controlador de datos de muestreo difuso IT2 está diseñado para garantizar que el sistema de circuito cerrado sea

¹⁵⁸ Zhenbin Du, Yonggui Kao, y Ju H Park, "New results for sampled-data control of interval type-2 fuzzy nonlinear systems", *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 1–21
<<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.09.035>>.

asintóticamente estable. Finalmente, se proporcionan tres ejemplos prácticos para demostrar la efectividad y eficiencia del diseño propuesto. Algunas comparaciones muestran que el algoritmo propuesto es más simple y práctico.

Raj y Mohan presentan una nueva configuración del controlador Intervalo Tipo-2 (IT2) difuso Proporcional-Integral (PI) o controlador difuso Proporcional-Derivado (PD) del tipo Takagi-Sugeno (TS)¹⁵⁹. Se intenta generalizar la estructura del controlador PI / PD difuso de IT2 utilizando múltiples conjuntos difusos. La difuminación de las entradas se realiza con tres o más conjuntos difusos que tienen funciones de pertenencia triangular / trapezoidal. La base de reglas consta de solo tres reglas para reducir el número de parámetros sintonizables del controlador. La norma triangular mínima (mínima) y la co-norma triangular de suma limitada (BS) se utilizan como operadores de conjunción y disyunción para reducir el número de reglas. Se considera que el reductor de tipo Karnik – Mendel (KM) y el defusificador de Promedio Ponderado (WA) derivan la estructura analítica del controlador difuso. Se investigan las propiedades y las variaciones de ganancia del controlador difuso. El estudio de simulación se lleva a cabo en sistemas dinámicos no lineales para verificar la aplicabilidad de los controladores difusos. Obteniendo como resultado las siguientes conclusiones:

- La estructura es general en el sentido de que se tiene la libertad de elegir el número de conjuntos difusos, así como las funciones de pertenencia (trapezoidales / triangulares). La estructura del controlador difuso IT2 se deriva utilizando solo tres reglas que a su vez ayudan a reducir el número de parámetros sintonizables del controlador difuso. El controlador difuso IT2 es un controlador PI / PD de ganancia variable donde las ganancias varían con las variables de entrada. El controlador puede volverse lineal. El controlador difuso IT2 se vuelve lineal incluso cuando el FOU no es cero. Se realizó un análisis comparativo de rendimiento de controladores lineales, tipo 1 difusos e IT2 difusos a través de un estudio de simulación en tres sistemas dinámicos no lineales. El controlador difuso IT2 puede manejar perturbaciones e incertidumbres de manera eficiente en comparación con el controlador difuso lineal o tipo 1, como se observa en la gráfica 40.
- FOU juega un papel importante al diseñar un controlador difuso IT2. El rendimiento de los controladores difusos depende en gran medida de las formas de FOU. FOU proporciona robustez y capacidades de manejo de incertidumbre a la estructura del controlador y, por lo tanto, es esencial

¹⁵⁹ Ritu Raj y B M Mohan, "General structure of Interval Type-2 fuzzy PI / PD controller of Takagi – Sugeno", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87.May 2019 (2020), 103273 <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103273>>.

seleccionar los límites adecuados en FOU. Un FOU más grande hace que el controlador difuso sea lineal por partes. Por lo tanto, se requiere una investigación detallada sobre la variación de FOU para comprender su efecto sobre la estructura y el rendimiento del controlador difuso IT2.

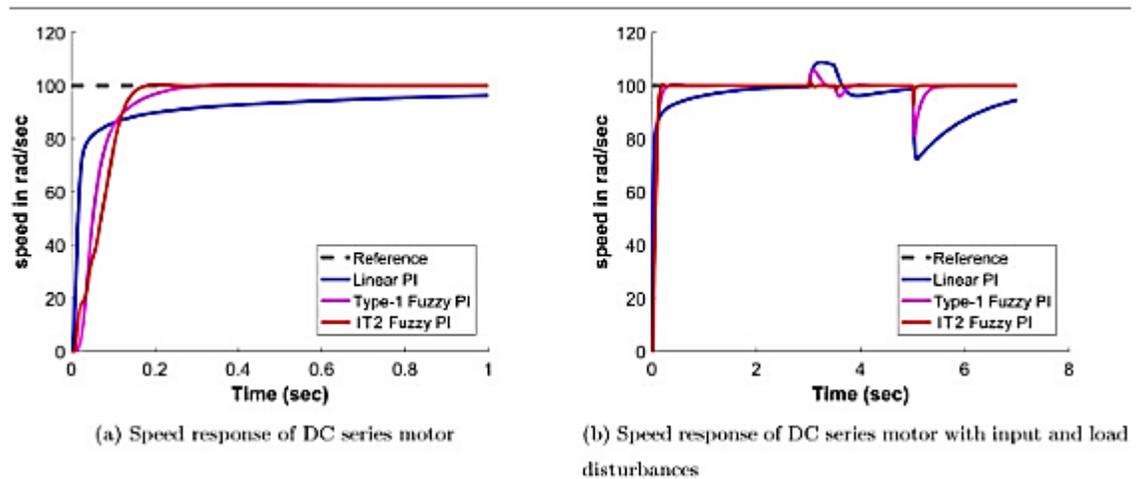


Figura 40 Comparación entre respuestas obtenidas con diferentes controladores en la investigación de Raj y Mohan ¹⁶⁰

El diseño de controladores difusos tipo 2 hoy está muy robustecido, tanto así, que para lograr los mejores resultados y poder controlar sistemas muy complejos la tendencia es combinar este con otras técnicas de control, logrando así muy buenos resultados. Es esto lo que motiva a Seyed Moezi a realizar una investigación en la que propone y diseña un método SMC (AIT2FFOBSMC) de intervalo fraccionado difuso de orden difuso de intervalo adaptativo óptimo ¹⁶¹, que puede reducir significativamente la charla y el error de seguimiento aplicando menos esfuerzo de control. Además, el método propuesto tiene la capacidad de implementarse en sistemas totalmente accionados y subaccionados en tiempo real y puede mantener su rendimiento deseable en dichos sistemas, que se ven afectados por una variedad de ruidos, perturbaciones e incertidumbres. Según Seyed de acuerdo con las declaraciones mencionadas, el método AIT2FFOBSMC difiere de los métodos anteriores, tanto teórica como prácticamente de varias maneras, de la siguiente manera:

¹⁶⁰ Raj y Mohan.

¹⁶¹ Seyed Alireza, Ehsan Zakeri, y Mohammad Egtesad, "Optimal adaptive interval type-2 fuzzy fractional-order backstepping sliding mode control method for some classes of nonlinear systems", *ISA Transactions*, 93 (2019), 23–39 <<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.03.006>>.

- Aprovecha las ventajas de SMC y los métodos de retroceso para aumentar la precisión de seguimiento del sistema y su solidez frente a incertidumbres y perturbaciones.
- Utiliza una superficie deslizante de orden fraccional para reducir las vibraciones y aumentar la flexibilidad del método AIT2FFOBSMC.
- Se espera que un compensador difuso tipo 2 adaptativo no solo pueda estimar las incertidumbres del sistema, sino que también reduzca el parloteo y el esfuerzo de control.
- El método AIT2FFOBSMC que utiliza el método jerárquico de modo de deslizamiento fraccional es aplicable a los sistemas subaccionados con incertidumbre.
- No se impone el problema de la explosión de términos debido al bajo orden del sistema, las características de la ley de control virtual y el uso de técnicas jerárquicas de superficie deslizante.
- Se proporciona evidencia de prueba de estabilidad para este método innovador para sistemas completamente accionados y subaccionados.
- Se propone un procedimiento innovador para calcular los parámetros del método AIT2FFOBSMC utilizando el MTOA mediante el diseño de una función de costo para mejorar el rendimiento del sistema de control de circuito cerrado.
- Tres puntos de referencia experimentales están diseñados para examinar el rendimiento del método de control para sistemas reales en tiempo real con incertidumbre, perturbación y ruido.

Otra investigación que integra diferentes técnicas es la de Wang, Luo y Xingyuan, quienes investigan sobre la sincronización e identificación de sistemas no lineales mediante el uso de una nueva red neural difusa LSTM de intervalo de evolución automática tipo 2 ¹⁶², donde mediante la estructura neural difusa y el mecanismo de memoria a largo plazo (LSTM), proponen una nueva estructura de inferencia de la red neural LSTM difusa de intervalo de evolución automática tipo 2 (eIT2FNN-LSTM) para la sincronización e identificación de dinámica no lineal. Los sistemas neuronales difusos con estructura LSTM se introducen en redes neuronales difusas tipo 2, donde, por medio del mecanismo de puerta, se implementa una estructura recurrente en la dimensión de tiempo al alimentar la fuerza de disparo de cada regla.

¹⁶² Wang Haiyue, Luo Chao, y Wang Xingyuan, "Synchronization and identification of nonlinear systems by using a novel self-evolving interval type-2 fuzzy LSTM-neural network", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 81.July 2018 (2019), 79–93
<<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.02.002>>.

Además, se utiliza un algoritmo de generación de reglas en línea basado en la agrupación de densidad dinámica para lograr actualizaciones estructurales, que pueden satisfacer la necesidad de un proceso de datos de alta frecuencia en realidad. Al incorporar el esquema de control difuso de intervalo adaptativo directo tipo 2 LSTM y el enfoque de modo deslizante, se pueden sincronizar dos sistemas caóticos con ruido de perturbación externa y / o parámetros de variación aleatoria basados en el criterio de estabilidad de Lyapunov, donde dos métodos, es decir, el entrenamiento de gradiente y optimización de Enjambre de partículas y utilizan algoritmos (PSO).

Sarabakha mediante el uso de algunas observaciones atractivas, propone una metodología sistemática alternativa para derivar explícitamente FM para DI-T1-FLC y DI-IT2-FLC ¹⁶³. El procedimiento propuesto para derivar una relación analítica de forma cerrada entre entradas y salidas proporciona información sobre el efecto de los parámetros FOU. Además, la metodología propuesta permite la generación de varias superficies de control (CS) al remodelar solo el tamaño de FOU. Además, al ajustar solo un parámetro FOU, es posible desarrollar diferentes controladores con una acción menos agresiva o más agresiva. Además, la disponibilidad de FM permite reducir drásticamente el tiempo de cálculo para los FLC. En este trabajo, T1-FLC e IT2-FLC con tres antecedentes triangulares y tres FS consecuentes de singleton se utilizan para facilitar la ilustración del método propuesto. Sin embargo, el método presentado no se limita a un FLC específico y puede aplicarse a cualquier T1-FLC o IT2-FLC para generar su FM en forma cerrada. En resumen, el objetivo final de este trabajo es contribuir a la aplicabilidad de los FLC de doble entrada.

1.12 Establecimiento de los criterios de desarrollo de controladores difusos tipo 2.

Wu y Mendel dan algunas recomendaciones sobre el diseño de sistemas difusos prácticos de intervalo tipo 2 ¹⁶⁴, recomendaciones las cuales van orientadas a responder a las siguientes interrogantes ¿Se debe usar un fuzzificador singleton o no singleton? ¿Cuántas MF deben usarse para cada entrada? ¿Deben usarse MF lineales gaussianos o por partes? ¿Se debe utilizar la inferencia Mamdani o Takagi-

¹⁶³ Andriy Sarabakha, Changhong Fu, y Erdal Kayacan, "Intuit before tuning : Type-1 and type-2 fuzzy logic controllers", *Applied Soft Computing Journal*, 81 (2019), 105495 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105495>>.

¹⁶⁴ Dongrui Wu y Jerry M Mendel, "Recommendations on designing practical interval type-2 fuzzy systems ☆", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85, February (2019), 182–93 <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.06.012>>.

Sugeno-Kang (TSK)? ¿Se debe utilizar mínimo o producto-Norma? ¿Debe el procesamiento de salida incluir reducción de tipo? Si se utiliza la reducción de tipo, ¿qué método se debe elegir? ¿Cómo optimizar el sistema difuso IT2? donde para dichos autores la solución a estas interrogantes hará que los sistemas difusos IT2 sea más accesibles para los diseñadores. Teniendo como conclusión final de su investigación que hay muchas opciones para diseñar un sistema difuso IT2 de buen rendimiento, incluido el tipo de fuzzificador (singleton o no singleton), número de funciones de membresía (MF), forma de MF (Gauss o lineal por partes), tipo de reglas (Zadeh o TSK), tipo de inferencia (mínimo o producto T-norma), tipo de procesamiento de salida (reducción de tipo o no) y método de optimización. Si bien estas opciones le dan a un investigador experimentado en sistemas difusos de IT2 una amplia libertad para diseñar el sistema difuso de IT2 óptimo, pueden parecer abrumadores y confusos para los principiantes de IT2, donde para ayudar al principiante de IT2 a superar la barrera del aprendizaje, recomiendan las siguientes opciones de inicio representativas para los sistemas difusos de IT2 basados en su experiencia: fuzzificador singleton, reglas TSK más simples, 7 FOU gaussianas en cada dominio de entrada, producto T-norma, calcular la salida mediante el uso de los algoritmos EIASC para la reducción de tipo de centro de conjuntos y luego la defuzzificación, o, el método NT o BMM directamente, y un algoritmo EC de dos pasos para la optimización. No reclaman que sus recomendaciones sean siempre las mejores. Un investigador experimentado en sistemas difusos IT2 puede diseñar mejores sistemas difusos IT2 utilizando otras opciones; sin embargo, estas recomendaciones tienen una alta probabilidad de conducir a sistemas difusos IT2 que pueden superar a los T1. También aclaran dos mitos sobre los sistemas difusos IT2, estos son:

Mito 1: Cambiar los conjuntos difusos T1 a conjuntos difusos IT2 mejora automáticamente el rendimiento.

Mito 2: la optimización de un controlador difuso IT2 en escenarios conocidos garantiza su rendimiento óptimo en un escenario desconocido.

1.13 Implementación del control difuso tipo 2

En el 2013 para Alfonso Vela ¹⁶⁵ Existían varias opciones para la implementación de controladores basados en lógica difusa tipo 2 (T2FLC). El método usualmente seleccionado, consistía en concebir al controlador difuso tipo 2 como una colección embebida de controladores difusos tipo 1 (T1FLCs); cada uno de los cuales genera

¹⁶⁵ Rivera et al.

un valor duro de salida, como resultado de la aplicación de un conjunto particular de valores de entrada. Estos valores duros resultantes se concentran mediante un reductor de tipo, el cual entrega un valor duro global, que será en sí, la respuesta total del controlador. En esta opción de implementación, se presenta un problema de cómputo, ya que es necesario procesar y almacenar datos de n controladores difusos tipo 1, lo que implica un incremento en los tiempos de procesamiento, en los requerimientos del sistema, etc. En cambio, para él el método de implementación presentado por Castillo et al, solamente necesita la huella de incertidumbre superior e inferior de los conjuntos difusos tipo 2, para desarrollar toda la inferencia difusa del controlador.

Diaz Adolfo en el 2009 mucho antes de los análisis de Alfonso Vela ya investigaba la aplicación de la lógica difusa tipo dos en una planta didáctica en control de procesos industriales, respecto de las variables nivel y flujo ¹⁶⁶, quien utiliza el software Matlab para desarrollar las máquinas de inferencia difuso tipo uno y dos tipo Mamdani, las cuales permitieron obtener los parámetros que se enviaron a través de una red neuronal multicapa al PLC, con la utilidad del OPC y para el control de las variables de proceso, flujo y nivel. Emilio R. y un año previo a dicho análisis de Vela en el 2012 Farfán Martínez presenta el diseño de un controlador que combina la teoría de estabilidad de Lyapunov y los sistemas difusos tipo 2 para controlar la velocidad de un servomecanismo ¹⁶⁷. Este enfoque utiliza una función candidata de Lyapunov para obtener las reglas del controlador difuso. El diseño de la base de reglas del controlador utiliza exclusivamente las señales de error y la derivada del error. Los resultados son comparados contra un controlador clásico PI propuesto por el fabricante para este tipo de aplicaciones, mostrando un mejor desempeño cuando se elige correctamente el intervalo de separación de los conjuntos difusos. Se utilizan dos criterios de desempeño basados en el error para comparar el funcionamiento de los dos controladores. Los resultados son presentados a nivel simulación.

Un controlador de voltaje no lineal basado en el sistema de control de lógica difusa tipo intervalo 2 para sistemas de energía de múltiples máquinas es desarrollado por A. Abbadi ¹⁶⁸. Abbadi propone un controlador difuso de intervalo tipo 2 que tiene la

¹⁶⁶ Adolfo Diaz et al., “Aplicación de la lógica difusa tipo dos en una planta didáctica en control de procesos industriales, respecto de las variables nivel y flujo”, 2009.

¹⁶⁷ Rosalío Farfán Martínez et al., “Control Difuso Tipo 2 en el Enfoque de Lyapunov Aplicado a un Servomecanismo”, 2012, 1–9.

¹⁶⁸ A Abbadi, L Nezli, y D Boukhetala, “Electrical Power and Energy Systems A nonlinear voltage controller based on interval type 2 fuzzy logic control system for multimachine power systems”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 45.1 (2013), 456–67 <<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.020>>.

capacidad de mejorar la estabilidad transitoria y lograr la regulación de voltaje simultáneamente para sistemas de energía de múltiples máquinas. El diseño de este controlador implica la técnica de linealización de retroalimentación directa (DFL). El modelo de sistema compensado DFL se transforma en un modelo difuso de tipo 1 T – S equivalente utilizando funciones linealmente independientes, destacando los fundamentos matemáticos para analizar la estabilidad y facilitar el diseño de controladores estabilizadores de los sistemas de control difuso Takagi – Sugeno de intervalo tipo 2 (IT2 T – S FLCS). Las restricciones de estabilidad se obtienen mediante el uso de desigualdades de matriz lineal (LMI). Basado solo en mediciones locales, el controlador diseñado garantiza la estabilidad transitoria, la regulación del voltaje y satisface las respuestas transitorias deseadas. El controlador propuesto se aplica al sistema de alimentación de bus infinito de dos generadores. Los resultados de la simulación ilustran el rendimiento del enfoque desarrollado independientemente de las condiciones de funcionamiento del sistema.

Wen-Shyong Yu diseñó un control de seguimiento adaptativo difuso de intervalo tipo 2 para un motor de corriente continua de imán permanente (PMDC) con zonas muertas y perturbaciones externas. El modelo dinámico difuso tipo 2 es usado para aproximar la dinámica del motor sin construir el sector inverso de zona muerta, donde los parámetros del modelo difuso se obtienen tanto de la inferencia difusa como de las leyes de actualización en línea. Basado en el criterio de Lyapunov y la desigualdad de Riccati, el esquema de control se deriva para estabilizar el sistema de circuito cerrado de modo que se garantice que todos los estados del sistema estén limitados y el rendimiento del seguimiento se logra debido a incertidumbres, no linealidades de zona muerta y perturbaciones externas. La ventaja del esquema de control propuesto es que puede manejar mejor la vaguedad o las incertidumbres inherentes a las palabras lingüísticas utilizando funciones de membresía de conjuntos difusos con capacidad de adaptación mediante resultados analíticos lineales en lugar de estimar funciones del sistema no lineales ya que los parámetros del sistema son desconocidos. El diagrama de bloques del sistema de control general se muestra en la Figura 41.

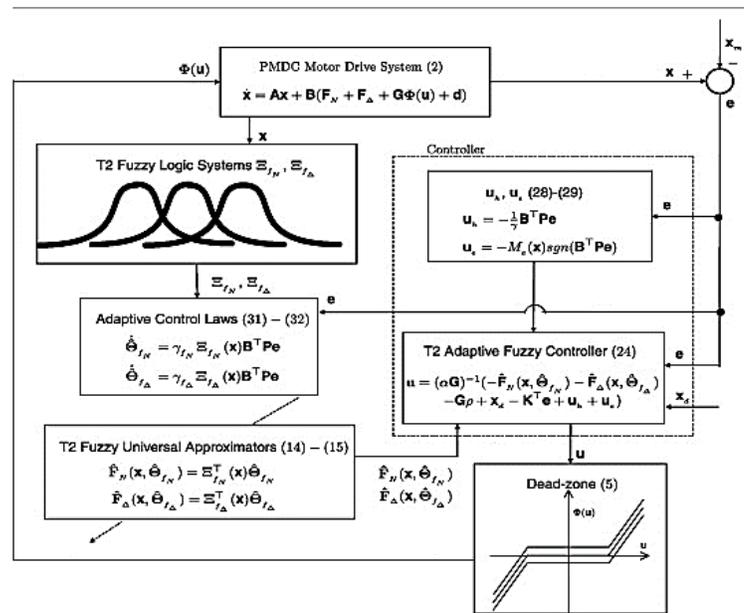


Figura 41 diagrama de bloques del sistema de control general ¹⁶⁹

Ya para el 2015 para Shirin Toloue ¹⁷⁰ los robots paralelos tenían estructuras complicadas, así como ecuaciones dinámicas y cinemáticas complejas, lo que hacía que los enfoques de control basados en modelos fueran ineficaces debido a su alto costo computacional y baja precisión. Razón por lo cual propone una arquitectura de control de crecimiento dinámico sin modelos para robots paralelos que combina los méritos de los sistemas autoorganizados con los de los sistemas neuronales difusos de tipo -2 de intervalo, el sistema neuro difuso propuesto es el DGIT2FNC, su estructura se puede observar en la figura 42. El enfoque propuesto se aplica luego experimentalmente al control de posición de un robot paralelo 3-PSP (Prismático-Esférico-Prismático). La construcción de base de reglas propuesta es diferente de los enfoques de autoorganización más convencionales al omitir el proceso de poda de nodos mientras se agregan nodos de manera más conservadora. Esto ayuda a preservar valiosas reglas históricas para cuando sean necesarias. El uso de la estructura lógica difusa de tipo 2 de intervalo también permite hacer frente mejor a las incertidumbres en los parámetros, la dinámica del

¹⁶⁹ Wen-shyong Yu y Ho-sheng Chen, "Interval type-2 fuzzy adaptive tracking control design for PMDC motor with the sector dead-zones", *INFORMATION SCIENCES*, 288 (2014), 108–34 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.07.004>>.

¹⁷⁰ Shirin Fartash, Mohammad-r Akbarzadeh, y Alireza Akbarzadeh, "Position tracking of a 3-PSP parallel robot using dynamic growing interval type-2 fuzzy neural control", *Applied Soft Computing Journal*, 37 (2015), 1–14 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.07.015>>.

modelo de robot y las incertidumbres en el espacio de reglas. Finalmente, la estructura de adaptación permite el aprendizaje y adapta aún más la base de reglas al entorno cambiante. La simulación múltiple y los estudios experimentales de su investigación confirman que el enfoque propuesto conduce a menos reglas.

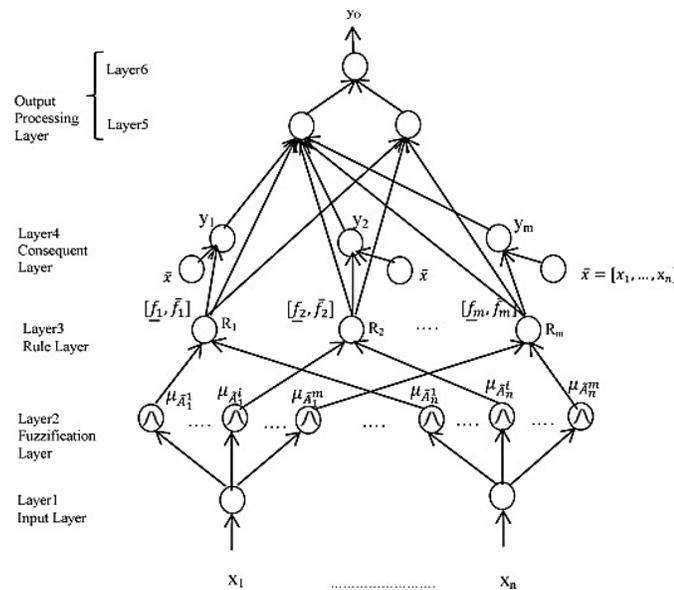


Figura 42 estructura de la DGIT2FNC ¹⁷¹

En dicho año 2015 el objetivo para Mauricio Sánchez y Juan Castro era mostrar que un Sistema de control difuso tipo 2 generalizado puede superar a los sistemas de control difuso tipo 1 e intervalo tipo 2 cuando hay perturbaciones externas, su investigación llevaba por título “Sistemas difusos de tipo 2 generalizados para controlar un robot móvil y una comparación de rendimiento con los sistemas difusos de tipo 2 y tipo 1 de intervalo” ¹⁷². Un sistema difuso tipo 2 generalizado puede manejar una mejor incertidumbre debido a la naturaleza de sus funciones de membresía y, como tal, están mejor diseñados para situaciones en las que hay ruido externo. Para probar la resistencia al ruido de los Controladores difusos, Sánchez y Castro presentan el diseño de un Controlador difuso para un robot móvil, junto con tres tipos de perturbaciones externas: ruido blanco de banda limitada, ruido de pulso y ruido de número aleatorio uniforme. La resistencia al ruido se mide a través de

¹⁷¹ Fartash, Akbarzadeh, y Akbarzadeh.

¹⁷² Mauricio A Sanchez, Oscar Castillo, y Juan R Castro, “Expert Systems with Applications Generalized Type-2 Fuzzy Systems for controlling a mobile robot and a performance comparison with Interval Type-2 and Type-1 Fuzzy Systems”, *Expert Systems With Applications*, 42.14 (2015), 5904–14 <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.03.024>>.

diferentes índices de rendimiento, como ITAE, ITSE, IAE e ISE. Como ejemplo de la relación entre el ruido y el rendimiento del FC, la figura 43 muestra los valores del Índice de rendimiento obtenidos para cada FC (T1, IT2 y GT2) al insertar ruido blanco de banda limitada en el sistema. Aquí, el rendimiento del GT2FC es mejor con respecto a IT2FC y T1FC.

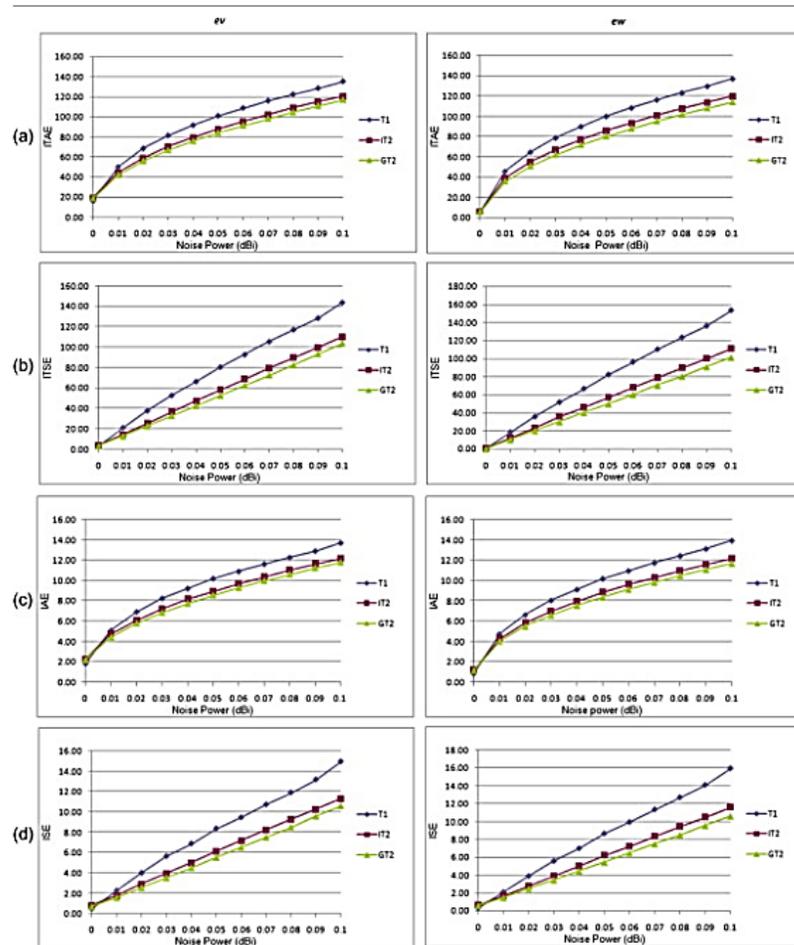


Figura 43 Comportamiento de varios índices de rendimiento en relación con la cantidad de perturbaciones de ruido presentes en el sistema, cuando se utilizan T1FC, IT2FC y GT2FC. (a) ITAE, (b) ITSE, (c) IAE y (d) ISE. ¹⁷³

¹⁷³ Sanchez, Castillo, y Castro.

Hongyi Li diseña un control de sistemas difusos de intervalo tipo 2 con falla del actuador enfocado en el control de datos muestreados ¹⁷⁴. Su investigación se centra en el diseño del controlador de datos muestreados para sistemas difusos de intervalo tipo 2 (IT2) con falla del actuador. El sistema difuso IT2 y el controlador de retroalimentación de estado IT2 comparten diferentes funciones de membresía. En primer lugar, teniendo en cuenta las funciones de pertenencia no coincidentes, se construyen el modelo difuso IT2 y el controlador de datos muestreados de retroalimentación de estado IT2. En segundo lugar, basado en la teoría de estabilidad de Lyapunov, un controlador de datos muestreados con retroalimentación de estado IT2 está diseñado de tal manera que el sistema de circuito cerrado es asintóticamente estable. La falla del actuador se considera en los sistemas de control. El sistema de circuito cerrado resultante es confiable ya que el controlador diseñado puede garantizar la estabilidad asintótica y H^∞ rendimiento cuando el actuador experimenta una falla. El controlador de datos muestreados se puede expresar resolviendo un problema de optimización convexo.

Otra aplicación muy común del control difuso tipo 2 es el control de sistemas carro-péndulo, Ruvalcaba desarrolla un control adaptativo basándose en dichas técnicas difusas tipo 2 ¹⁷⁵, Ruvalcaba finalmente presenta los resultados obtenidos mediante una simulación numérica al implementar el controlador propuesto sobre el sistema carro-péndulo, donde demuestra como los sistemas difusos tipo 2 pueden ayudar a mejorar las respuestas de los sistemas difusos tipo 1. Donde el sistema difuso cumple su función dentro del control adaptativo como se muestra en la figura 44.

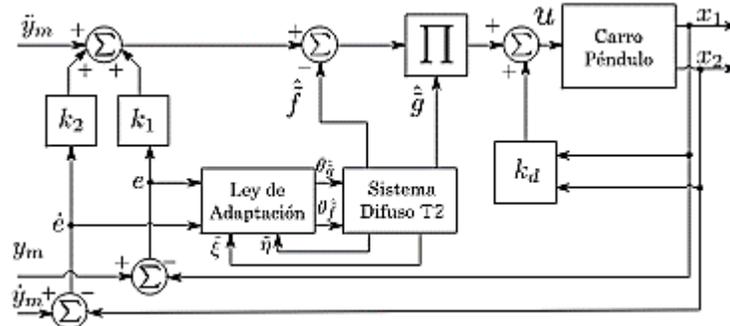


Figura 44 control adaptativo difuso tipo 2 ¹⁷⁶

¹⁷⁴ Hongyi Li et al., “Control design of interval type-2 fuzzy systems with actuator fault : Sampled-data control approach”, *INFORMATION SCIENCES*, 302 (2015), 1–13
<<https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.01.008>>.

¹⁷⁵ Francisco Ruvalcaba y Miguel Llama, “CONTROL ADAPTABLE DIFUSO TIPO 2 APLICADO A UN SISTEMA CARRO-PENDULO”, *Memorias del XVIII Congreso Mexicano de Robótica 2016*, 2016, 50–55.

¹⁷⁶ Ruvalcaba y Llama.

En la medicina también existen diversas aplicaciones, Faiyaz Doctor trabaja los conjuntos difusos tipo 2 aplicados a controladores lógicos difusos autoorganizables multivariados para regular la anestesia ¹⁷⁷, en su investigación se proponen controladores novedosos de intervalo y controladores lógicos difusos de autoorganización de tipo 2 generales (SOFLC) para el control automático de la anestesia durante los procedimientos quirúrgicos. El SOFLC tipo 2 es un controlador difuso adaptativo jerárquico capaz de generar y modificar su base de reglas en respuesta al rendimiento del controlador. El SOFLC tipo 2 utiliza conjuntos difusos tipo 2 derivados de datos quirúrgicos reales que capturan la variabilidad del paciente en parámetros fisiológicos monitoreados durante la sedación anestésica, que se utilizan para definir la huella de incertidumbre (FOU) de los conjuntos difusos tipo 2. Se llevaron a cabo simulaciones experimentales para evaluar el rendimiento de los SOFLC de tipo 2 en su capacidad para controlar las tasas de anestesia para mantener los puntos de ajuste fisiológicos deseados para la anestesia (relajación muscular y presión arterial) bajo señal y ruido del paciente. Los resultados muestran que los SOFLC de tipo 2 pueden funcionar bien y superar el SOFLC de tipo 1 anterior y los enfoques comparativos para el control de la anestesia que producen errores de rendimiento más bajos al usar reglas mejor definidas para regular los puntos de ajuste de la anestesia mientras se manejan las incertidumbres de control. Los resultados están respaldados por análisis estadísticos que también muestran que los SOFLC de tipo 2 generales zSlices pueden superar el SOFLC de tipo 2 de intervalo en términos de su rendimiento en estado estacionario.

Volviendo al tema de aplicación en energías renovables, para Krishnama Raju el generador de inducción doblemente alimentado es muy sensible a las variaciones de voltaje en la red, lo que representa una limitación para las plantas de energía eólica durante la operación integrada de la red. Manejar la incertidumbre en la velocidad del viento y las fallas de la red es un desafío importante para cumplir con los requisitos del código de la red moderna. Raju propone una nueva estrategia de control para el convertidor lateral Rotor utilizando conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo que pueden modelar y manejar incertidumbres en los parámetros del sistema ¹⁷⁸. La presencia de la tercera dimensión en la función de membresía ofrece un grado adicional de libertad en el diseño del controlador para contrarrestar los efectos de las fluctuaciones en la velocidad del viento y el bajo voltaje durante

¹⁷⁷ Faiyaz Doctor et al., "Type-2 fuzzy sets applied to multivariable self-organizing fuzzy logic controllers for regulating anesthesia", *Applied Soft Computing Journal*, 38 (2016), 872–89 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.014>>.

¹⁷⁸ S Krishnama Raju y G N Pillai, "Design and real time implementation of type-2 fuzzy vector control for DFIG based wind generators", *Renewable Energy*, 88 (2016), 40–50 <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.006>>.

condiciones severas de falla de la red. Un DFIG de 2 MW conectado a la red está modelado en el software de simulación RSCAD e interconectado con el simulador digital en tiempo real (RTDS) para realizar las simulaciones en tiempo real. Muchos laboratorios de investigación consideran que la plataforma RTDS es un módulo de prueba en tiempo real para la creación de prototipos de controladores y también para aplicaciones de hardware en bucle (HIL). El rendimiento del controlador se evalúa en la configuración HIL, realizando simulaciones en tiempo real bajo diversas incertidumbres de parámetros. El controlador propuesto puede mejorar la capacidad de conducción de bajo voltaje de DFIG en comparación con la de PI y el controlador difuso tipo 1.

Para Mohammad Hassan Khooban ¹⁷⁹ debido a la naturaleza intermitente de las energías renovables empleadas en redes inteligentes, se producen grandes fluctuaciones de frecuencia cuando la capacidad de control de frecuencia de carga (LFC) no es suficiente para compensar el desequilibrio de generación y demanda. Este problema puede intensificarse cuando el sistema funciona en un modo de operación de isla. Mientras tanto, los vehículos eléctricos (EV) están creciendo en popularidad, siendo utilizados como unidades de almacenamiento de energía dispersas en lugar de pequeñas baterías en los sistemas. En consecuencia, el control de potencia del vehículo a la red (V2G) se puede aplicar para compensar la capacidad inadecuada de LFC y, por lo tanto, mejorar la estabilidad de frecuencia de las redes inteligentes, especialmente en el modo de operación de la isla. Por otro lado, los sistemas de energía complejos y de gran escala encuentran muchas incertidumbres diferentes. Para manejar estas incertidumbres, Mohammad propone una combinación de los conjuntos de lógica difusa de tipo 2 general (GT2FLS) y la técnica de Algoritmo de búsqueda de armonía modificada (MHSA), como un nuevo algoritmo heurístico, para ajustar adaptativamente el controlador proporcional-integral (PI) para LFC en MicroGrids isleños (MG). Aunque la implementación de sistemas difusos de tipo 2 en general es computacionalmente engorroso, al usar una representación plana recientemente introducida, GT2FLS puede considerarse como una combinación de varios sistemas de lógica difusa de tipo 2 de intervalo (IT2FLS), cada uno con su propio nivel α y lingüístico correspondientes las reglas se pueden incorporar directamente al controlador. Su investigación presenta además un nuevo algoritmo de optimización modificado para ajustar los factores de escala y las funciones de membresía del controlador general difuso de tipo 2 PI (GT2FPI) y, por lo tanto, para minimizar las desviaciones de frecuencia del sistema MG contra las perturbaciones de carga de manera más efectiva. Para evaluar la

¹⁷⁹ Mohammad Hassan, Taher Niknam, y Frede Blaabjerg, "A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles", 143 (2017), 585–98 <<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.057>>.

eficiencia del controlador propuesto, los resultados obtenidos se comparan con los de la derivada integral proporcional (PID), difuso-PID (FPID) y los controladores PI de intervalo difuso de tipo II (IT2FPI), que son los métodos más recientes aplicados a este respecto. Los resultados de la simulación demuestran la perfección y eficacia del controlador propuesto. y controladores de PI de intervalo difuso de tipo II (IT2FPI), que son los métodos más recientes aplicados a este respecto. Los resultados de la simulación demuestran la perfección y eficacia del controlador propuesto.

Moo en el 2018 presenta una metodología para la aplicación de un controlador difuso tipo-2 en intervalos para el control de velocidad de un motor de corriente directa ante un gran disturbio estocástico y otro determinista ¹⁸⁰. Moo propone la arquitectura del control tipo-2 con el algoritmo mejorado de Karnik & Mendel (EKM por sus siglas en inglés). El cuál es más eficiente que su predecesor Karnik & Mendel (KM) en tiempo de ejecución. El modelo utilizado para las simulaciones es el modelo no lineal de un motor de corriente directa de 5 HP, incluyendo el limitador del voltaje de armadura.

Otra aplicación del control difuso tipo 2 esta en la industria petrolera, una de dichas aplicaciones es la perforación de los pozos, para Zhang Chi y Zou Wei el sistema rotativo orientable (RSS) es una técnica de perforación direccional que se ha aplicado en la exploración de petróleo y gas en entornos complejos para los requisitos de energía fósil y prospección geológica, ver figura 45. Las no linealidades e incertidumbres causadas por el dispositivo dinámico, la estructura mecánica, el entorno extremo del fondo del pozo y los requisitos del diseño de trayectoria compleja en el trabajo de perforación real aumentan las dificultades del seguimiento preciso de la trayectoria. Es por ello que Chi y Wei proponen un método de control cooperativo de retroalimentación de doble circuito basado en un modelo basado en el control de lógica difusa de tipo 2 de intervalo (IT2FLC) y algoritmos de aprendizaje de refuerzo crítico de actor (RL) con filtros digitales de paso bajo (LPF) de un orden para seguimiento de trayectoria tridimensional de RSS ¹⁸¹. En la arquitectura de control de seguimiento de trayectoria RSS propuesta, se utiliza un IT2FLC para tratar las no linealidades e incertidumbres del sistema, y se explota un controlador RL iterativo actor-crítico en línea estructurado por redes neuronales de función de

¹⁸⁰ Emilio R Moo Medina et al., “Controlador difuso tipo-2 para el control de velocidad de un motor de CD sujeto a un disturbio grande Speed Control of a DC Motor with a Type-2 Fuzzy Logic Controller Subject to a Large Disturbance”, 22.2 (2018), 521–36 <<https://doi.org/10.13053/CyS-22-2-2251>>.

¹⁸¹ Chi Zhang et al., “Trajectory tracking control for rotary steerable systems using interval type-2 fuzzy logic and reinforcement learning”, *Journal of the Franklin Institute*, 355.2 (2018), 803–26 <<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2017.12.001>>.

base radial (RBFNN) y programación dinámica adaptativa (ADP) para eliminar el palo-resbalón oscilaciones que dependen de sus propiedades aproximadas tanto en la función de acción (actor) como en la función de valor (crítico). Los dos efectos de control se fusionan para constituir un controlador cooperativo para realizar un seguimiento preciso de la trayectoria de RSS. La eficacia del controlador se valida mediante simulaciones en pruebas de función diseñadas para la velocidad de perforación del ángulo de construcción y el seguimiento completo de la trayectoria del fondo del pozo, y mediante comparaciones con otros métodos de control.

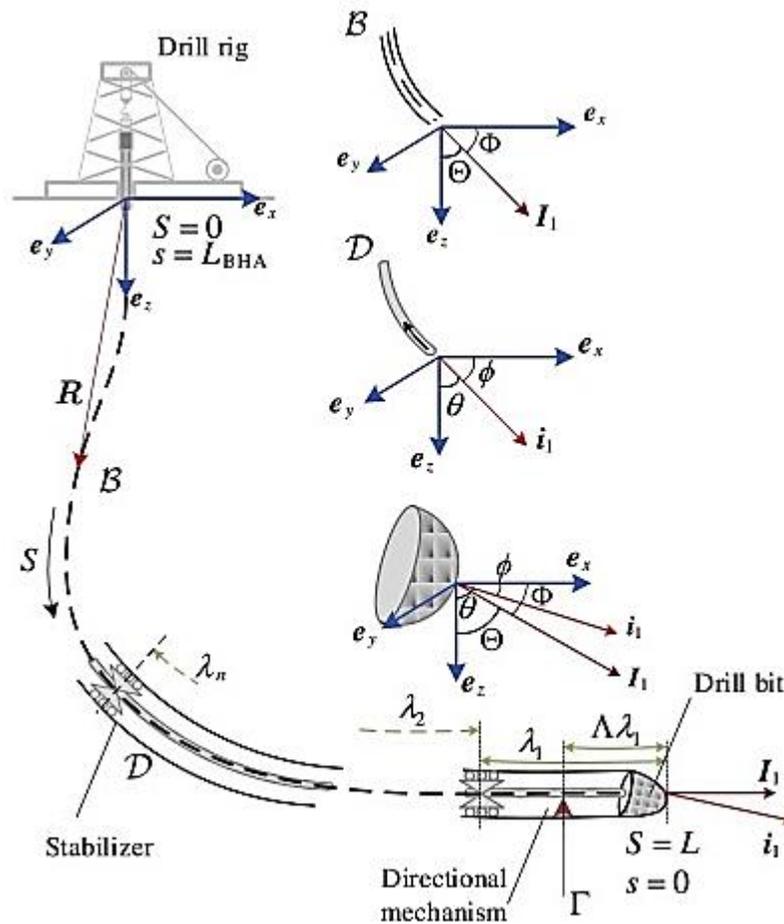


Figura 45 Geometría de RSS ¹⁸²

¹⁸² Chi Zhang et al.

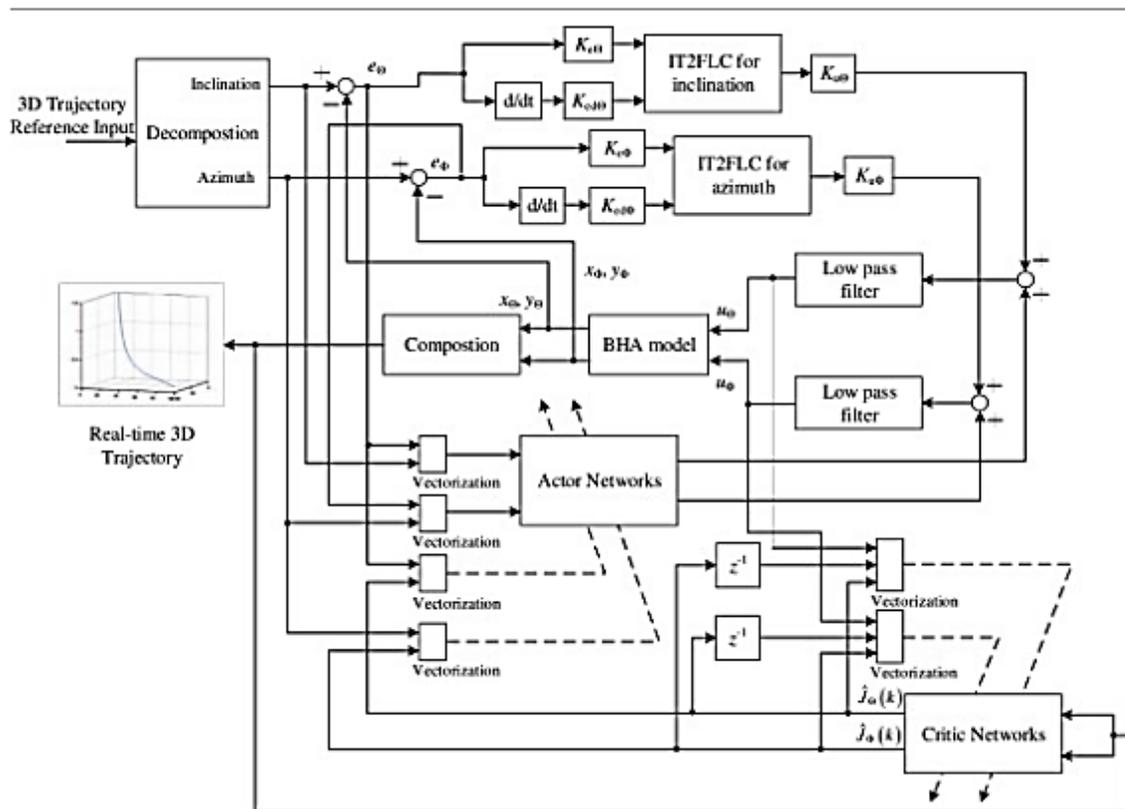


Figura 46 Arquitectura de control de seguimiento de trayectoria tridimensional de RSS. ¹⁸³

En los procesos químicos en los cuales un control riguroso de las proporciones también es útil el control difuso, Shiwen Xie desarrolla una estrategia híbrida de control difuso para el control del proceso de goethita ¹⁸⁴, el proceso de goethita es un sistema de reacción complicado que ocupa una posición importante en el proceso de hidrometalurgia de zinc. Exhibe un comportamiento no lineal y una naturaleza de retardo de tiempo debido a las reacciones químicas. Para lograr el rendimiento de control estable y en tiempo real, Shiwen propone una estrategia híbrida de control difuso que integra un controlador lógico difuso tipo 1 y uno tipo 2. De acuerdo con el pH medido en línea, el controlador difuso tipo 1 (T1 FLC) a través del control difuso Takagi-Sugeno se emplea para controlar la tasa de aditivos de óxido de zinc. Un método de ajuste de parámetros que no requiere el modelo del sistema está

¹⁸³ Chi Zhang et al.

¹⁸⁴ Shiwen Xie et al., "Hybrid fuzzy control for the goethite process in zinc production plant combining type-1 and type-2 fuzzy logics", *Neurocomputing*, 366 (2019), 170–77 <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.06.089>>.

diseñado para el T1 FLC. Debido a que la concentración de iones ferrosos no puede medirse en línea, el controlador de lógica difusa de intervalo tipo 2 (IT2 FLC) se utiliza para controlar el caudal de oxígeno. De acuerdo con la información de retroalimentación, El algoritmo de descenso de gradiente se utiliza para actualizar los parámetros en el IT2 FLC. Debido a la estructura desconocida del sistema, la información de descenso de gradiente se estima mediante la aproximación estocástica de perturbación simultánea. Finalmente, las simulaciones se llevan a cabo utilizando los datos prácticos de producción. Los resultados de la simulación muestran la efectividad de la estrategia propuesta. La estrategia de control difuso híbrido mejora el rendimiento de control del proceso de goethita, en comparación con el controlador PID.

El control difuso tipo 2 también ha sido muy utilizado en la robótica, en el control de manipuladores, un trabajo en esta área lo presenta Ethem Kalekci, quien desarrolló un control de trayectoria y vibración de un manipulador articular flexible utilizando lógica difusa de intervalo tipo 2 ¹⁸⁵. El controlador fue diseñado en una caja de herramientas de lógica difusa de intervalo tipo 2 basada en Mamdani, utilizando funciones de pertenencia triangular de intervalo y el algoritmo de reducción de tipo Karnik-Mendel. La estabilidad en circuito cerrado del sistema se demuestra en base al teorema de estabilidad de Lyapunov. Para observar la efectividad y robustez del controlador propuesto a las variaciones de los parámetros del sistema (cambio en la longitud del enlace y la carga útil), se comparan los resultados experimentales de los controladores de lógica difusa de tipo 2 de intervalo y convencionales de tipo 1. Los resultados muestran que el controlador propuesto mejora claramente la vibración del enlace y el comportamiento de seguimiento de trayectoria del sistema.

Otra aplicación se tiene en los vehículos aéreos no tripulados (UAV), como los drones, Samir Zeghlache desarrolló un control tolerante a fallas para un cuadrotor modificado a través de un control basado en backstepping y lógica difusa tipo 2 adaptable sujeto a fallas del actuador ¹⁸⁶. El backstepping cumple la función de estabilizar globalmente el sistema en medio de otras perturbaciones, la insensibilidad a los errores del modelo y las incertidumbres paramétricas. La lógica difusa del intervalo adaptativo tipo 2 como observador de fallas puede estimar efectivamente las fallas agrupadas sin el conocimiento de sus límites para el UAV quadrotor modificado. Adicionalmente, Los sistemas difusos tipo 2 se utilizan para

¹⁸⁵ Ethem Kelekci y Selcuk Kizir, "Trajectory and vibration control of a flexible joint manipulator using interval type-2 fuzzy logic", *ISA Transactions*, 2019
<<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.04.001>>.

¹⁸⁶ Samir Zeghlache et al., "Fault tolerant control for modified quadrotor via adaptive type-2 fuzzy backstepping subject to actuator faults", *ISA Transactions*, 2019
<<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.04.034>>.

aproximar las no linealidades locales de cada subsistema bajo fallas del actuador. Para lograr el rendimiento de seguimiento esperado, Zeghlache utiliza el análisis de estabilidad y convergencia de la teoría de Lyapunov para ajustar en línea las leyes adaptativas. Como resultado, se demuestra la estabilidad uniforme y definitiva del sistema quadrotor modificado.

Adeleh Arabzadeh fue otro que vinculo en backstepping con la lógica difusa tipo 2¹⁸⁷, quien desarrollo un muy buen Control de backstep de tipo 2 adaptativo de sistemas no lineales de orden fraccional incierto con zona muerta desconocida, Adeleh considera un nuevo problema de control fraccional difuso de tipo 2 adaptativo con un observador de pseudoestado para sistemas dinámicos de orden fraccional proporcional con no linealidad de entrada de zona muerta en presencia de perturbaciones incompatibles e incertidumbres del modelo; El esquema de control se construye utilizando la técnica de backstepping y adaptativa. Para evitar la complejidad del proceso de diseño de backstepping, se utiliza el control dinámico de la superficie. Además, los sistemas de lógica difusa de intervalo tipo 2 (IT2FLS) se utilizan para aproximar las funciones no lineales desconocidas. Al usar el paso atrás adaptativo fraccional, se construyen leyes de control fraccional; Este método se aplica a una clase de sistemas no lineales de orden fraccional inciertos. Para controlar mejor el rendimiento al reducir el error de seguimiento, el algoritmo PSO se utiliza para ajustar los parámetros del controlador. La estabilidad del sistema está probada por el método Mittag-Leffler. Se muestra que el controlador propuesto garantiza la propiedad de límite para el sistema y también el error de seguimiento puede converger en un pequeño vecindario del origen. La eficiencia del método propuesto se ilustra con ejemplos de simulación. El diagrama de flujo del algoritmo PSO, que especifica el conjunto óptimo de parámetros adaptativos del controlador de backstep difuso, se muestra en la figura 47.

¹⁸⁷ Adeleh Arabzadeh Jafari, Seyed Mohammad, y Ali Mohammadi, "Adaptive type-2 fuzzy backstepping control of uncertain fractional-order nonlinear systems with unknown dead-zone", *Applied Mathematical Modelling*, 69 (2019), 506–32 <<https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.01.002>>.

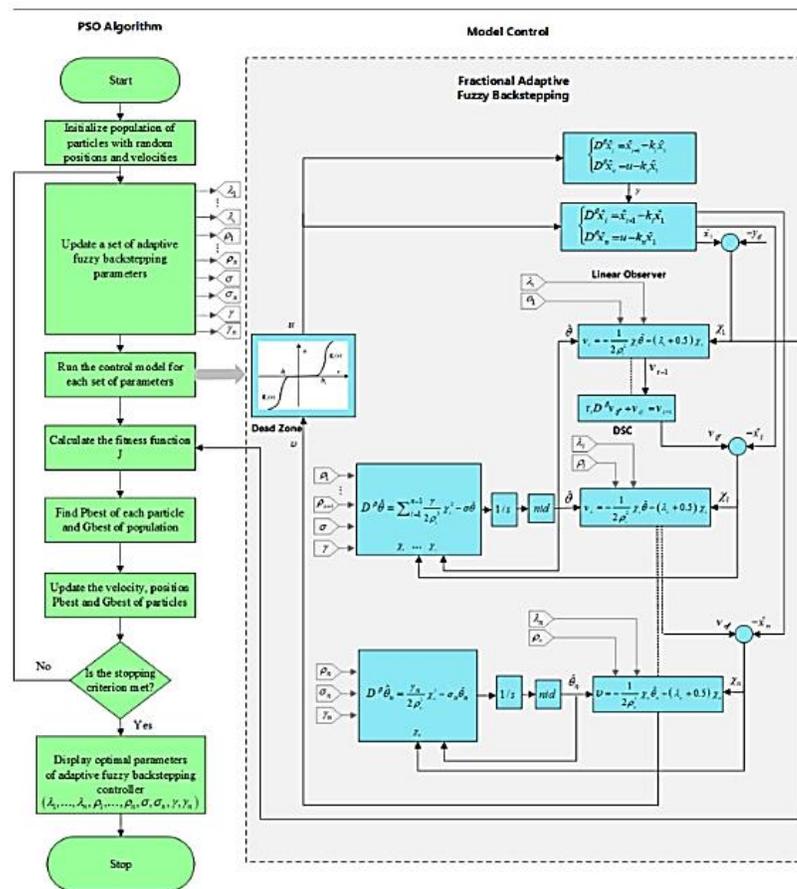


Figura 47 El diagrama de flujo del control de retroceso adaptativo basado en PSO para optimizar los parámetros del controlador ¹⁸⁸

El control de marcha de robots bípedos es otro de los enfoques actuales, en un estado del arte donde se busca que cada vez los robots asemejen más el comportamiento y movimientos del humano, Liang Yang desarrolla un Control de marcha eficiente energéticamente para robots bípedos utilizando sistemas de lógica difusa de intervalo tipo 2 y algoritmo de iteración optimizado, Liang propone un enfoque de eficiencia energética para el control de la marcha de los robots bípedos ¹⁸⁹. Para compensar el error ZMP causado por las incertidumbres del modelo y las perturbaciones externas., diseña un nuevo controlador para caminar. A diferencia

¹⁸⁸ Jafari, Mohammad, y Mohammadi.

¹⁸⁹ Liang Yang, Zhi Liu, y Yong Chen, "Energy efficient walking control for biped robots using interval type-2 fuzzy logic systems and optimized iteration algorithm", *ISA Transactions*, 87 (2019), 143–53 <<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.11.018>>.

de los esquemas de control disponibles actualmente para cancelar el error de ZMP, el recientemente propuesto incorpora adicionalmente un mecanismo de sistemas de lógica difusa (FLS) y un mecanismo iterativo. Al emplear FLS para deducir la corrección del Centro de Masa (CoM) de acuerdo con el error de ZMP y diseñar un mecanismo iterativo para calcular la posición óptima de la articulación, el controlador recientemente propuesto exhibe un excelente rendimiento. Para abordar las dificultades de control que surgen de las limitaciones físicas de los actuadores y la difícil estabilización del robot bípedo, se incluye un algoritmo de control optimizado en el mecanismo iterativo para garantizar la convergencia a la solución óptima. Además, los FLS de intervalo tipo 2 se adoptan para manejar las incertidumbres.

Muchas de las investigaciones de la lógica difusa tipo 2 son aplicadas a procesos de energía renovable, Kanasottu Diseñó e implementó un controlador adaptativo basado en PI-lógica difusa de intervalo tipo 2 para el sistema de energía eólica basado en DFIG ¹⁹⁰. Kanasottu propone un controlador integral de intervalo difuso lógico-proporcional (PI) de intervalo avanzado tipo 2 para los bucles de control de torque y voltaje del convertidor del lado del rotor del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). Las ganancias del controlador PI se determinan y ajustan mediante el método de lógica difusa de intervalo tipo 2 de acuerdo con las condiciones de funcionamiento del sistema. Por lo tanto, la naturaleza adaptativa de la lógica difusa de tipo 2 y la naturaleza robusta del controlador PI finalmente se combinan, lo que muestra un buen estado estable y respuestas dinámicas. El rendimiento del controlador propuesto se evaluó para diferentes condiciones de funcionamiento de DFIG, como fallas graves y caída de voltaje con referencia a la velocidad variable del viento. Se desarrollaron simulaciones en tiempo real para el sistema de energía eólica (WES) basado en DFIG para validar el controlador propuesto utilizando el simulador digital OPAL-RT. El rendimiento del controlador propuesto se examinó mediante un análisis comparativo con su contraparte lógica difusa tradicional de PI. El análisis transitorio de DFIG con intervalo tipo-2 difuso-PI muestra los resultados mejorados sujetos a fallas trifásicas y caída de voltaje según lo deseado por los códigos de la red.

Otra aplicación en el área química fue desarrollada por H. Zhang, quien desarrolló un control robusto adaptativo de la relación de exceso de oxígeno para el sistema de suministro de aire de celda de combustible de membrana de intercambio de

¹⁹⁰ Kanasottu Anil, Chandra Prakash, y Eugene Fernandez, "Electrical Power and Energy Systems Design and implementation of interval type-2 fuzzy logic-PI based adaptive controller for DFIG based wind energy system", *Electrical Power and Energy Systems*, 115.October 2018 (2020), 105468 <<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105468>>.

protones (PEMFC) basado en el sistema de lógica difusa tipo 2 ¹⁹¹, cuyo sistema adopta las características de perturbaciones externas y parámetros inciertos, lo que hace difícil lograr un modelado preciso y un control de estabilidad. Zhang propone un controlador robusto adaptativo basado en sistemas de lógica difusa tipo 2 (T2-FLS) para controlar la relación de exceso de oxígeno (REA) del sistema de suministro de aire PEMFC. El controlador no necesita la dinámica no modelada, que puede ser aproximada por T2-FLS adaptativo cuyos parámetros adaptativos se derivan de acuerdo con la teoría de Lyapunov. El análisis de estabilidad muestra que el error de seguimiento del sistema es el límite final uniforme. Finalmente, la viabilidad y la viabilidad del controlador se validan mediante simulación numérica y experimento de hardware en bucle (HIL).

1.14 Clasificación de los procesos en los que se desarrollaron controladores difusos tipo 2

Los sistemas difusos encuentran hoy en día una gran cantidad de áreas donde pueden ser aplicados, donde muchas de dichas áreas no son necesariamente sistemas de control, para la presente clasificación se tomaron en cuenta solo las investigaciones referenciadas en el capítulo anterior referentes a la implementación del control difuso tipo 2 y no se tendrán en cuenta las investigaciones de implementación de sistemas difusos tipo 2, ya que a pesar de que sus estudios en cuanto al uso de nuevas técnicas que optimizan los resultados y los costes computacionales pudieran ser aplicados de igual forma en el control, para este apartado por ser netamente de revisión no se pretende querer realizar supuestos, siendo esta la razón del porque solo se tendrán en cuenta aquellos métodos aplicados y validados como sistemas de control. Las aplicaciones donde se hace uso de los sistemas difusos para llevar a cabo un control, se derivan en aquellas que implementan para ello un sistema difuso tipo 1 y aquellas que implementan un sistema difuso tipo 2, donde regularmente la implementación de sistemas difusos tipo 2 es utilizada para estrategias de control de procesos de comportamiento complejo, es decir, en su mayoría procesos no lineales, sin embargo, si se encuentran aplicaciones a procesos lineales mucho más simples, donde el énfasis de dicha aplicación busca mejorar el rendimiento en comparación al control de dicho proceso implementando un

¹⁹¹ H K Zhang et al., "Adaptive robust control of oxygen excess ratio for PEMFC system based on type-2 fuzzy logic system", *Information Sciences*, 511 (2020), 1–17
<<https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.08.005>>.

sistema difuso tipo 1, lo que señala la primera clasificación, clasificando así a dichos procesos en lineales y no lineales. Otra manera en la que se pueden clasificar los procesos es según la metería, teniendo aquellos procesos físicos, químicos y biológicos. También se pueden clasificar los procesos en que se desarrollan los controladores difusos tipo 2 según su área de aplicación, teniendo áreas de aplicaciones en la salud, la robótica, la química, la industria petrolera, la industria de la energía orientadas a procesos específicos en dichas industrias, vehículos terrestres eléctricos, vehículos de vuelo no tripulados así como también se tienen aquellos procesos que se pueden llevar a cabo en diferentes diciplinas como el control de motores, control de nivel, control de temperatura, control de péndulo, entre otros.

Tabla 14 clasificación de los procesos donde se desarrollan controladores difusos tipo II.

Autor	Referencia	Clasificación			
		Lineal (L) / No Lineal (NL)	Materia	Área de aplicación	Aplicación específica
A. Diaz	¹⁹²	L/NL	Físico	multidisciplinaria	Control de nivel y flujo
R. F. Martínez	¹⁹³	L/NL	Físico	multidisciplinaria	Control de servomecanismo
A. Abbadi	¹⁹⁴	L/NL	Físico	multidisciplinaria	Control de voltaje
W. Yu y H. Chen	¹⁹⁵	NL	Físico	multidisciplinaria	Control de motor DC
S. Fartash	¹⁹⁶	NL	Físico	Robótica	Control de seguimiento de posición de un robot paralelo.
M. A. Sánchez	¹⁹⁷	NL	Físico	Robótica	Control de robot móvil
H. Li	¹⁹⁸	NL	Físico	Multidisciplinaria	Control de péndulo invertido
F. Ruvalcab		NL	Físico	Multidisciplinaria	Control carro

¹⁹² Diaz et al.

¹⁹³ Martínez et al.

¹⁹⁴ Abbadi, Nezli, y Boukhetala.

¹⁹⁵ Yu y Chen.

¹⁹⁶ Fartash, Akbarzadeh, y Akbarzadeh.

¹⁹⁷ Sanchez, Castillo, y Castro.

¹⁹⁸ Li et al.

a y M. Llama	199				péndulo
F. Doctor	200	NL	Físico	Salud	Control de regulador de anestesia
S. K. Raju	201	NL	Físico	Generación de energía	Control vectorial de generador eólico
M. Hassan	202	NL	Físico	Vehículos eléctricos	Control de frecuencia de carga
E. R. M. Medina	203	NL	Físico	Multidisciplinaria	Control de motor
C. Zhang	204	NL	Físico	industria petrolera, multidisciplinaria	Control de seguimiento de trayectoria
S. Xie, Y. Xie	205	L/NL	Química	multidisciplinaria	Control de composición
E. Kelekci y S. Kizir	206	NL	Físico	Robótica	Control de trayectoria y vibración de manipulador articular
S. Zeghlache	207	NL	Físico	Vehículos Aéreo no tripulados (UAV)	Control de altitud y posición de cuadrotor
A. A. Jafari	208	NL	Físico	Multidisciplinaria	Control de sistemas no lineales de orden fraccional incierto con zona muerta desconocida
L. Yang	209	NL	Físico	Robótica	Control de marcha de robot bípedo

¹⁹⁹ Ruvalcaba y Llama.

²⁰⁰ Doctor et al.

²⁰¹ Raju y Pillai.

²⁰² Hassan, Niknam, y Blaabjerg.

²⁰³ Medina et al.

²⁰⁴ Chi Zhang et al.

²⁰⁵ Xie et al.

²⁰⁶ Kelekci y Kizir.

²⁰⁷ Zeghlache et al.

²⁰⁸ Jafari, Mohammad, y Mohammadi.

²⁰⁹ Yang, Liu, y Chen.

K. Anil	²¹⁰	NL	Físico	Generación de energía (eólica)	Control de torque y voltaje de convertidor de generador de inducción
H. K. Zhang	²¹¹	L/NL	Química	multidisciplinaria	Control Relacional de composición

Fuente: Autor

²¹⁰ Anil, Prakash, y Fernandez.

²¹¹ H K Zhang et al.

CAPITULO II. Diseño de las fases de la metodología para el desarrollo de controladores difusos tipo 2.

En el capítulo anterior se definieron los sistemas difusos tipo 2 y el diseño de controladores difusos tipo 2, en dicho capítulo se dieron a conocer de manera explícita dentro de todo su contenido la mayoría de las consideraciones necesarias a tener en cuenta en el diseño de los mismos, así como también se introdujo previamente al tema todo lo referido a la lógica difusa tipo 1, ya que la tipo 2 no es más que una recopilación de conjuntos tipo 1 y que el modelo de inferencia de ambos solo difiere en la reducción de tipo que es particular únicamente del sistema tipo 2, teniendo así que muchas de las consideraciones del tipo 1 pueden ser de mucha ayuda en el diseño del tipo 2. En el presente capítulo se diseñan las fases de la metodología para el desarrollo de controladores difusos tipo 2, donde dicha metodología pretende poder ser implementada en la mayoría de los procesos, y no busca obtener el mejor de los controladores difusos tipo 2, el cual puede ser diseñado paso a paso por un experto en control difuso tipo 2 conociendo el proceso a fondo y todas las incertidumbres del mismo, el fin de este capítulo es desarrollar una metodología que dé como resultado un controlador que supere a un controlador clásico y un controlador difuso tipo 1, al mismo tiempo que sea de fácil aplicación por aquellos principiantes en la aplicación de la lógica difusa tipo 2 que deseen adentrarse en el uso de la misma de forma práctica. Para ello se definen las fases contempladas para el desarrollo de la metodología a partir de las concepciones desarrolladas en el capítulo anterior, donde dichas fases no son más que las etapas que comprenden el desarrollo de un sistema difuso tipo 2 y la realización de un controlador a partir de dicho sistema. En el desarrollo de las diferentes fases planteadas se hace un estudio para determinar cuál es el método a realizar en cada fase, de manera que generalmente se obtengan buenos resultados, y funcionen para desarrollar controladores difusos tipo 2 que se puedan implementar sobre cualquier proceso. Se tienen en cuenta las recomendaciones de Wu y Mendel ²¹², autores los cuales son considerados entre los principales investigadores de la aplicación de la lógica difusa tipo 2 en sistemas de control, a la vez que sus recomendaciones se encuentran en un completo estado del arte. Así como también se sugieren otros criterios los cuales se consideran importantes para definir cuales métodos o técnicas son las más apropiadas para llevar a cabo un control difuso tipo 2 sobre un proceso. Posteriormente habiendo establecido los métodos y formas se procede a describir un procedimiento para dar cumplimiento a dicha metodología.

²¹² Dongrui Wu y Mendel.

2.1 Definición de las fases contempladas para el desarrollo de la metodología.

Un controlador difuso no es más que un sistema difuso general, donde sus entradas contienen información implícita retroalimentada del proceso el cual es controlado. Es por ello que las fases para el desarrollo de la presente metodología no son otras que las fases de un sistema difuso tipo 2, anexando además las fases requeridas para que dichas entradas mencionadas anteriormente contengan la información necesaria que de los mejores resultados y aquellas para que la salida del sistema pueda interactuar con el proceso a controlar.

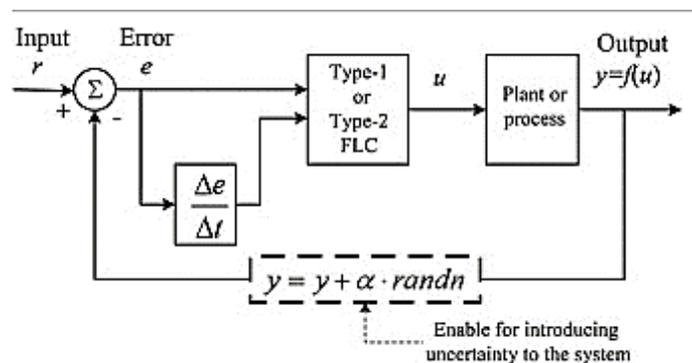


Figura 48 diagrama de bloques de sistema de control difuso tipo 1 y tipo 2 genérico ²¹³

En un sistema difuso tipo 2 al principio, la señal de entrada nítida se convierte en entrada difusa con la ayuda de varias funciones de membresía. Se forma un conjunto de reglas para mapear la entrada con la salida juntas, conocida como mecanismo de inferencia. Los conjuntos de salida de tipo 2 no se pueden usar directamente para convertir a un valor nítido debido a limitaciones computacionales. Por esta razón, los conjuntos de tipo 2 se convierten en conjuntos de tipo 1, lo que se conoce como operación de reducción de tipo, luego los conjuntos de tipo reducido se convierten de nuevo a un valor nítido utilizando diversas técnicas de defuzzificación.

²¹³ Castillo y Melin.

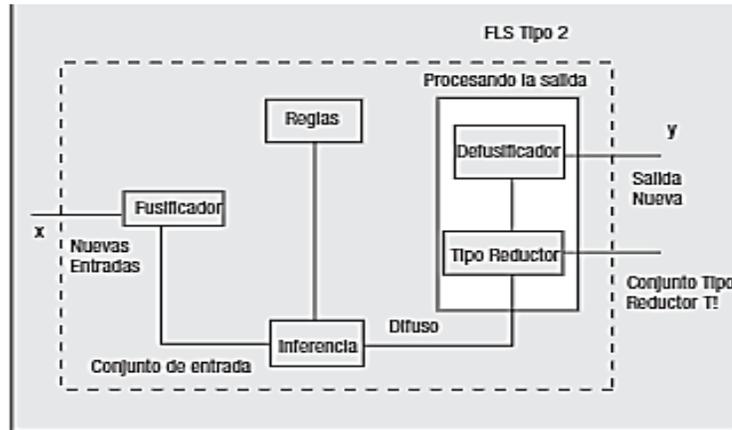


Figura 49 etapas de un sistema difuso tipo 2 ²¹⁴

2.1.1 Fases contempladas en el desarrollo del sistema difuso tipo 2:

1. Establecimiento de las condiciones y requerimientos
2. Fusificación: La señal de entrada nítida se convierte en entrada difusa con la ayuda de varias funciones de membresía.
3. Inferencia: Se forma un conjunto de reglas para mapear la entrada con la salida juntas, conocida como mecanismo de inferencia
4. Reducción de tipo: Los conjuntos de tipo 2 se convierten en conjuntos de tipo 1, lo que se conoce como operación de reducción de tipo.
5. Defusificación: Los conjuntos de tipo reducido se convierten de nuevo a un valor nítido utilizando diversas técnicas de defuzzificación.
6. Puesta en marcha

2.1.2 Pasos llevados a cabo para el desarrollo del controlador difuso tipo 2:

- i. Estudio del comportamiento del proceso a controlar.
- ii. Evaluación de la necesidad de un controlador lógico difuso.

²¹⁴ Castillo y Melin.

- iii. Elección del tipo de sistema difuso tipo 2, generalizado o de intervalo.
- iv. Definición del tipo de controlador según el proceso a controlar
- v. Definición de las entradas y salidas
- vi. Dimensionamiento del controlador mediante el rango de las variables de entrada y salida.
- vii. Establecimiento de la cantidad de funciones de membresía.
- viii. Elección del tipo de funciones de membresía.
- ix. Definición de la huella de incertidumbre
- x. Definición de la base de reglas
- xi. Elección del método de inferencia
- xii. Establecimiento del método de reducción de tipo y fusificación.
- xiii. Puesta en marcha del sistema.
- xiv. Análisis de rendimiento
- xv. Ajuste de los parámetros de ser necesario.
- xvi. Ampliación del rango de operación

2.2 Desarrollo de las diferentes fases planteadas para el desarrollo de la metodología.

Para el desarrollo de las diferentes fases planteadas anteriormente, se hace un estudio con el cual se determina el procedimiento llevado a cabo en cada uno de los pasos de la metodología. Dicho estudio está fundamentado en base a los criterios de Wu y Mendel ²¹⁵ y a otros criterios que surgen tras toda la revisión realizada en el capítulo anterior en el diseño de controladores difusos tipo 2. Donde

²¹⁵ Dongrui Wu y Mendel.

a partir de dichos criterios se analizan cuales procedimientos han sido los más implementados en la aplicación del control difuso tipo 2 a procesos, de modo que se logre obtener una metodología que, de buenos resultados basada en la extracción de los métodos y procedimientos más comunes utilizados hoy en día, que a su vez proporcionen de un mecanismo de fácil aplicación, que pueda ser utilizado por principiantes en la aplicación de dicho control difuso tipo 2.

Wu y Mendel establecen que se deben responder las siguientes interrogantes: ¿Se debe usar un fuzzificador singleton o no singleton? ¿Cuántas MF deben usarse para cada entrada? ¿Deben usarse MF lineales gaussianos o por partes? ¿Se debe utilizar la inferencia Mamdani o Takagi-Sugeno-Kang (TSK)? ¿Se debe utilizar mínimo o producto-Norma? ¿Debe el procesamiento de salida incluir reducción de tipo? Si se utiliza la reducción de tipo, ¿qué método se debe elegir? ¿Cómo optimizar el sistema difuso IT2?

Y en este documento tras todo el estudio realizado, además de los criterios de Wu y Mendel, se establece que también es importante tener en cuenta: ¿se debe implementar un sistema difuso tipo 2 de intervalo (IT2) o generalizado (GT2)? ¿Cuál debe ser el número de reglas? ¿Cuántas entradas? ¿Quiénes deben ser las entradas? ¿Cuántas salidas? ¿de cuánto debe ser la huella de incertidumbre? ¿si utiliza reducción de tipo, que método usar para el cálculo del centroide? ¿Qué método usar para defuzzificar luego de obtener el centroide? ¿se debe realizar un análisis de rendimiento? ¿si se analiza el rendimiento, cuál debe ser el criterio? ¿se debe hacer un estudio de estabilidad por Lyapunov? ¿bajo qué tipo de controlador se debe basar el diseño del controlador difuso tipo 2?

A continuación, se presenta una revisión que expone los procedimientos utilizados por los autores de las 20 investigaciones que desarrollan controladores difusos tipo 2 y lo implementan en algún proceso citadas en el capítulo anterior, en respuesta a los criterios de Wu y Mendel y los propuestos en esta investigación.

Según Wu y Mendel:

Tabla 15 Estudio de Criterios importantes a tener en cuenta según Wu y Mendel en referencias citadas.

REF	Fuzzificador singleton/ No singleton	# MF	Tipo MF	Inferencia Mamdani /TSK	Mínimo producto /Producto Norma	Con reductor/ Sin reductor	Tipo de reductor	Si Optimiza/No optimiza	Como Optimiza
216	No indica	Entradas: 5 Salida: 5	Entrada: Gaussianas Salida: 2 trapezoidales y 3 triangulares	Mamdani	No indica	Con Reductor	De centros (COS)	Si optimiza	Redes neuronales
217	No indica	Entradas:2 Salida:3	Entrada: trapezoidales Salida: 2 trapezoidales y 1 triangular	Mamdani	No indica	Se utiliza el Toolbox desarrollado en (Castro, Castillo, Melin, Martínez, Escobar y Camacho,2007)	Se utiliza el Toolbox desarrollado en (Castro, Castillo, Melin, Martínez, Escobar y Camacho,2007)	No	-----
218	Todo el desarrollo es matemático y matricial	2	triangulares	T-S	Producto	Sin reductor	No aplica	No	-----
219	Singleton	4	gaussianas	-----	Producto	Con reductor	$f'_{j_{in}} = \frac{1}{2}(f'_{j_{in}} + f'_{j_{in}})$ $f'_{j_{ou}} = \frac{1}{2}(f'_{j_{ou}} + f'_{j_{ou}}), i = 1,2$	No	-----

²¹⁶ Diaz et al.

²¹⁷ Martínez et al.

²¹⁸ Abbadi, Nezli, y Boukhetala.

²¹⁹ Yu y Chen.

220	No Singleton	3	Gaussianas con media incierta y desviación estándar fija	TSK	Mínimo	Con Reductor	$y_0 = \frac{p \sum_{i=1}^m \bar{f}_i y_i}{\sum_{i=1}^m \bar{f}_i} + \frac{q \sum_{i=1}^m \bar{f}_i y_i}{\sum_{i=1}^m \bar{f}_i}$	Si optimiza, número de reglas y parámetros	Redes neuronales
221	No Singleton	3	Negativo y positivo: trapezoidal Cero: triangular	TSK	No indica	Con reductor	COS	No	-----
222	No singleton	4	Definidas por 1-e^- parámetro	T-S	Mínimo	Sin R	-----	No	-----
223	singleton	5	Salida: singleton	-----	Producto	Con reductor	TR	No	-----
224	Singleton	Entrada: 7 Salida: 4	triangulares	-----	Mínimo	Con R	COS	No	-----
225	No singleton	7	gaussianas	-----	Mínimo	Con R	De altura	No	-----
226	Singleton	6	Triangulares Salida: 5 singleton	Mamdani	Mínimo	Con R	COS	Si	algoritmo Harmony Search (HS)

²²⁰ Fartash, Akbarzadeh, y Akbarzadeh.

²²¹ Sanchez, Castillo, y Castro.

²²² Li et al.

²²³ Ruvalcaba y Llama.

²²⁴ Doctor et al.

²²⁵ Raju y Pillai.

²²⁶ Hassan, Niknam, y Blaabjerg.

227	singleton	3	Entrada: 2 trapezoidales y 1 triangular Salida: 7 singleton	mamdani	Mínimo	Con R	COS	No	-----
228	No singleton	7	Triangulo	TSK	Mínimo	Con R	COS	No	-----
229	Singleton	2	Entrada: se cruzan como una X Salida: singleton	TSK	Producto	Con R	COS	Si	Enjambre de partículas
230	No singleton	7	Triangulares	Mamdani	Producto	Con R	COS	No	-----
231	No singleton	6	Gaussianas	TSK	Mínimo	Con R	COS	No	-----
232	singleton	3	singleton	TSK	Mínimo	Con R	COS	No	-----
233	No singleton	1era entrada: 5 2da entrada: 7 Salida: 7	Gaussianas Con desviación estándar fija y medias inciertas	Mamdani	Producto	Con R	COS	Si	Algoritmo iterativo propuesto por el autor

²²⁷ Medina et al.

²²⁸ Chi Zhang et al.

²²⁹ Xie et al.

²³⁰ Kelekci y Kizir.

²³¹ Zeghlache et al.

²³² Jafari, Mohammad, y Mohammadi.

²³³ Yang, Liu, y Chen.

234	No singleton	5	triangulares	No indica	Mínimo	Con R	De altura	No	-----
235	Singleton	9	gaussianas	TSK	Producto	Con R	COS	No	-----

Fuente: autor

²³⁴ Anil, Prakash, y Fernandez.

²³⁵ H K Zhang et al.

Según autor:

Tabla 16 Estudio de Criterios importantes a tener en cuenta para el diseño de un controlador difuso tipo según autor no contemplados por Wu y Mendel en referencias citadas.

RE F	IT2/ GT 2	# reglas	Entradas	# salidas	FOU (huella de incertidumbre)	Si utiliza reducción de tipo. Método para el cálculo del centroide	Defusificación	Análisis rendimiento	Estudio de estabilidad por Lyapunov	Tipo de controlador
236	IT2	25	Error/ Delta error	1	No indica	KM	Promedio de L y R	ISE, IAE, ITAE, EFC	No	PD
237		4	Error/ Delta error	1	1	No indica	No indica	IAE, ISE	Si	PD
238	IT2	4	2 funciones linealmente independientes	1	No indica	matemático	matemático	ITAE, IAE	Si	IT2 T – S FLCS
239	IT2	9	3	1	0.5	Matemático	$f_{f_{2n}}^t = \frac{1}{2} (\bar{f}_{f_{2n}}^t + \underline{f}_{f_{2n}}^t)$ $f_{f_{2i}}^t = \frac{1}{2} (\bar{f}_{f_{2i}}^t + \underline{f}_{f_{2i}}^t), i = 1, 2$	SAE, STAE, SSE, STSE, MSE, SAC	Si	Adaptativo
240	IT2	5	3 e/d3/ie	1	Inicialmente 0.8, debe ser ajustado	Matemático	$y_0 = \frac{p \sum_{i=1}^m \bar{f}_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{f}_i} + \frac{q \sum_{i=1}^m \underline{f}_i \underline{y}_i}{\sum_{i=1}^m \underline{f}_i}$	MSE	No	Neuro difuso PID,

²³⁶ Diaz et al.

²³⁷ Martínez et al.

²³⁸ Abbadi, Nezli, y Boukhetala.

²³⁹ Yu y Chen.

²⁴⁰ Fartash, Akbarzadeh, y Akbarzadeh.

241	GT 2	9	2 Error v y w	2	cubre la ligera diferencia entre ev y ew (ambas salidas)	Matemático	Matemática	ITAE, ITSE, IAE', ISE	No	Proporcional
242	IT2	4	2	1	0.5	Matemático	Matemática	No aplica	Si	Retroalimentación de estados
243	IT2	No indica	Error/ Delta error	1	0.2	EIASC	Producida en la reducción de tipo	No aplica	No	Linealización exacta
244	IT2	28	4: (Error/integral del error) x2 variables	2	Las FOU generadas modela incertidumbres numéricas derivadas de datos realistas que afectan la entrada y las salidas $cv_{\theta}^{(i)} = \frac{std_{\theta}^{(i)}}{av_{\theta}^{(i)}} \times 100$	EIASC	Tipo centroide: (yl+yr)/2	SSE, OS, US	No	Adaptativo. Modifica las reglas
245	IT2	49	4: (Error/delta error) x2 variables	2	No indica	No indica	Tipo centroide: (yl+yr)/2	No aplica	No	PD por cada variable
246	GT 2	18	Error/ Integral del error	1	No indica	KM	Tipo centroide: $\frac{\sum_{\alpha} \alpha (yl+yr)/2}{\sum_{\alpha} \alpha}$	No aplica	No	PI. Se aplica IT2 para cada uno de los planos

²⁴¹ Sanchez, Castillo, y Castro.

²⁴² Li et al.

²⁴³ Ruvalcaba y Llama.

²⁴⁴ Doctor et al.

²⁴⁵ Raju y Pillai.

²⁴⁶ Hassan, Niknam, y Blaabjerg.

										alfa, de 5 a 10 planos.
247	IT2	9	Error/ Delta error	1	Error=1 de un rango de -4 a 4 Delta error=0.01 de un rango de -6 a 6	EKM	Tipo centroide: (yl+yr)/2	ISE, IAE e ITAE	No	PD
248	IT2	49	Error/ Delta error	1	0.5 bases del triángulo y 0.0 punta del triángulo De un rango de -6 a 6	KM	Tipo centroide: (yl+yr)/2	No aplica	No	PD
249	IT2	16 por entrada	4	1	0.2 De un rango de -1 a 1	KM	Tipo centroide: (yl+yr)/2	RMSE	No	IT2FLC
250	IT2	49	Error/ Delta error	1	0.9	KM	Tipo centroide: (yl+yr)/2	RMSE MSE MAE	Si	PD
251	IT2	4	4	1	No indica	KM	Tipo centroide: (yl+yr)/2	No aplica	Si	Adaptativo
252	IT2	4	No indica	No indica	No indica	KM	Tipo centroide: (yl+yr)/2	ITAE	Si	Adaptativo PSO

²⁴⁷ Medina et al.

²⁴⁸ Chi Zhang et al.

²⁴⁹ Xie et al.

²⁵⁰ Kelekci y Kizir.

²⁵¹ Zeglache et al.

²⁵² Jafari, Mohammad, y Mohammadi.

253	IT2	35	2	1	<p>1era: desviación: 0.2 Medias inciertas: {[-1.15,-1.1],[-0.6-0.35],0.035}, {0.55,0.6},{1.1,1.15}</p> <p>2da: desviación: 0.1 Medias inciertas: {[-0.16,-0.14],[0.16,0.18],[0.35,0.35]}, {0.35,0.35},{0.75,0.75},{0.95,0.95},{1.15,1.15}</p>	KM	Tipo centroide: (yl+yr)/2	RMS	No	IT2FLC Optimo
254	IT2	25 para cada salida	Error/ cambio de error	3	0.2	-----	Tipo centroide: (yl+yr)/2	ISE ITAE	No	PI
255	IT2	9	6	1	-----	KM	Promedio de L y R	RMSE	Si	Adaptativo

Fuente: autor

²⁵³ Yang, Liu, y Chen.

²⁵⁴ Anil, Prakash, y Fernandez.

²⁵⁵ H K Zhang et al.

Estableciendo los siguientes métodos para cada uno de los pasos:

i. Estudio del comportamiento del proceso a controlar.

Establecer el tipo de proceso a controlar, si es lineal, no lineal, variante o invariante en el tiempo, estudiar su observabilidad, determinar las variables que intervienen en dicho proceso, la o las variables que se desean controlar, la o las variables a manipular, establecer un diseño del experimento, realizar el modelamiento del mismo, estudiar su convergencia, determinar si es un sistema de rápida convergencia o de lenta convergencia, establecer rango de trabajo del controlador y prestaciones que debe tener el mismo.

ii. Evaluación de la necesidad de un controlador lógico difuso.

Determinar si variables del proceso poseen cierto grado de incertidumbre, y si manejar dicha incertidumbre es lo suficientemente influyente en el proceso, de manera que la inclusión de la misma mejore el control sobre el sistema.

Determinantes:

- Si existe la necesidad de un control lógico difuso proseguir al siguiente paso.
- Si no existe la necesidad de implementar un control lógico difuso se sugiere implementar un controlador clásico y dar fin a esta metodología.

iii. Elección del tipo de sistema difuso tipo 2, generalizado o de intervalo.

Se sugiere la utilización de un sistema difuso tipo 2 de intervalo, en base al resultado de la tabla 16, así como también a que dicho sistema es computacionalmente mucho más óptimo que el de tipo generalizado, con resultados que ofrecen menos rendimiento que el generalizado pero lo suficientemente buenos para el resultado que se desea obtener.

iv. Definición del tipo de controlador según el proceso a controlar.

Se sugiere implementar un control difuso tipo 2 basado en un controlador PD en el caso de los procesos de rápida convergencia y un control difuso tipo 2 basado en un controlador PI o PD en aquellos

procesos que cuenten con una convergencia lenta. Fundamentando además que la mayoría de los procesos controlados en la tabla 16 fueron basados en controladores del tipo PD.

v. Definición de las entradas y salidas

Teniendo en cuenta en todo momento el significado de las entradas y su efecto en la salida se sugiere como máximo establecer 3 entradas para el sistema y una salida, donde las entradas serán el error, la variación del error y la acumulación del error, o como mínimo una cantidad de 2 entradas, las cuales podrán ser el error y la variación del error o el error y la acumulación del error. Dichas circunstancias dependen del tipo de controlador seleccionado en el paso anterior.

vi. Dimensionamiento del controlador mediante el rango de las variables de entrada y salida.

Se establece el rango de las variables de entrada y de salida, pesando dichas variables. Para dimensionar las variables de entrada se debe sintonizar un controlador clásico del tipo seleccionado y simular el mismo, extrayendo de dicha simulación el valor máximo del error obtenido, el valor nominal de la variación del error fuera de las condiciones de arranque y la máxima acumulación de dicho error. Dichos valores pesados serán el rango de las variables de entrada, partiendo del valor negativo del valor obtenido hasta el valor positivo del mismo. Para dimensionar la variable de salida, se debe establecer el rango de la variable manipulada, siendo generalmente el rango de operación del elemento final de control o su equivalencia en el caso de que dicha variable se encuentre acondicionada.

vii. Establecimiento de la cantidad de funciones de membresía.

Se elige el número de funciones de tal manera que se representen todos los estados que la variable pueda tomar. Se sugiere utilizar 7 funciones de membresía para cada variable lingüística (de entrada, o salida)

viii. Elección del tipo de funciones de membresía.

Se diseñan de un ancho mínimo suficiente que permita obviar el ruido de la medición, se establece un cierto grado de cruzamiento entre las distintas funciones, para no incurrir en estados pobremente definidos

y se recomienda partir con funciones simétricas, para posteriormente realizar ajustes, más precisamente se sugiere usar funciones del tipo gaussianas para las entradas y singleton para la salida.

- ix. Definición de la huella de incertidumbre.

Inicialmente 0.5, debe ser ajustada de tal manera que se modelen las incertidumbres numéricas derivadas de datos realistas que afectan las entradas y la salida.

- x. Definición de la base de reglas

Establecer máximo 25 reglas

- xi. Elección del método de inferencia

Implementar reglas TSK simples y Producto T-norma

- xii. Establecimiento del método de reducción de tipo y fusificación.

Implementar la reducción de tipo de centros (COS), mediante la utilización del algoritmo KM, para posteriormente defusificar mediante el método de tipo centroide $\frac{(y_l + y_r)}{2}$.

- xiii. Puesta en marcha del sistema.

- xiv. Análisis de rendimiento

Analizar el rendimiento mediante mínimo uno de los siguientes indicadores: ISE, IAE, ITAE, EFC, SAE, STAE, SSE, STSE, MSE, SAC, RMSE y MAE

- xv. Ajuste de los parámetros de ser necesario.

Debido a que la metodología planteada expone una garantía de control con resultados aceptables, pero se espera que los mismos no sean los mejores en comparación con los que pudiese obtener un experto en la implementación del control difuso tipo 2, se sugiera

ajustar los parámetros en base a los requerimientos y prestaciones que debe poseer el control según se hayan definido en el paso i.

Determinantes:

- Si tras analizar la respuesta del sistema en base a los requerimientos prestaciones que debe poseer el control, se concluye que los resultados son aceptables y no se requiere un reajuste de los parámetros se debe continuar al paso **xvii** sin realizar modificaciones.
- Si la persona que implementa la metodología comprende la teoría de la lógica difusa tipo 2 al 100% se propone reajustar los parámetros de diseño de los pasos del **vii** al **xi** y repetir los pasos **xi** al **xv** hasta obtener un resultado con un error en estado estable mínimo y el mejor tiempo de respuesta el cual se puede analizar según los resultados del paso **xiv**.
- Si la persona que implementa la metodología NO comprende la teoría de la lógica difusa tipo 2 al 100% se aconseja que el implementador haga uso de ganancias a las entradas y salidas del sistema difuso tipo 2 con valores dados a prueba y error hasta obtener un resultado aceptable.

xvii. Ampliación del rango de operación

Luego de validar el funcionamiento correcto del controlador diseñado en el punto para el cual fue dimensionado se debe proceder a ampliar su rango de funcionamiento haciendo uso de ganancias a las entradas y salida, caracterizando una ecuación parametrizada por valores de las ganancias para cada S_p dentro del rango de operación.

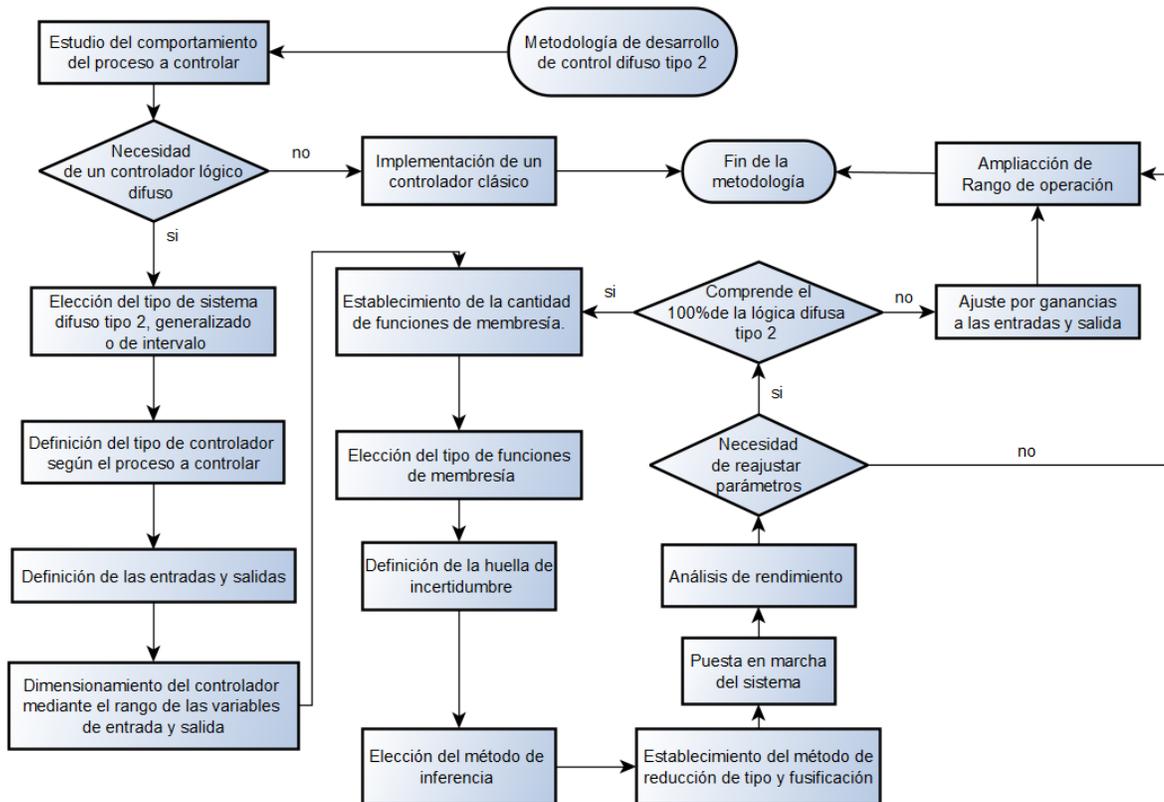


Figura 50 Metodología propuesta por el autor

Notas Aclaratorias:

- Una vez ejecutada la metodología en caso de variación de la dinámica del proceso, a pesar de tener huella de incertidumbre puede existir un corrimiento en las prestaciones y rendimiento del controlador, anterior puede ocurrir en condiciones donde se cambien elementos del proceso, o el proceso este en falla.
- En caso de un cambio drástico de la dinámica del proceso se requiere aplicar nuevamente la metodología desde el paso i.

2.3 Diseño del experimento

“El diseño de experimentos se define como un conjunto de técnicas activas que manipulan un proceso para inducirlo a proporcionar la información que se requiere para mejorarlo mediante los cambios en sus variables y su interacción o secuencia de ejecución” ²⁵⁶. Al realizar pruebas controladas y relacionadas con el proceso, así como establecer un método en la secuencia de aplicación se pueden obtener datos que estadísticamente pueden proporcionar conclusiones comprobables del proceso o sistema.

El diseño de experimentos es precisamente la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso. En este caso el diseño de la metodología para la implementación de controladores difusos tipo 2 en procesos industriales se basó en un estudio descriptivo experimental, ya que la metodología se desarrolla en base a un análisis investigativo, del cual se extraen los métodos y procedimientos el desarrollo de la misma, pero los resultados de dicho desarrollo son validados de manera experimental.

En tal sentido, la validación parte de un diseño de experimento en el cual se define el proceso a controlar, se modela el mismo, para lo cual se debe establecer un paso a paso para la captura de las datas del proceso, se determinan las condiciones iniciales, finales y de los escalones que existan el sistema. También es importante que en el diseño del experimento se realicen los diferentes escalamientos entre tipos de señales y datos o sus rebatimientos. A su vez se definen las variables a manipular y controlar y se determinan la cantidad de repeticiones del experimento.

En cuanto a las repeticiones del experimento mencionadas anteriormente, o también conocidas como la muestra del experimento, en esta investigación son determinadas por intervalo de confianza. Cabe destacar que en este tipo de experimentos es indispensable definir el intervalo de muestreo, el cual es el tiempo que existe entre dato y dato tomado.

Una vez tomada la muestra, se procede a identificar el sistema, lo cual se realiza bajo diferentes técnicas de identificación paramétrica, o de caja negra, seleccionando la mejor bajo diferentes criterios definidos por los márgenes de

²⁵⁶ SPC Consulting Group Copyright, “Diseño de Experimentos - DOE | SPC Consulting Group”, 2020 <<https://spcgroup.com.mx/doe/>> [consultado 19 noviembre 2020].

respuesta y validaciones estadísticas realizadas tras comparar la respuesta ante un escalón del modelo matemático con la respuesta del modelo real.

Definido el modelo se procede a implementar la metodología desarrollada sobre el mismo, y sobre el proceso real, y los resultados son comparados bajo diferentes indicadores estadísticos, como la desviación estándar, desviación promedio, márgenes de error, etc., en perspectiva a los resultados obtenidos con una estrategia de control clásica.

CAPITULO III. Implementación la metodología desarrollada para controladores difusos tipo II.

En el capítulo anterior se estableció la metodología para llevar a cabo la implementación de un controlador lógico difuso tipo 2, en este capítulo se desarrolla dicha metodología haciendo uso de una planta de control de nivel de agua de un tanque. En esta planta la variable a controlar se obtiene de forma indirecta siendo calculada por medio del censado de la variable peso, la adquisición de datos se realiza a través de un microcontrolador basado en el ATmega 2560 y la acción de control de control se emite desde el microcontrolador en conjunto con un driver de potencia hacia el elemento final de control en este caso una bomba DC 12 voltios.

Definida la arquitectura de la planta se ejecuta la metodología la cual inicia con estudio del comportamiento del proceso a controlar donde se tuvo en cuenta factores como la linealidad, su convergencia, la variabilidad en el tiempo, las variables que intervienen y se desarrolló el modelado del sistema haciendo uso de la identificación paramétrica. Acto seguido se realiza la evaluación de las necesidades de un controlador lógico difuso, la elección del tipo sistema difuso tipo 2, la definición del tipo de controlador con sus respectivas entradas y salidas, el dimensionamiento del controlador, el número y tipo de funciones de membrecía, la definición de la huella de incertidumbre y las reglas difusas, realizar la elección del método de inferencia y por ultimo establecer el método de reducción de tipo y fusificación para así llevar a cabo la respectiva puesta en marcha del sistema.

En base a la puesta en marcha del sistema se hace una valoración del mismo por medio de un análisis de rendimiento y se ejecutan ajustes de ser necesario. Ejecutado esto se hace la ampliación de rango de control y se finaliza con el análisis de los resultados.

3.1 Desarrollo de la metodología

3.1.1 Estudio del comportamiento del proceso a controlar.

El sistema se fundamenta a partir de una planta piloto que tiene como fin realizar el control de nivel en 1 de sus tanques, mientras el otro tanque solo cumple la función de depósito del líquido, para realizar dicho control un actuador regulado por señales PWM transporta el líquido del depósito al tanque de nivel, donde dicho nivel es

censado y enviado al controlador para determinar el error entre el valor requerido y el valor actual de la planta, el controlador determina la variación de PWM necesaria para alcanzar el nivel requerido y envía este nuevo PWM al actuador, realizando este proceso repetidamente logrando así mantenerse en el nivel requerido.

Para ver la selección de la instrumentación de la planta ver **anexo A**

Para ver el acondicionamiento de las señales ver **anexo B**

3.1.1.1 Modelado del sistema

En función de simplificar el proceso de modelado y no incurrir en complejidades matemáticas se optó por utilizar el modelado paramétrico. Este modelo consiste en tratar el proceso como una caja negra de la cual solo se conoce su respuesta cuando se aplica una entrada de excitación y en base a estos dos parámetros se aplican algunos métodos de autores resaltados y se hace la respectiva comparación entre cada uno buscando elegir al más cercano a la respuesta del sistema en cuestión. Todo lo anterior fue realizado en base a un diseño de experimento, conformado por:

- Paso a paso de la captura de datos del proceso,

El proceso de captura de la data se hará con base a los porcentajes requeridos, donde el 70% de dicha toma de datos será usado para realizar la identificación del proceso y obtener la función de transferencia de dicho sistema mediante los diferentes métodos presentados por distintos autores; el 30% restante de la data se destinará a la validación de las funciones de transferencia obtenidas en el paso anterior.

Para adquirir la data mediante la placa de procesamiento Arduino Mega, recopilada por el sensor de nivel y modificada por el actuador bomba eléctrica de corriente continua, los cuales componen como tal lo que es la planta, se requiere realizar un escalamiento y estandarización de las señales entre el software Matlab y el microcontrolador Arduino utilizado.

El archivo del primer paso que debe cargarse a la tarjeta de adquisición de datos debe ser de extensión .ino, y el diagrama de bloques generado en Matlab debe ser de extensión .slx.

Se deben conocer los tipos de datos los datos que se van a obtener, el tiempo de muestreo, y los rangos de medición, para así realizar un buen escalamiento de la señal.

Procediendo luego a realizar la respectiva sintonización del controlador, para lo cual se sintoniza por diferentes métodos, de los cuales se seleccionará el método más conveniente para la planta en estudio, teniendo en cuenta la curva en lazo cerrado real y determinando los márgenes de respuesta transitoria y de error en estado estable cual es el mejor controlador de los implementados.

- Condiciones iniciales,

Como se mencionó con anterioridad el rango de trabajo del PWM es de 0 a 255, aunque basados en la practica el actuador inicia a operar con un PWM igual a 70, cumpliendo los parámetros del rango y el PWM mínimo para dar arranque a la bomba, entonces cumpliendo con los rangos de funcionamiento de la bomba se enviara inicialmente un PWM de 70 para lograr estabilizar el sistema en un primer escalón.

- Condiciones finales,

Después de un tiempo y que se halla estabilizado el nivel (momento en el cual el flujo de salida es igual al flujo entrada), en ese preciso momento se procede a dar el siguiente impulso que es la condición final, para una mejor visualización se enviara con una diferencia de 50 PWM respecto al inicial, es decir, el valor final aplicado es de 120 PWM.

- Condiciones del escalón,

El escalón será ingresado para la toma de datos como un valor de PWM, donde será variado en los respectivos tiempos. El primer escalón se aplicará el tiempo en que tarde en estabilizarse el sistema con dicho valor, luego el tiempo de duración del segundo escalón será el restante para que la planta vuelva a un punto estable y se procede a suspender la aplicación de dicho valor de escalón para finalizar la toma de la data.

- Valor del escalón,

Como se mencionó anteriormente el experimento se llevó a cabo en dos escalones, los cuales fueron definidos de acuerdo a las pruebas realizadas, el cual es el orientado a la descripción de la planta, donde de acuerdo a su rango de trabajo los escalones serán de 70 PWM y 120 PWM, por estar en una buena zona de trabajo de la bomba y buena altura con respecto al nivel.

- Conversión entre unidades,

El sensor de nivel, es una celda de carga de 5Kg para llevar dichas unidades de peso a unidades de nivel en cm, se tendrá en cuenta la siguiente ecuación:

$$\text{densidad} = \frac{m}{v} \quad \text{Ecu. (34)}$$

$$\text{densidad} = \frac{m}{A \times h} \quad \text{Ecu. (35)}$$

$$h = \frac{m}{A \times \text{densidad}} \quad \text{Ecu. (36)}$$

- Variable controlada,

Está claro que la variable controlada es el nivel del tanque representado en un valor y unidades de centímetros, este valor depende de forma directa de cómo se envíe el dato de activación de flujo en el tanque de almacenamiento

- Variable manipulada,

Por otro lado, la variable manipulada para lograr variar el nivel, el cual es el objetivo, es el flujo volumétrico aportado por actuador el cual depende directamente de cómo se varíe el PWM que alimenta al mismo.

- Cantidad de repeticiones el experimento,

La elección del tamaño de muestra se realizó por intervalo de confianza, sabiendo que k es la cantidad de métodos para identificar el proceso, y que se conocen inicialmente el número de réplicas por tratamiento, n_0 . También se tiene una idea aproximada del valor de σ (la desviación estándar del error aleatorio), así como una idea de la magnitud de las diferencias, dT , entre tratamientos que le interesa detectar.

Para este caso,

$k = 1$ método (identificación por medio de dos escalones de entrada)

$n_0 = 5$ pruebas (pensadas inicialmente)

$dT = 1$

se espera que cada método tenga una variabilidad intrínseca de $\sigma = 1.5$; esto debido a factores no controlados (habilidad del operador, cansancio, variabilidad de las partes a ensamblar, error de medición del tiempo de ensamble, etcétera).

Considerando,

$$n = \frac{2(t_{(\alpha/2, N-k)})^2 CM_E}{(LSD)^2} \quad \text{Ecu. (37)}$$

Donde para un error del 10%

$$\alpha=0.1$$

$$N = k * n_0$$

$$\sigma^2 = CM_e$$

$$LSD = dT$$

Teniendo que,

$$n = \frac{2(t_{0.05, k \times n_0 - k})^2 \times \sigma^2}{dT^2} \quad \text{Ecu. (38)}$$

Considerando la tabla de T de Student para la relación entre $\alpha/2$ y $N-k$ del libro análisis y diseño de experimento de Román Salazar, la cual se observa en la figura 51.

Tabla A3 Puntos críticos para la distribución T de Student.

Grados de libertad	Área a la derecha de los puntos, $P(X > x)$			
	0.10	0.05	0.025	0.015
1	3.0776835	6.3137515	12.706205	21.204949
2	1.8856181	2.9199856	4.3026527	5.6427784
3	1.6377444	2.3533634	3.1824463	3.8960459
4	1.5332063	2.1318468	2.7764451	3.2976297
5	1.475884	2.0150484	2.5705818	3.002875
6	1.4397557	1.9431803	2.4469119	2.8289279
7	1.4149239	1.8945786	2.3646243	2.714573
8	1.3968153	1.859548	2.3060041	2.6338144
9	1.3830287	1.8331129	2.2621572	2.573804
10	1.3721836	1.8124611	2.2281389	2.5274842
11	1.3634303	1.7958848	2.2009852	2.4906639
12	1.3562173	1.7822876	2.1788128	2.4607002
13	1.3501713	1.7709334	2.1603687	2.4358452
14	1.3450304	1.7613101	2.1447867	2.4148977
15	1.3406056	1.7530504	2.1314495	2.397005

Figura 51. Puntos críticos para la distribución T Student.
Con los siguientes grados de libertad

$$N - k = k \times n_0 - k = 1 \times 5 - 1 = 4 \quad \text{Ecu. (39)}$$

Resaltando el valor de la relación para el presenta caso de estudio en la figura 52.

Tabla A3 Puntos críticos para la distribución *T* de Student.

Grados de libertad	Área a la derecha de los puntos, $P(X > x)$			
	0.10	0.05	0.025	0.015
1	3.0776835	6.3137515	12.706205	21.204949
2	1.8856181	2.9199856	4.3026527	5.6427784
3	1.6377444	2.3533634	3.1824463	3.8960459
4	1.5332063	2.1318468	2.7764451	3.2976297
5	1.475884	2.0150484	2.5705818	3.002875
6	1.4397557	1.9431803	2.4469119	2.8289279
7	1.4149239	1.8945786	2.3646243	2.714573
8	1.3968153	1.859548	2.3060041	2.6338144
9	1.3830287	1.8331129	2.2621572	2.573804
10	1.3721836	1.8124611	2.2281389	2.5274842
11	1.3634303	1.7958848	2.2009852	2.4906639
12	1.3562173	1.7822876	2.1788128	2.4607002
13	1.3501713	1.7709334	2.1603687	2.4358452
14	1.3450304	1.7613101	2.1447867	2.4148977
15	1.3406056	1.7530504	2.1314495	2.397005

*Figura 52. Puntos críticos para la distribución *T* de Student*

Reemplazando en la ecuación 40.

$$n = \frac{2(2.1318468)^2 \times 1.5^2}{1^2}$$

$$n = 20.4 \text{ muestras} \quad \text{Ecu. (40)}$$

$$n \approx 20 \text{ muestras}$$

Donde por cuestiones de tiempo, 20 muestras no son factibles, por lo que se dará más holgura en el error, haciendo los cálculos con un error del 20%

$$n = \frac{2(1.5332063)^2 \times 1.5^2}{1^2}$$

$$n = 10.5 \text{ muestras} \approx 10 \text{ muestras} \quad \text{Ecu. (41)}$$

- Intervalo de muestreo,
Posee un intervalo de muestreo de 1 unidad de simulación de Simulink en external por dato.
Lo que equivale a:

$$\text{tiempo real (seg)} = 1 \text{ segundo}$$

Ecu. (42)

Teniendo un intervalo de muestro de 1 s entre toma de datos.

Se escogió este intervalo de muestro cumpliendo que el intervalo de muestreo del experimento debe ser mayor al intervalo de muestreo del sensor-transmisor, el cual es de 10 a 80 tomas por segundo.

- Toma de datas,

El proceso de recolección de data se llevó a cabo 10 veces, es decir, se cuentan con 10 gráficas y datos de tiempo para hacer la respectiva identificación. El paso siguiente es realizar el promedio de dichas datas, el 70% para la identificación y el restante para la validación.

A continuación, se presentan los gráficos promedio del 30% (figura 53) y 70% (figura 54), para ver cada una de las datas véase **anexo C**.

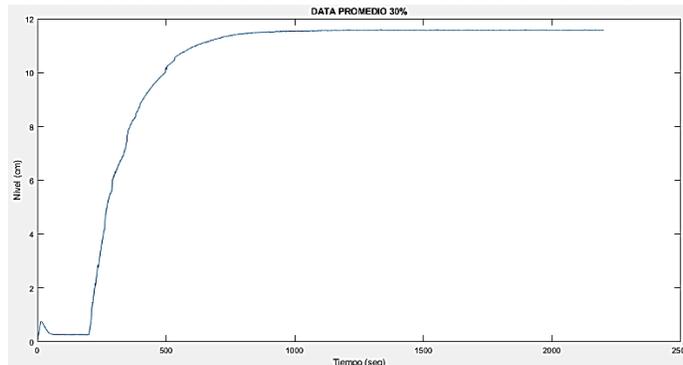


Figura 53 Grafica Data promedio 30%

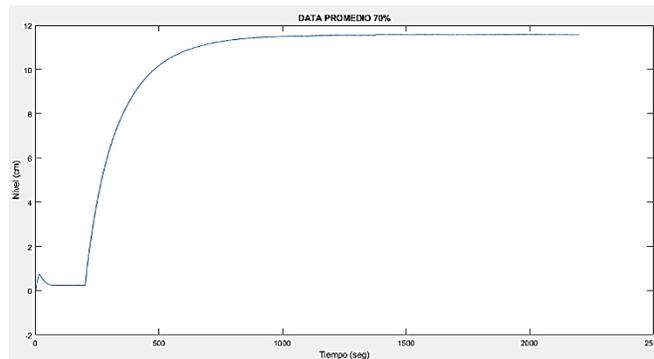


Figura 54 Grafica Data promedio 70%

- Proceso de identificación del sistema,

Las anteriores graficas representan el promedio de la data que será usada para la validación e identificación y se puede apreciar que se aplicó un escalón para estabilizar el sistema y luego se aplica de nuevo otro para recolectar la data, así como se muestra en la figura 55.



Figura 55 Diagrama en bloques para la identificación

Inicialmente se describen los métodos de identificación para sistemas de primer orden o aproximados que se van a usar, para luego implementarlos en el sistema de la planta. Todos los métodos utilizan como referencia a la data promedio la cual se puede ver en el **anexo D**.

- Método de la tangente de Ziegler y Nichols:

En este método se obtiene el modelo de primer orden más tiempo muerto. El procedimiento es trazar una recta tangente a la curva de reacción del proceso en su punto de inflexión de máxima pendiente. Se deben identificar los parámetros ganancia K_p , la constante de tiempo τ y el tiempo muerto aparente del sistema t_m . La ganancia se calcula de la siguiente manera: $K_p = \Delta y / \Delta u$, donde Δu es la magnitud del escalón aplicado a la variable manipulada y Δy el cambio en la variable manipulada.

Aplicando el método al caso de estudio se tiene el resultado de la figura 56.

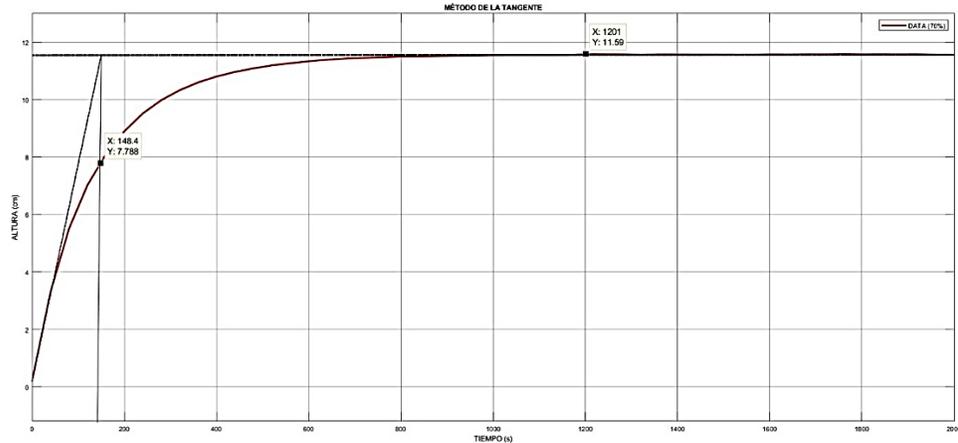


Figura 56. Identificación del sistema bajo el método de la pendiente

Se puede apreciar un tiempo muerto después de aplicar el segundo escalón. Se calculará la ganancia, la cual es la misma para todos los métodos.

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{11.59 - 0.22}{120 - 70} = \frac{11.37}{50} = 0.2274 \quad \text{Ecu. (43)}$$

Luego se procede a estimar el tiempo muerto t_m y τ que representan como tal el sistema.

$$t_m = 0 \text{ s} \quad \text{Ecu. (44)}$$

$$\tau = 148.4 \text{ s} \quad \text{Ecu. (45)}$$

Y la función de transferencia resultante es la siguiente

$$G(s) = \frac{K_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} = \frac{0.2274 e^{-0s}}{148.4s + 1} \quad \text{Ecu. (46)}$$

- Método de dos puntos de Smith

Propuesto por Smith, donde el autor toma una serie de tiempos para realizar a identificación del proceso, se hallan los tiempos en los cuales la respuesta alcanza un 28.3% y un 63.2% del valor final.

Y las fórmulas para obtener todos los parámetros que representan el sistema de primer orden son las siguiente.

$$t_{28} = t_m + \frac{\tau}{3} \quad \text{Ecu. (47)}$$

$$t_{63} = t_m + \tau \quad \text{Ecu. (48)}$$

$$\tau = 1.5(t_{63} - t_{28}) \quad \text{Ecu. (49)}$$

$$t_m = t_{63} - \tau \quad \text{Ecu. (50)}$$

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad \text{Ecu. (51)}$$

Aplicando este método de identificación al sistema se tiene que:

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{11.59 - 0.22}{120 - 70} = \frac{11.37}{50} = 0.2274 \quad \text{Ecu. (52)}$$

$$t_{28} = 43.16s \quad \text{Ecu. (53)}$$

$$t_{63} = 135.5s \quad \text{Ecu. (54)}$$

$$\tau = 1.5(135.5 - 43.16) = 138.51 \quad \text{Ecu. (55)}$$

$$t_m = t_{63} - \tau = 135.5 - 138.51 = -3.01 \quad \text{Ecu. (56)}$$

Debido a que el tiempo muerto resultó ser negativo se debe tomar el tiempo de muestreo del sistema el cual es de 1 segundo.

Ya obtenidos estos valores la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} = \frac{0.2274 e^{-s}}{130.5s + 1} \quad \text{Ecu. (57)}$$

- Método de Sundaresan y Krischnaswami

Proponen que dos tiempos (t_1 y t_2) estimados desde una curva de respuesta escalón correspondiente a 35.3 y 85.3% del tiempo de respuesta, respectivamente. El tiempo muerto y el tiempo constante son entonces estimados por las siguientes ecuaciones.

$$t_m = 1.3t_1 - 0.29t_2 \quad \text{Ecu. (58)}$$

$$\tau = 0.67(t_2 - t_1) \quad \text{Ecu. (59)}$$

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{11.59 - 0.22}{120 - 70} = \frac{11.37}{50} = 0.2274 \quad \text{Ecu. (60)}$$

$$t_1 = 57.12s \quad \text{Ecu. (61)}$$

$$t_2 = 276s \quad \text{Ecu. (62)}$$

$$\tau = 0.67(276 - 57.12) = 146.65 \quad \text{Ecu. (63)}$$

$$t_m = \theta = 1.3 \times 57.12 - 0.29 \times 276 = -11.16 \quad \text{Ecu. (64)}$$

Debido a que t_m no puede optar por valores negativos el tiempo muerto asignado es el tiempo de muestreo, el cual es de 1 segundos.

Y la función de transferencia resultante es la siguiente:

$$G_{(s)} = \frac{K_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} = \frac{0.2274 e^{-s}}{146.65s + 1} \quad \text{Ecu. (65)}$$

- Selección del modelo que más se ajuste al comportamiento de la planta

Habiendo hecho el respectivo análisis de los métodos se procede a elegir el que mejor se adapte al sistema en cuanto a la respuesta, en el **anexo E** se presenta todo el proceso de evaluación de las funciones de transferencia obtenida por cada método y la respectiva selección de cada uno de estos selección entre los métodos aplicados, el cual da como resultado en su análisis porcentual del error de cada uno de los métodos con respecto a la data promedio que el método que mejor se adapta al proceso de llenado de tanque es el de Sundareson y Krischnaswami siendo su función de transferencia:

$$G_{(s)} = \frac{0.2274 e^{-s}}{146.65s + 1} \quad \text{Ecu. (66)}$$

- Determinación de la convergencia, linealidad y variabilidad en el tiempo del sistema

A criterio del autor el sistema presenta una lenta convergencia pues para un experimento de características académicas un tiempo de 23 minutos en promedio es un proceso tardío. Por otro lado, la variabilidad en el tiempo puede verse evidente en las gráficas de cada una de las datas de salida, pues al llegar a su punto de convergencia mantiene sus valores dentro de un rango mínimo de error por lo que se determina que es invariante en el tiempo. Para la linealidad puede inferirse que el sistema al poseer una función de transferencia de primer orden se determina su linealidad. Para dejar

constancia de ello se demuestra que este sistema cumple con los principios de proporcionalidad y aditivita

Principio de proporcionalidad,

Para que este principio se cumpla la entrada de un sistema multiplicada por un factor debe llevar a que la salida del sistema también será multiplicada por el mismo factor.

Como se puede observar en la figura 57, al sistema obtener una ganancia en su entrada esta se ve reflejada directamente en la salida.

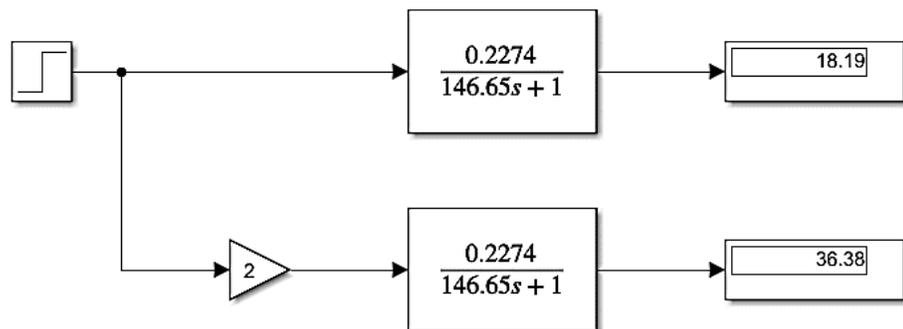


Figura 57 Principio de proporcionalidad

Principio de aditividad,

Para que este principio se cumpla el sistema debe estar sujeto a dos distintas entradas con respuestas distintas, y al ser sumadas las entradas y expuesta al sistema la salida es la resultante de la suma de las salidas que producen cada una de esas entradas individualmente.

En la figura 58 se muestra la suma de entradas evaluadas en la figura anterior y como se evidencia la salida es la suma de las salidas producidas por cada entrada de forma individual y de esta manera determinando que el sistema es en efecto lineal.

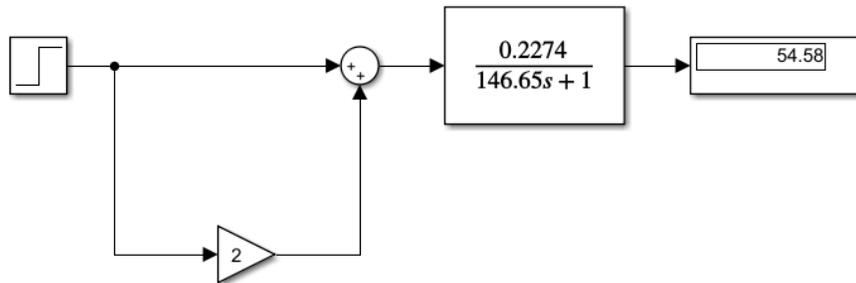


Figura 58 Principio de aditividad

3.1.2 Evaluación de la necesidad de un controlador lógico difuso.

Para conocer si él es necesario implementar o no un controlador lógico difuso se debe saber si existe algún tipo de incertidumbre en las variables, y ver si esta incertidumbre es lo suficientemente influyente en el proceso como para ser tomada en cuenta. Existen 4 formas en la que la incertidumbre puede ocurrir:

1. Las palabras que se utilizan en los antecedentes y los consecuentes en las reglas pueden significar diferentes cosas para diferentes personas.
2. Los consecuentes obtenidos por votación de un grupo de expertos suelen ser diferentes para la misma regla, porque los expertos no siempre están de acuerdo.
3. Solamente formaciones de datos ruidosos son habilitados por sintonización (optimización) de los parámetros de un ITS FLS.
4. Mediciones de ruido activan el sistema de lógica difusa.

En función de lo anterior se determina que existe diversos casos de incertidumbre aplicables al sistema evaluado (control de nivel de tanque de agua), donde el de mayor impacto es la variabilidad que puede existir entre las consecuencias para una regla según diversos expertos, ya un experto puede determinar que a pesar de que existe un error grande entre el valor deseado (Setpoint) y el valor actual el sistema su respuesta debe ser lenta para que exista una curva de convergencia suave lo que implique a nivel físico que no existan riesgos de derramamiento de líquido y otro experto puede determinar que si debe existir una acción fuerte ante un error grande para que el sistema converja al valor deseado en el menor tiempo posible. Esto conlleva a que esa incertidumbre entre las consecuencias de las reglas sea tomada en cuenta en función de optimizar el proceso de control.

3.1.3 Elección del tipo de sistema difuso tipo 2, generalizado o de intervalo.

Siguiendo las sugerencias que establece la metodología se utiliza un sistema difuso tipo 2 de intervalo ya que el estudio previamente realizado da garantías de que los resultados esperados son lo suficiente mente óptimos en relación al coste computación excesivo que genera el implementar uno de tipo generalizado.

3.1.4 Definición del tipo de controlador según el proceso a controlar.

El diseño del controlador difuso se puede desarrollar con base en el diseño de controladores clásicos cuya arquitectura igualmente puede ser serie o paralela. Cuando el problema es regular la salida de un proceso alrededor de una referencia, es natural considerar el error como una entrada, así como la derivada del error y/o la integral del error, incluso para el caso de un controlador difuso.

Ya que el proceso evaluado es de lenta convergencia las sugerencias de la metodología es aplicar un controlador PI o un PD, en este caso se selecciona un controlador PD, el hecho de que se seleccione un PD difuso sobre otro tipo de controladores difusos, se debe a que este permite una rápida corrección de las posibles perturbaciones y ha sido implementado con éxito en diferentes procesos como se evidencia en la tabla 16.

3.1.5 Definición de las entradas y salidas

En base a las recomendaciones de la metodología para la definición de las entradas y salidas, y a que en el inciso anterior se seleccionó un tipo de control difuso basado en un control PD, las entradas definidas son el error y la derivación de error, y la salida es la acción de control, la cual también será nombrada como “mando” en este documento.

3.1.6 Dimensionamiento del controlador difuso tipo 2 mediante el rango de las variables de entrada y salida.

Siguiendo las indicaciones de la metodología, donde para el presente paso se establece el rango de las variables de entrada y de salida, pesando dichas variables mediante la sintonización de un controlador clásico y simulando el mismo, extrayendo de dicha simulación el valor máximo del error obtenido, el valor nominal de la variación del error fuera de las condiciones de arranque y la máxima acumulación de dicho error.

La sintonización del controlador clásico se realizó por el método de Ziegler & Nichols, debido a que el cálculo de sus variables KP, KI y KD están dadas bajo unas operaciones matemáticas de fácil solución.

Para realizar un controlador por medio del método de Ziegler y Nichols se deben tener en cuenta ciertas reglas de sintonización basadas en los valores de K_p , τ y t_m del modelo de la planta, el cual se observa en la ecuación 67.

$$G(s) = \frac{K_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} = \frac{0.2274 e^{-1s}}{146.65s + 1} \quad \text{Ecu. (67)}$$

Donde,

$$K_p = 0.2274, \quad \tau = 146.65, \quad t_m = 1$$

Debido a que t_m es asumido como 0 (es muy pequeño para ser apreciado) se le asigna al tiempo muerto el valor del tiempo de muestreo para este caso un valor de 1 segundo.

Para calcular los valores de KP, KI y KD se usan las fórmulas de la tabla 17

Tabla 17 Sintonización de Ziegler & Nichols

Tipo de controlador		Ganancia proporcional K_c	Tiempo de integración τ_I	Tiempo de derivación τ_D
Proporcional	P	$\frac{1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	—	—
Proporcional-integral	PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33 t_0$	—
Proporcional-integral-derivativo	PID	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$2.0 t_0$	$\frac{1}{2} t_0$

Fuente: Ziegler & Nichols

Realizando el cálculo para un controlador PID se tiene que,

$$K_c = 763.32, \quad t_i = 2, \quad t_d = 0.5$$

Con,

$$KP = K_c = 763.32$$

$$KI = \frac{K_c}{ti} = 381.662$$

$$KD = K_c \times td = 381.662$$

El lazo de control se observa en la figura 59, los parámetros del control se ingresan en cómo se observa en la figura 60 y la respuesta del sistema en la figura 61.

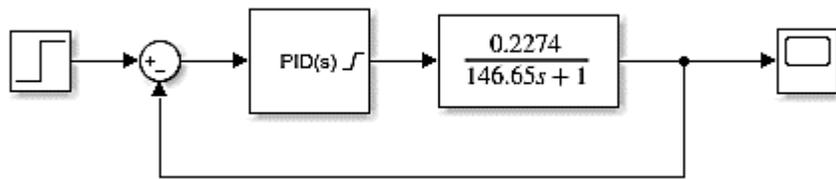


Figura 59. Lazo de control simulado con PID calculado por el tercer método de Ziegler and Nichols

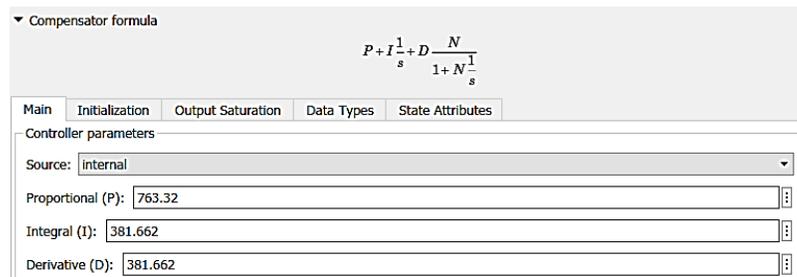


Figura 60. Valores de KP, KI y KD en el bloque PID

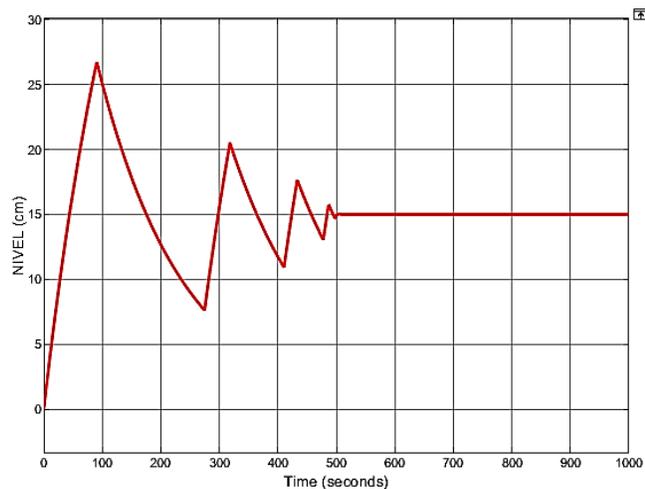


Figura 61 Respuesta del controlador PID

Como se puede observar en la figura 61 este controlador genera sobre impulsos excesivamente grandes con un tiempo de establecimiento que ronda los 500 segundos, esto se debe a que la constante integral tiene una gran influencia en el controlador y al ser un factor que es acumulativo tarda mucho tiempo en hacerse pequeña generando que el sistema desborde en repetidas ocasiones. Para solucionar este inconveniente se aplicó ANTI-WINDUP para mitigar los efectos negativos de la acción integral.

En la figura 62 se puede observar el diagrama de bloques del lazo de control con ANTI-WINDUP y en la figura 63 se muestra la respuesta del sistema que en comparación a la respuesta de la figura 61 los sobre impulsos se ven notablemente disminuidos y el tiempo de establecimiento tiende a los 100 segundos.

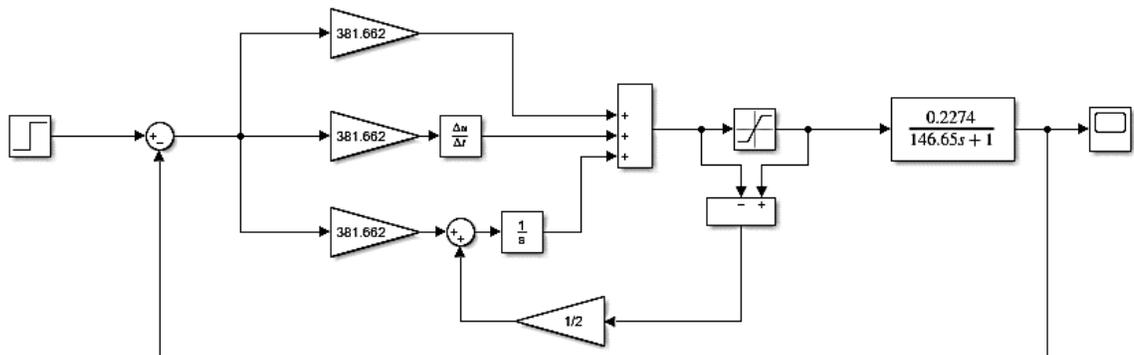


Figura 62 Lazo de control con ANTI-WINDUP

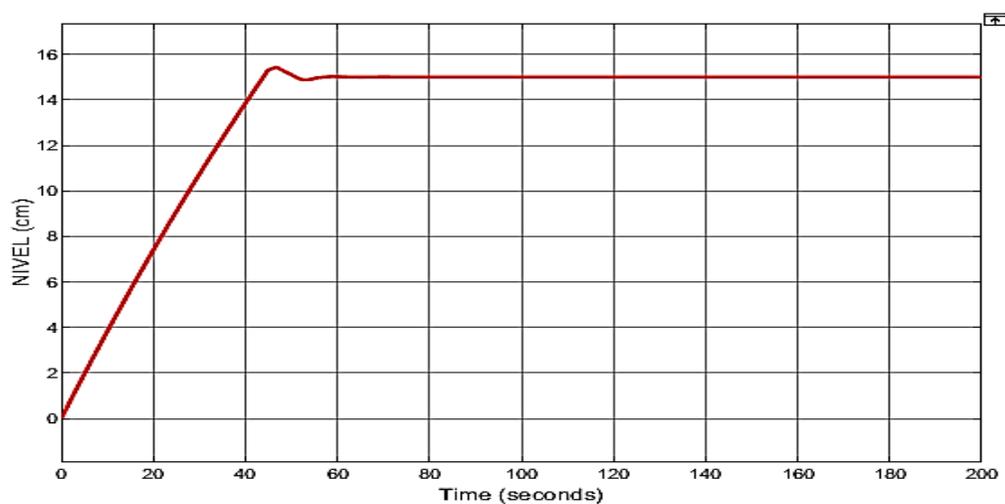


Figura 63 respuesta del controlador PID con ANTI-WINDUP

Una vez se obtuvo el controlador clásico, se extrajo la información necesaria para dimensionar el universo de discurso de cada variable lingüística, proceso el cual se describe en la figura 64.

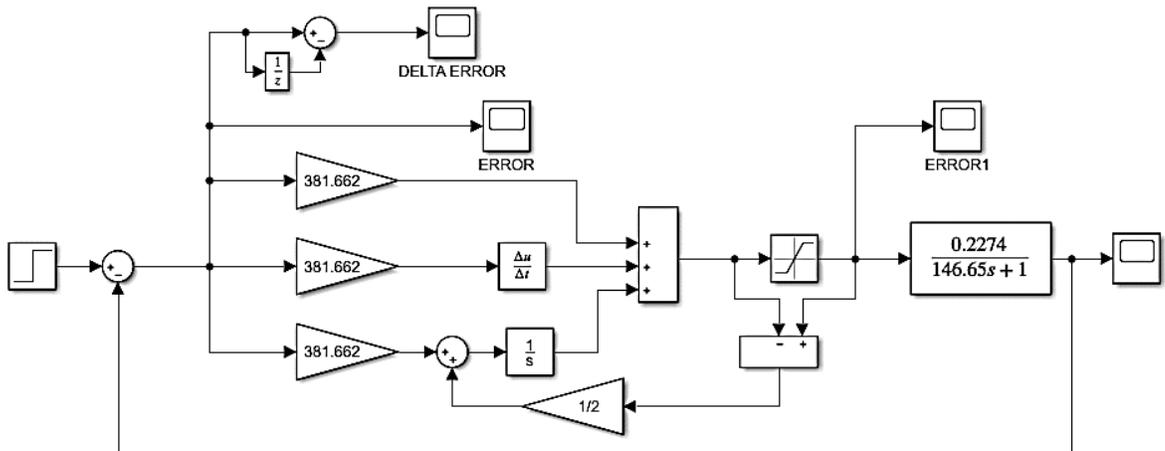


Figura 64 Diagrama en bloques del mejor controlador clásico PID para el proceso

- Error:** En el controlador clásico se llevó a cabo el control a un setpoint de 15cm y se obtuvo la gráfica del error, la cual se observa en la figura 65. Dado que para el caso de estudio el máximo setpoint es 15 cm, se establece un universo de discurso para el error de ± 17 cm, asignando una tolerancia de ± 2 cm

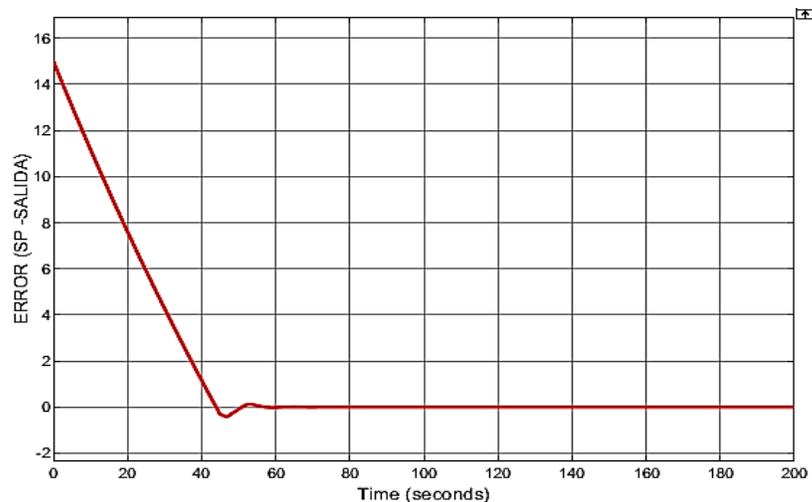


Figura 65 Error para un setpoint de 15 cm

- Derivada del Error:** De igual forma que se hizo con el universo de discurso del error, la derivada del error se halló a partir de la respuesta en el

controlador clásico como base ante un mismo setpoint de 15cm. Donde después de analizar la figura 66 se determinó que el mismo es de ± 2 , donde no se consideraron los impulsos iniciales ya que ellos no se encuentran dentro del contexto del significado de la variable lingüística.

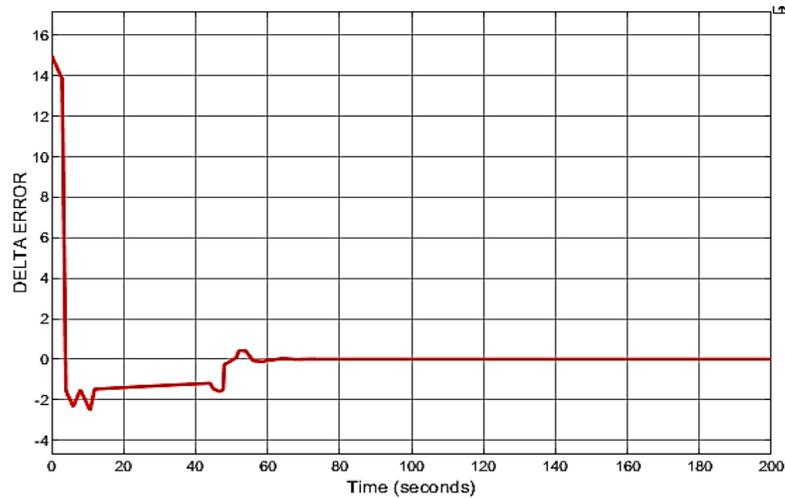


Figura 66 Comportamiento del delta del error ante un Setpoint de 15cm

- **Acción de control (Mando):** Para dimensionar el universo de discurso para la acción de control se tomó como punto de partida la salida del controlador en el lazo cerrado del mejor clásico. La salida del controlador clásico se ve reflejada en la figura 67, y se establece que el universo de discurso de mando es de [0 255] PWM.

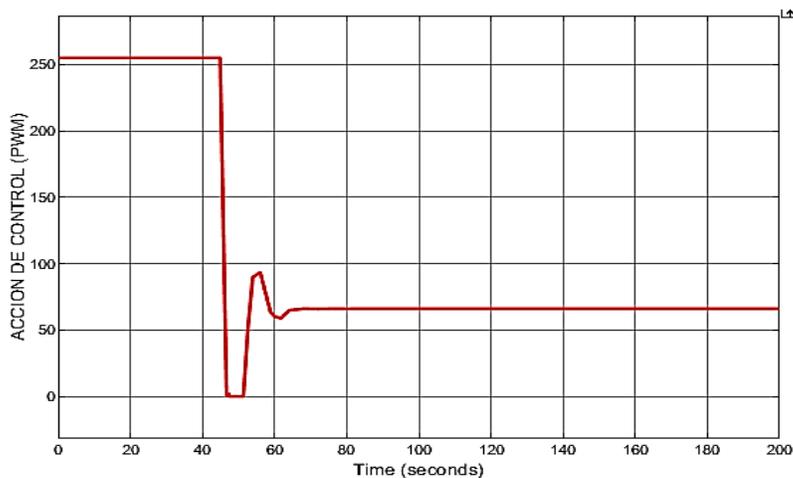


Figura 67 Comportamiento del controlador ante un setpoint de 15 cm

3.1.7 Establecimiento de la cantidad de funciones de membresía.

Siguiendo lo establecido en la metodología, se definen 7 funciones de membresía para cada variable lingüística. De tal forma, la denominación de las funciones de membresía de la variable lingüística error, la derivada del error y la acción de control se observa en la tabla 18.

Tabla 18. Conjuntos de las variables lingüísticas

ERROR	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
DELTA	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
ERROR							
ACCION DE CONTROL	Z	MMB	MB	B	A	MA	MMA

Donde las etiquetas lingüísticas significan,

NG: Negativo Grande **NM:** Negativo Mediano **NP:** Negativo Pequeño
Z: Cero
PP: Positivo Pequeño **PM:** Positivo Mediano **PG:** Positivo Grande

MMA: Muy Muy Alto **MA:** Muy Alto **A:** Alto **Z:** Cero
B: Bajo **MB:** Muy Bajo **MMB:** Muy Muy Bajo

3.1.8 Elección del tipo de funciones de membresía.

En base a la metodología se definen funciones gaussianas para las variables de entrada y del tipo singleton para la variable de salida, teniendo en cuenta el cruzamiento entre ellas.

3.1.9 Definición de la huella de incertidumbre.

En base a la metodología se define Inicialmente una FOU de 0.5, la cual debe ser ajustada de tal manera que se modelen las incertidumbres numéricas derivadas de datos realistas que afectan las entradas y la salida, en el caso de resultados no deseados.

3.1.10 Definición de la base de reglas

Para implementar la estrategia de control PD fuzzy se hará uso de la interpretabilidad, forzando el comportamiento del controlador, haciéndolo más rígido analizando ciertos puntos estratégicos de la respuesta del sistema como se muestra a continuación en la figura 68.

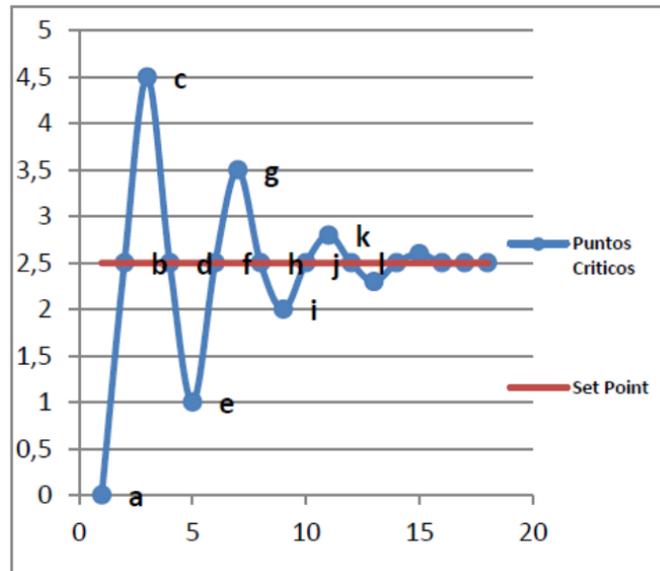


Figura 68 Análisis de interpretabilidad del controlador

Es conveniente realizar una tabla donde se observen las posibles combinaciones de los conjuntos de las variables de entrada, la cual se observa en la tabla 19.

Tabla 19. Controlador fuzzy ideal entradas

ERROR→ DERIVADA DEL ERROR	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	MMB	MMB	MMB	MMA	MMA	MMA	MMA
NM	MMB	MB	MB	MA	MA	MA	MMA
NP	MMB	MB	B	A	A	MA	MMA
Z	MMB	MB	B	M	A	MA	MMA
PP	MMB	MB	B	B	A	MA	MMA
PM	MMB	MB	MB	MB	MA	MA	MMA
PG	MMB	MMB	MMB	MMB	MMA	MMA	MMA

Al hacer el estudio de los puntos críticos se obtuvo que las combinaciones que influían en dichos puntos son los observados en la tabla 20.

Tabla 20. Descripción de los puntos críticos más importantes

	ERROR	DERIVADA DEL ERROR	ACCIÓN DE CONTTROL	PUNTO CRITICO
1	PG	Z	MMA	a
2	PM	Z	MA	e
3	PP	Z	A	i
4	Z	NG	MMA	b
5	Z	NM	MA	f
6	Z	NP	A	j
7	NG	Z	MMB	c
8	NM	Z	MB	g
9	NP	Z	B	k
10	Z	PG	MMB	d
11	Z	PM	MB	h
12	Z	PP	B	l
13	Z	Z	Z	Estable

De tal forma, si se analizan dichos puntos se obtiene la activación correcta de las reglas para obtener el resultado deseado de control, según el estudio de interpretabilidad. Donde no solo se garantiza la correcta activación de las reglas, sino también se logra reducir la cantidad de reglas de 49 reglas posibles a 13 reglas de estudio para el desarrollo del controlador, lo que sitúa al estudio dentro del rango de reglas recomendado en la metodología. Dichas reglas están basadas en la tabla 21 con su respectivo resultado de salida.

Tabla 21 Reglas del controlador difuso tipo 2 del proceso de Nivel

N°	REGLA	SALIDA
1	Si $e \rightarrow NG$ y $\Delta e \rightarrow Z$	MMB
2	Si $e \rightarrow NM$ y $\Delta e \rightarrow Z$	MB
3	Si $e \rightarrow NP$ y $\Delta e \rightarrow Z$	B
4	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow Z$	M
5	Si $e \rightarrow PP$ y $\Delta e \rightarrow Z$	A
6	Si $e \rightarrow PM$ y $\Delta e \rightarrow Z$	MA
7	Si $e \rightarrow PG$ y $\Delta e \rightarrow Z$	MMA
8	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow NG$	MMA
9	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow NM$	MA
10	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow NP$	A
11	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow PP$	B
12	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow PM$	MB
13	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow PG$	MMB

3.1.11 Elección del método de inferencia

En base a los lineamientos de la metodología se establece un mecanismo de inferencia basado en TSK y como mecanismo de fusificación el producto.

3.1.12 Establecimiento del método de reducción de tipo y fusificación.

En base a los lineamientos de la metodología se establece el algoritmo de KM para la reducción de tipo.

3.1.13 Puesta en marcha del sistema.

Para la puesta en marcha del sistema se utilizó la Toolbox de Matlab “Interval Type-2 Fuzzy Logic System Toolbox”, una biblioteca Matlab/Simulink para los sistemas lógicos difusos de tipo de intervalo 2 desarrollada por Taskin A. y Kumbasar T. en el 2015 ²⁵⁷. La cual se adapta a los requerimientos del sistema difuso tipo 2, dados en los incisos anteriores basados en la metodología planteada, siendo un sistema basado en lógica difusa tipo 2 de intervalo, con un sistema de inferencia fundamentado en Sugeno, el cual a su vez permite entre sus opciones seleccionar como método de reducción de tipo el algoritmo KM, tratar las reglas con el método del producto, usar funciones de membresía gaussianas para las entradas y del tipo singleton para la salida.

Se partió por la configuración del mecanismo de fusificación e inferencia, los cuales acorde con lo estipulado en la metodología planteada, se establecieron como se observa en la figura 69 para la fusificación y en la figura 70 para la reducción de tipo.

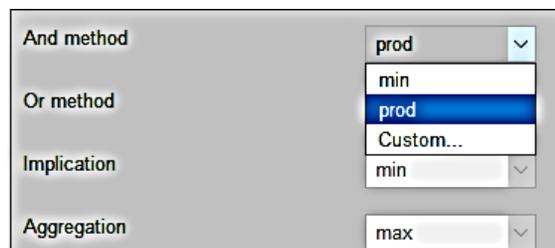


Figura 69 Selección del método de fusificación

²⁵⁷ A. Taskin y T Kumbasar, “GitHub - ahmettaskin/type-2-fuzzy-logic-systems-matlab-toolbox: Matlab Toolbox for Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems”, 2015
<<https://github.com/ahmettaskin/type-2-fuzzy-logic-systems-matlab-toolbox/>> [consultado 1 septiembre 2020].

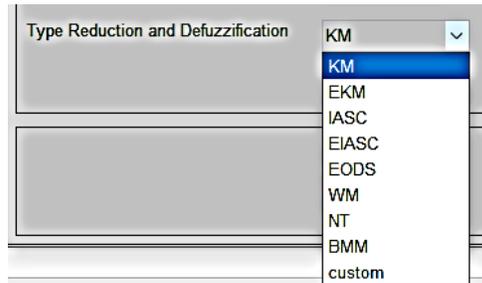


Figura 70 Selección del método de reducción de tipo

Seguido por la creación de las variables lingüísticas, tal cual como se observa en la figura 71.

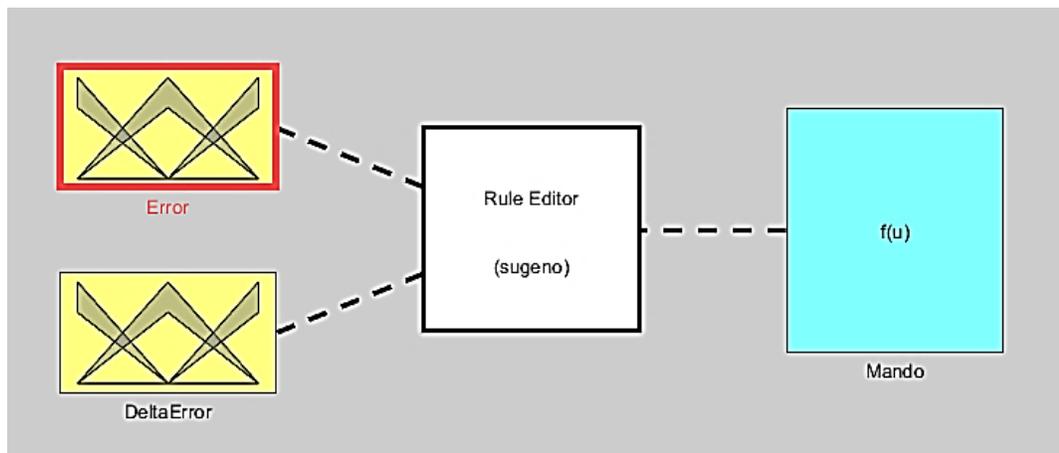


Figura 71 Definición de las variables de entrada y salida

Posteriormente se dimensionó el universo de discurso de dichas variables, como se observa en la figura 72.

<p>Current Variable</p> <p>Name Error</p> <p>Type input</p> <p>Range [-17 17]</p> <p>Display Range [-17 17]</p>	<p>Current Variable</p> <p>Name DeltaError</p> <p>Type input</p> <p>Range [-2 2]</p> <p>Display Range [-2 2]</p>	<p>Current Variable</p> <p>Name Mando</p> <p>Type output</p> <p>Range [0 255]</p> <p>Display Range</p>
---	--	--

Figura 72 Dimensionamiento de los universos de discurso

Para la definición de las funciones de membresía de las variables lingüísticas de las entradas, se debe considerar que dicha definición se realiza en la Toolbox mediante el establecimiento de los parámetros de una función gaussiana, los cuales se representan como [a,b,c], siendo a, b y c tres constantes. Donde 'a' determina la desviación estándar, 'b' la posición del centro de la campana y 'c' el punto más alto de la campana.

Las funciones de membresía del error se parametrizan a continuación:

1. Etiqueta lingüística Negativo Grande (NG):
 - a. parámetros MFU: [3 -13 1]
 - b. parámetros MFL: [2.5 -13 0.5]
2. Etiqueta lingüística Negativo Mediano (NM):
 - a. Parámetro MFU: [1 -4 1]
 - b. Parámetro MFL: [1 -4 0.5]
3. Etiqueta lingüística Negativo Pequeño (NP):
 - a. Parámetro MFU: [-0.5 -1.5 1]
 - b. Parámetro MFL: [-0.5 -1.5 0.5]
4. Etiqueta lingüística Cero (Z):
 - a. Parámetro MFU: [0.08 0 1]
 - b. Parámetro MFL: [0.08 0 0.5]
5. Etiqueta lingüística Positivo Pequeño (PP):
 - a. Parámetro MFU: [-0.5 1.5 1]
 - b. Parámetro MFL: [-0.5 1.5 0.5]
6. Etiqueta lingüística Positivo Mediano (PM):
 - a. Parámetro MFU: [-1 4 1]
 - b. Parámetro MFL: [-1 4 0.5]
7. Etiqueta lingüística Positivo Grande (PG):
 - a. Parámetro MFU: [3 14 1]
 - b. Parámetro MFL: [2.5 14 0.5]

Resultados que gráficamente se observan en la figura 73.

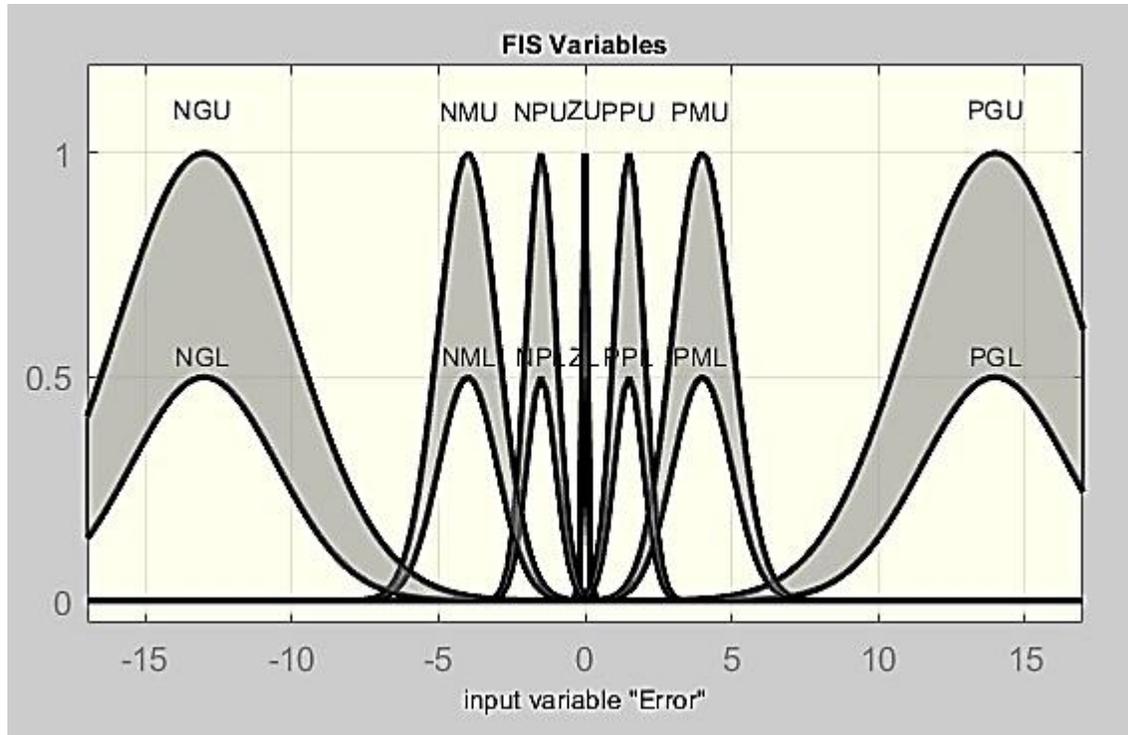


Figura 73 Funciones de membresía del Error

Las funciones de membresía de la derivada del error se parametrizan a continuación:

1. Etiqueta lingüística Negativo Grande (NG):
 - a. parámetros MFU: [-0.5 -2 1]
 - b. parámetros MFL: [-0.3 -2 0.5]
2. Etiqueta lingüística Negativo Mediano (NM):
 - a. Parámetro MFU: [-0.3 -1 1]
 - b. Parámetro MFL: [-0.3 -1 0.5]
3. Etiqueta lingüística Negativo Pequeño (NP):
 - a. Parámetro MFU: [-0.1 -0.3 1]
 - b. Parámetro MFL: [-0.1 -0.3 0.5]
4. Etiqueta lingüística Cero (Z):

- a. Parámetro MFU: [-0.05 0 1]
 - b. Parámetro MFL: [-0.05 0 0.5]
5. Etiqueta lingüística Positivo Pequeño (PP):
- a. Parámetro MFU: [-0.1 0.3 1]
 - b. Parámetro MFL: [-0.1 0.3 0.5]
6. Etiqueta lingüística Positivo Mediano (PM):
- a. Parámetro MFU: [-0.3 1 1]
 - b. Parámetro MFL: [-0.3 1 0.5]
7. Etiqueta lingüística Positivo Grande (PG):
- a. Parámetro MFU: [-0.5 2 1]
 - b. Parámetro MFL: [-0.3 2 0.5]

Resultados que gráficamente se observan en la figura 74.

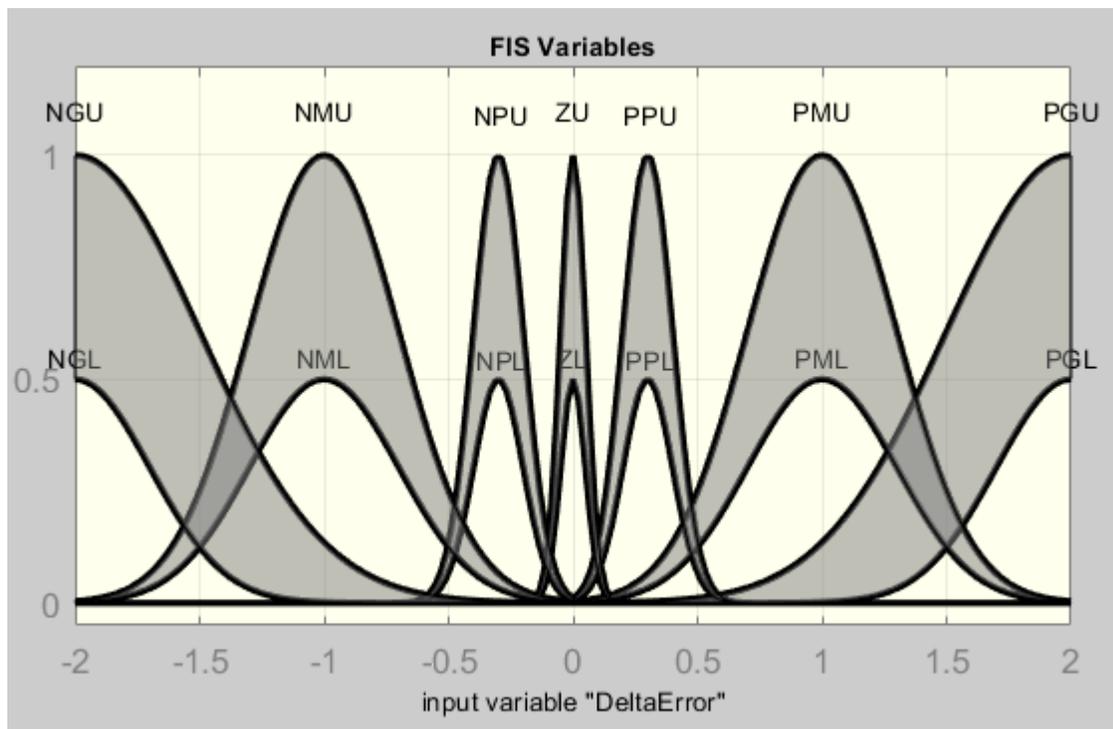


Figura 74 Funciones de Membresía de la derivada del error

Hasta este punto se observa el seguimiento de los planteamientos de la metodología, como lo son los mecanismos de fusificación e inferencia, cantidad de variables, su dimensionamiento, cantidad y tipos de funciones de membresía, así como todas las recomendaciones. Anteriormente se definieron las funciones de entrada de tipo gaussianas según lo establecido, su huella de incertidumbre y el entrecruzamiento de las mismas. Ahora, se procede a definir las funciones tipo singleton de la salida y los valores de su acción de control.

Donde se tienen los siguientes valores para cada función singleton,

1. Etiqueta lingüística Muy Muy Alto (MMA): 255
2. Etiqueta lingüística Muy Alto (MA): 150
3. Etiqueta lingüística Alto (A): 100
4. Etiqueta lingüística Cero (Z): 72
5. Etiqueta lingüística Muy Muy Bajo (MMB): 40
6. Etiqueta lingüística Muy Bajo (MB): 55
7. Etiqueta lingüística Bajo (B): 60

Y en el sistema las funciones se aprecian como se observa en la figura 75.

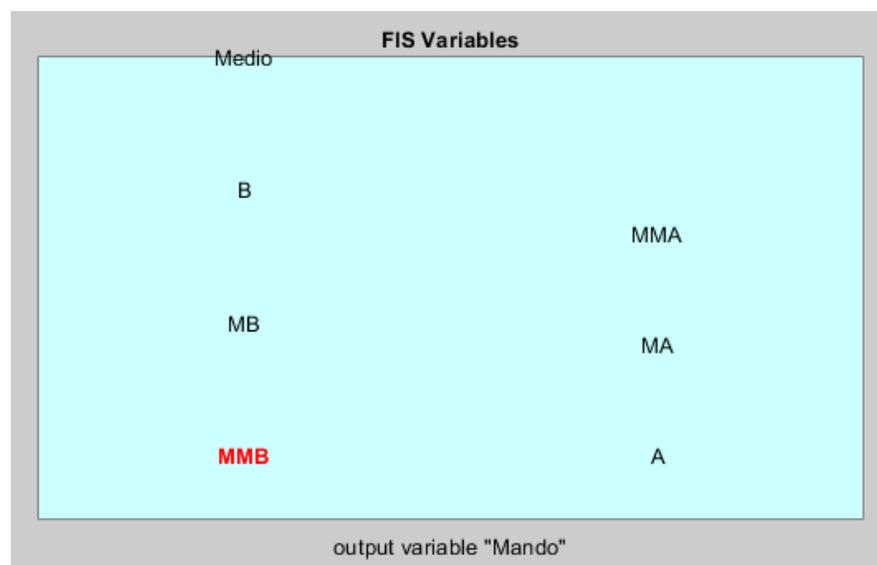


Figura 75 Funciones de membresía de la acción de control.

Una vez establecidas las funciones de membresía se procedió a cargar la base de reglas definidas anteriormente, las cuales se adjuntan al sistema de inferencia como se observa en la figura 76.

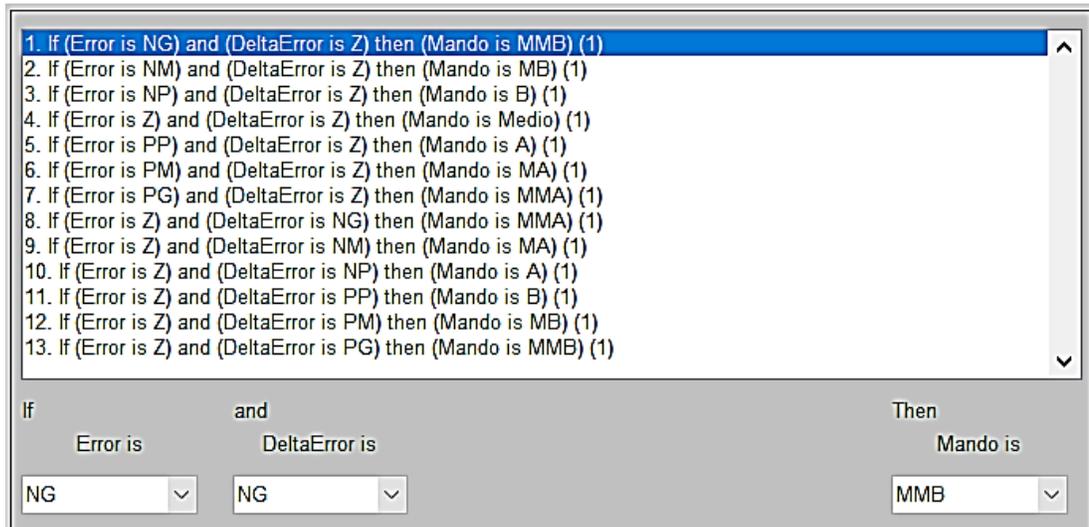


Figura 76 Base de reglas

Con el cargue de la base de reglas, el sistema ha sido definido en su totalidad y su superficie se observa en la figura 77.

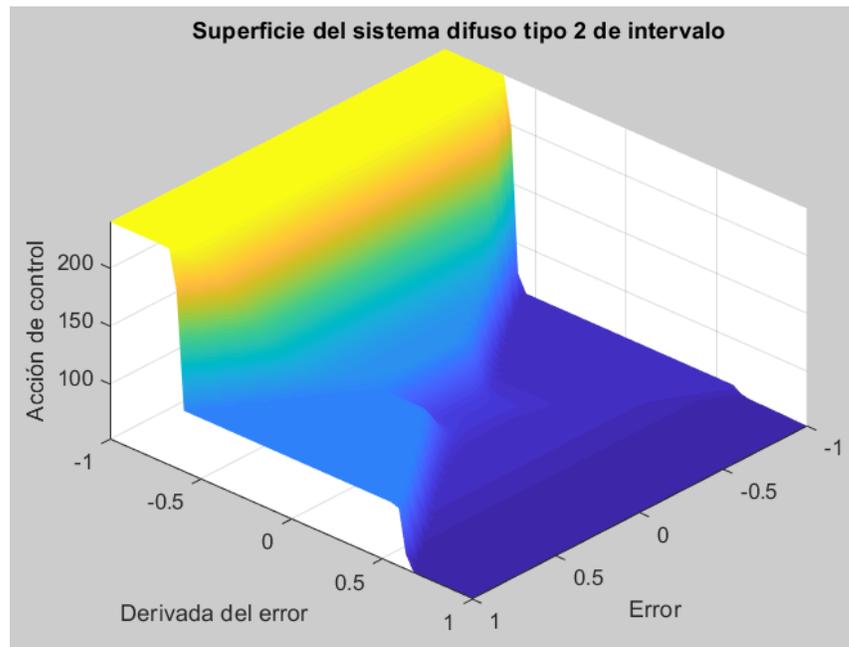


Figura 77 Superficie del sistema difuso tipo 2 de intervalo

El último paso es exportar el sistema de control difuso tipo 2 de intervalo a Simulink, donde el diagrama de bloques general del sistema se observa en la figura 78.

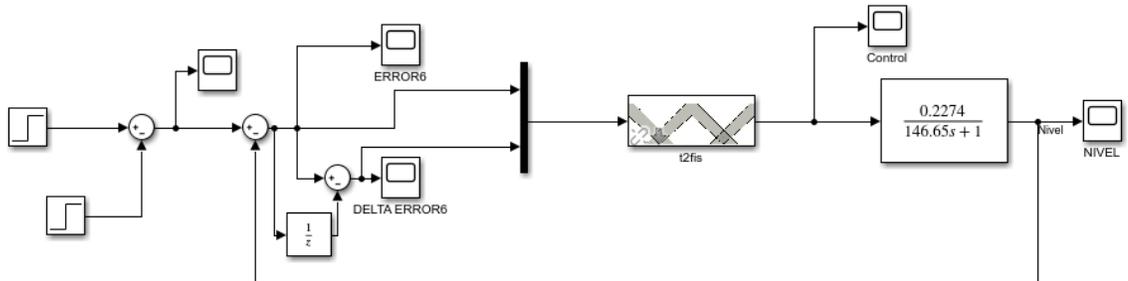


Figura 78 Diagrama en bloques del sistema de control difuso IT2 del proceso de nivel

Ya que el sistema difuso tipo 2 de intervalo fue diseñado en base a la respuesta de un controlador clásico a un S_p de 15 cm, el sistema difuso solo responde bien ante dicho valor de referencia, teniendo que ampliar el rango haciendo uso ganancias a la salida o/y entradas. Por ende, la respuesta del sistema se evaluó ante los ya mencionados 15 cm en la referencia, obteniendo los resultados que se observan en las figura 79 para la respuesta del sistema y la figura 80 para la respuesta del controlador.

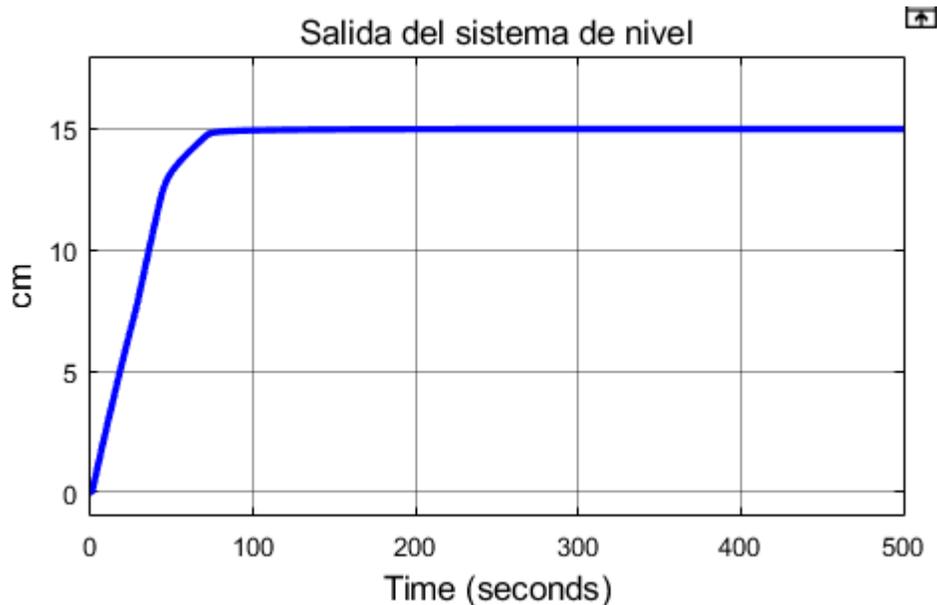


Figura 79 Respuesta del sistema de Nivel ante un S_p de 15 cm

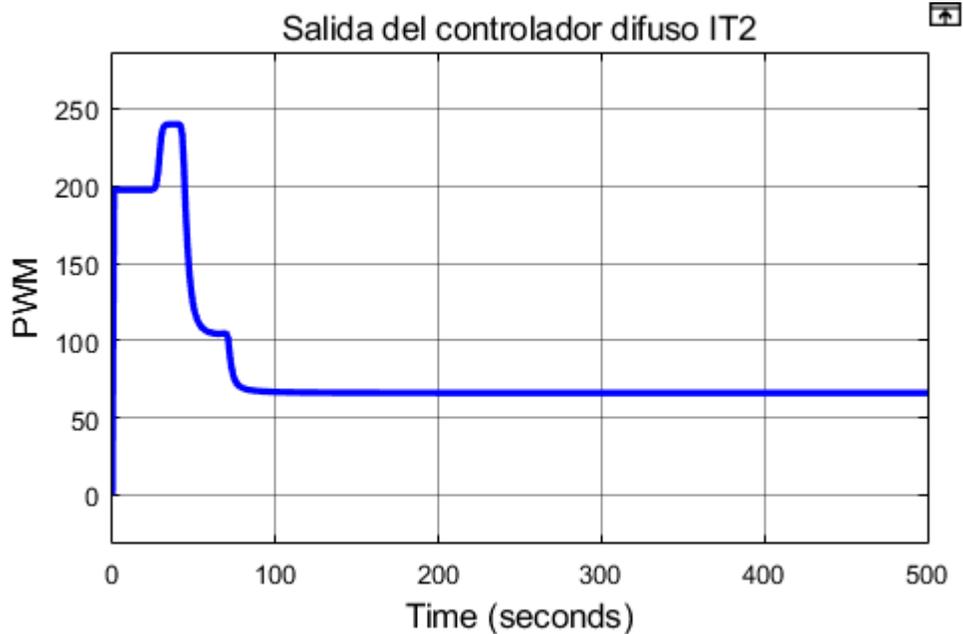


Figura 80 Respuesta del controlador difuso IT2 ante un Sp de 15 cm

Al observar las figuras anteriores se resalta que el orden de disparo de las reglas es correcto, así como también que la cantidad de funciones de membresía, su forma y distribución en el rango del universo de discurso, proporcionan un control aceptable, lo cual se aprecia en el tiempo de respuesta del sistema, en el error en estado estable y en la acción de control, donde es claro que los efectos sobre el actuador no son agresivos ni oscilantes.

3.1.14 Análisis de rendimiento

En base a la metodología planteada, primeramente se consideran los tres indicadores de rendimiento más usuales (ISE, IAE y ITAE), y luego tras considerar que según Oscar Castillo ²⁵⁸ el diseño que tiene en cuenta IAE da un resultado intermedio, en este caso, el tiempo de establecimiento no es tan grande como con ISE y no es tan pequeño como con ITAE, y lo mismo se aplica para la respuesta de sobreimpulso. Razón por la cual se establece IAE para analizar el rendimiento, la ecuación para su cálculo se observa en la ecuación 68.

²⁵⁸ Castillo y Melin.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

Ecu. (68)

En la simulación se anexan los bloques que se observan en la figura 81 para estudiar el rendimiento mediante IAE.

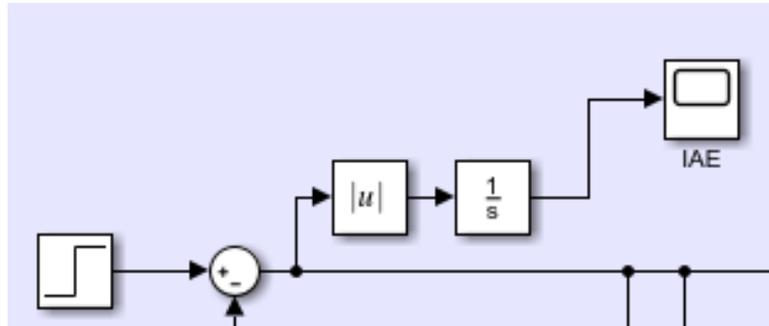


Figura 81 Diagrama de bloques de la implementación para el estudio del IAE

Los resultados se observan en la figura 82. Obteniendo un error absoluto acumulado de 435 cm con un tiempo de establecimiento de aproximadamente 100 segundos, donde al observar que existe un lento asentamiento tras los 50 segundos se estima que el tiempo de establecimiento indica que el rendimiento se puede mejorar.

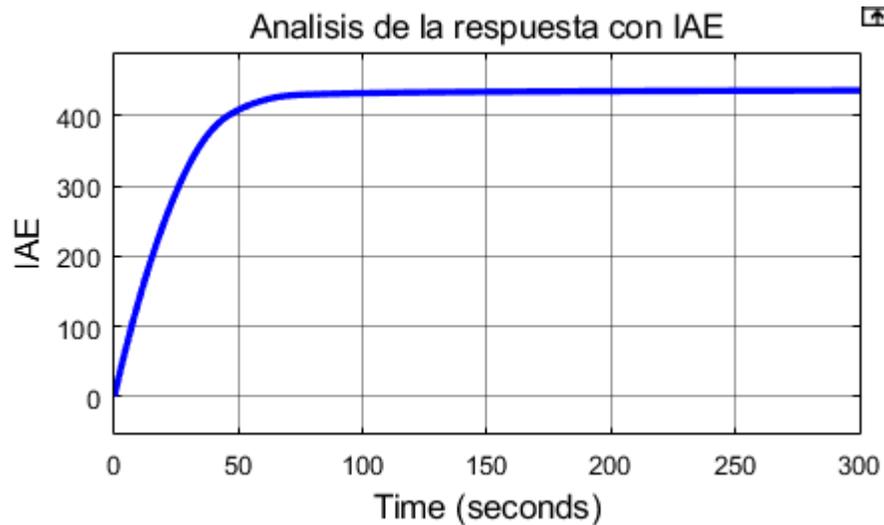


Figura 82 Análisis de la respuesta con IAE

3.1.15 Ajuste de los parámetros de ser necesario.

Según los análisis del paso anterior y a pesar de que los resultados anteriores son aceptables, basados en el hecho de que fueron obtenidos con una metodología desarrollada para obtener resultados únicamente aceptables, tras la implementación de la misma por no expertos interesados en el tema, se puede hacer uso de ganancias a las entradas y salidas del sistema difuso IT2, lo cual no solo es útil para ampliar el rango del control difuso, sino también para mejorar la respuesta del mismo. Siendo lo anterior un método ideal para que aquellos que implementen la metodología mejoren sus resultados fácilmente, sin necesidad de conocer a fondo el tema y ser expertos en el dimensionamiento y distribución de las funciones de membresía. Las ganancias se implementan como se observa en el diagrama de bloques inferior de la figura 83, y los resultados se observan en la figura 84.

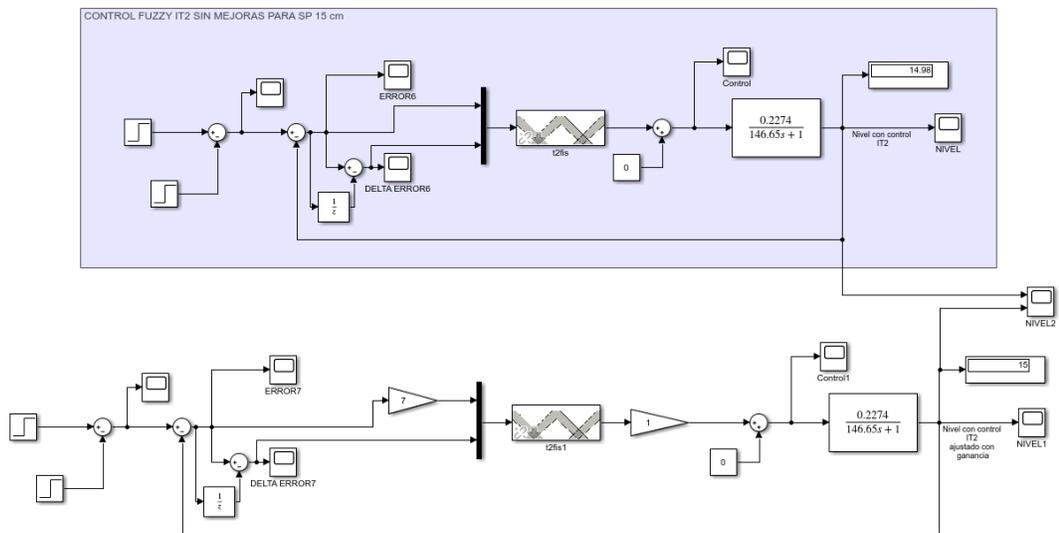


Figura 83 Diagramas en bloques del Sistema de control difuso IT2 con implementación de ganancias

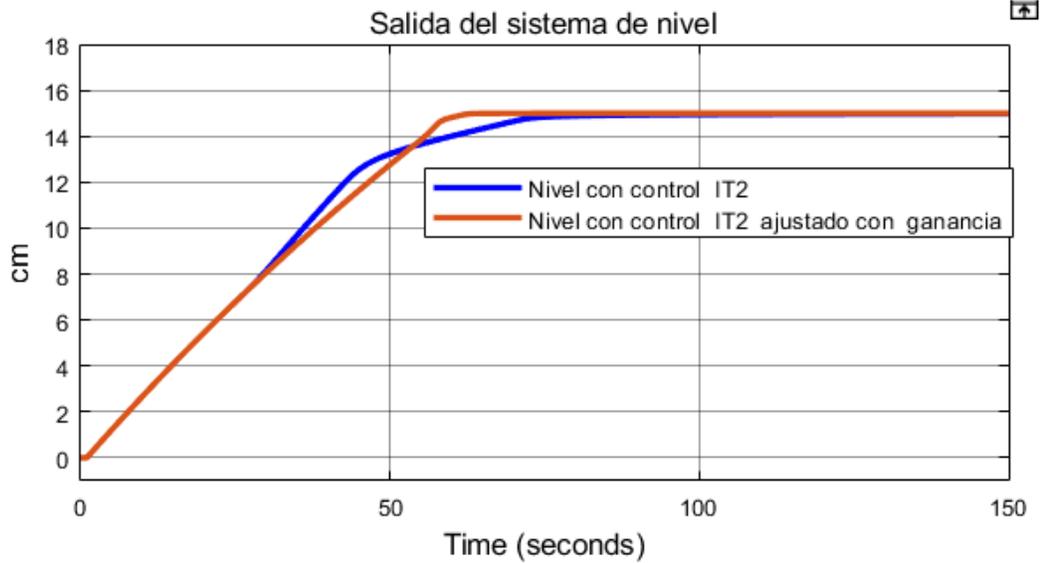


Figura 84 Comparación de la respuesta del sistema con un control difuso IT2 con y sin ganancias

Obteniendo una mejora en la respuesta del sistema, lo cual también se corrobora al comparar el análisis de su rendimiento, el cual se observa en la figura 85. Donde se corrige el lento asentamiento del error absoluto tras transcurrir los 50 segundos.

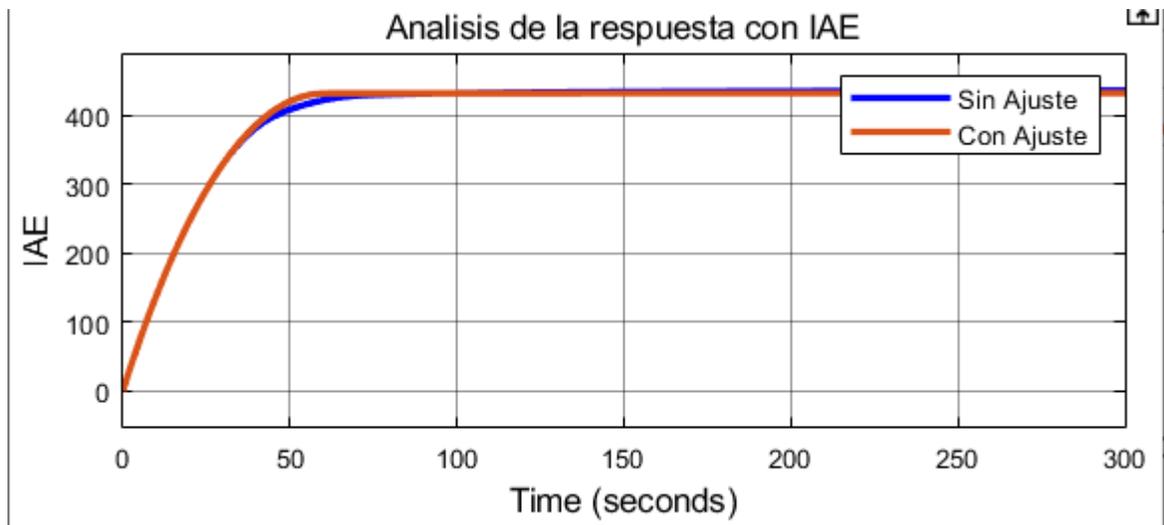


Figura 85 Comparación del análisis del rendimiento con IAE con y sin ajuste

3.1.16 Ampliación del rango de control

Una vez obtenido el sistema de control difuso IT2 deseado en el Setpoint para el cual fue diseñado, se proceden a parametrizar los valores de las ganancias de entrada y salida de tal forma que se obtenga una ecuación que describa los valores ideales de ganancia para cada Setpoint dentro del rango de trabajo del proceso. Para cumplir con dicha actividad se documentaron los valores de ganancia para diferentes Setpoint en todo el rango de trabajo del proceso, para posteriormente caracterizar la ecuación que modela el comportamiento de las ganancias.

En la tabla 22 se plasman las ganancias requeridas por el error y la salida del controlador para cada valor de Setpoint (para ver a detalle información sobre cada uno de los valores de Setpoint ver **anexo F**).

Tabla 22. Ganancia del error y la salida del controlador para valores de Setpoint

Setpoint	Ganancia error	Ganancia mando
1	15	0.05
1.5	15	0.1
2	15	0.15
2.5	15	0.15
3	15	0.2
3.5	15	0.25
4	15	0.3
4.5	15	0.3
5	15	0.35
5.5	15	0.4
6	14	0.45
6.5	14	0.45
7	14	0.5
7.5	13	0.55
8	13	0.55
8.5	12	0.6
9	12	0.65
9.5	11	0.7
10	11	0.7
10.5	10	0.75
11	10	0.8
11.5	9	0.85

12	9	0.85
12.5	8.5	0.9
13	8	0.95
13.5	8	0.95
14	6	1
14.5	6	1
15	6	1
15.5	6	1
16	6	1
16.5	6	1.05
17	6	1.05

Fuente: autor

Obtenida la tabla de ganancias se procede a realizar la respectiva caracterización de cada una en funciones que las interpreten, de esa manera se tiene que:

- Caracterización del error

Usando la herramienta Matlab se calcula la función que interpreta en mejor medida el Setpoint con la ganancia del error, la cual se parametriza como se observa en la figura 86.

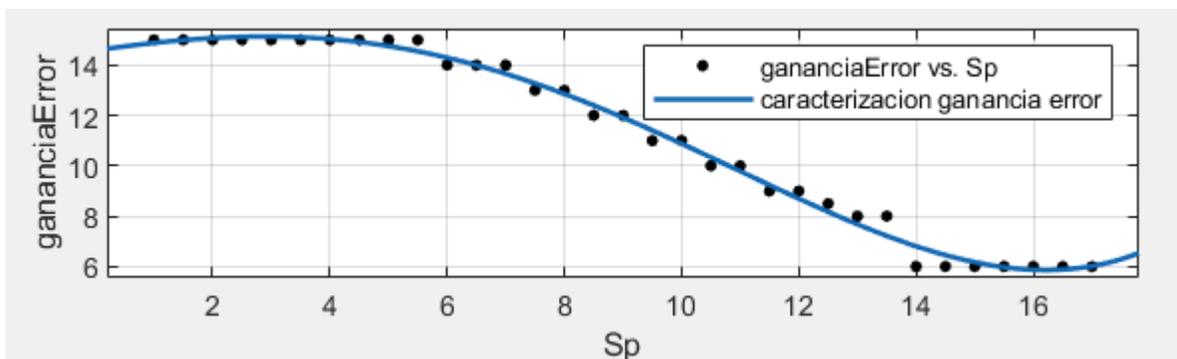


Figura 86 Función de la ganancia del error con respecto al Setpoint

Matlab entrega la información de la caracterización, la cual se da a continuación.

Linear model Poly4:

$$f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = 0.0004345 (9.737e-05, 0.0007716)

p2 = -0.008746 (-0.02096, 0.00347)

p3 = -0.02577 (-0.1749, 0.1234)

p4 = 0.327 (-0.3717, 1.026)

p5 = 14.59 (13.58, 15.59)

Goodness of fit:

SSE: 3.033

R-square: 0.9925

Adjusted R-square: 0.9914

RMSE: 0.3291

Los resultados obtenidos arrojan una ecuación polinomial del cuarto orden, la cual es configurada en la Simulink como se observa en la figura 87.

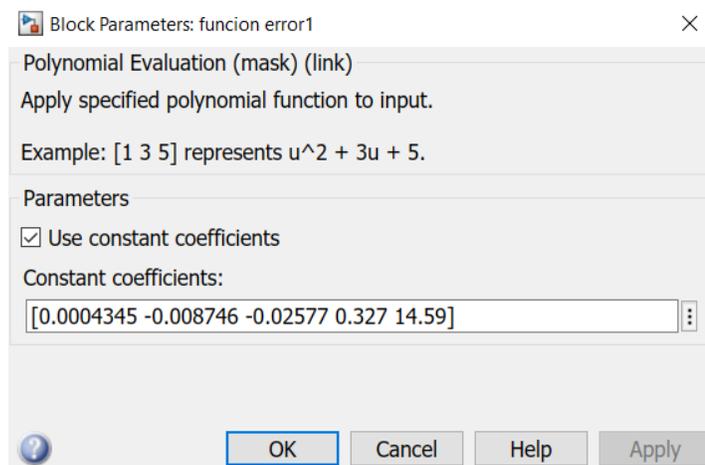


Figura 87. bloque de funciones polinomiales para la ganancia del error

- Caracterización de la salida del controlador

Repitiendo el mismo proceso usado para la caracterización del error se tiene para la acción de control la parametrización que se observa en la figura 88.

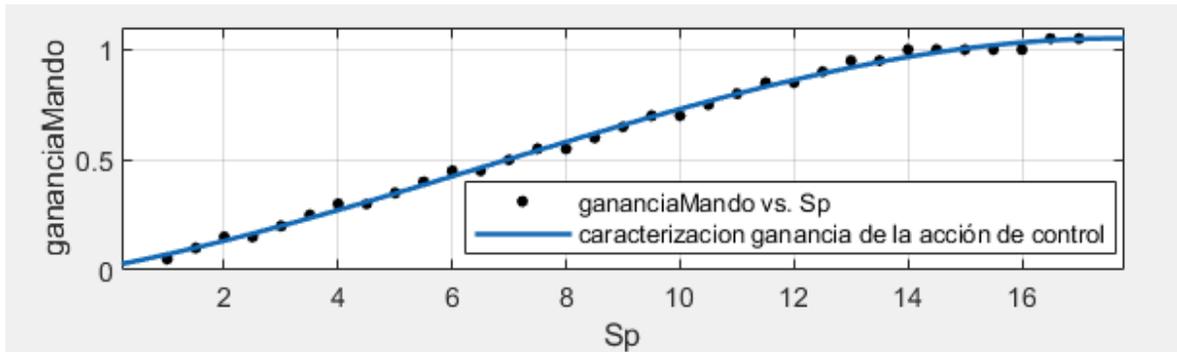


Figura 88. Función de la ganancia de la salida del controlador con respecto al Setpoint

Matlab entrega la información de la caracterización, la cual se da a continuación.

Linear model Poly3:

$$f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -0.0002166 \quad (-0.0002959, -0.0001372)$$

$$p2 = 0.004318 \quad (0.00215, 0.006485)$$

$$p3 = 0.04978 \quad (0.03261, 0.06696)$$

$$p4 = 0.01753 \quad (-0.01993, 0.05499)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.01025

R-square: 0.9969

Adjusted R-square: 0.9966

RMSE: 0.0188

Los resultados obtenidos arrojan una ecuación polinomial del tercer orden, la cual es configurada en la Simulink como se observa en la figura 89.

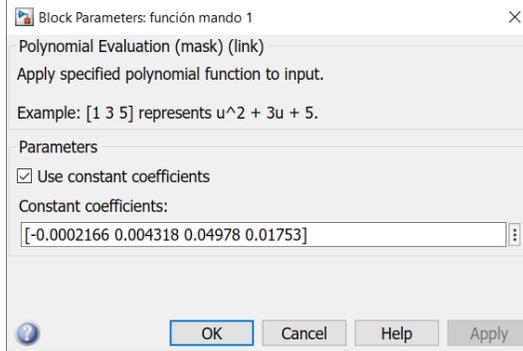


Figura 89 bloque de funciones polinomiales para la ganancia de la salida del controlador

Tras caracterizar las ganancias, se procede a ensamblar el diagrama de bloques general, el cual se observa en la figura 90.

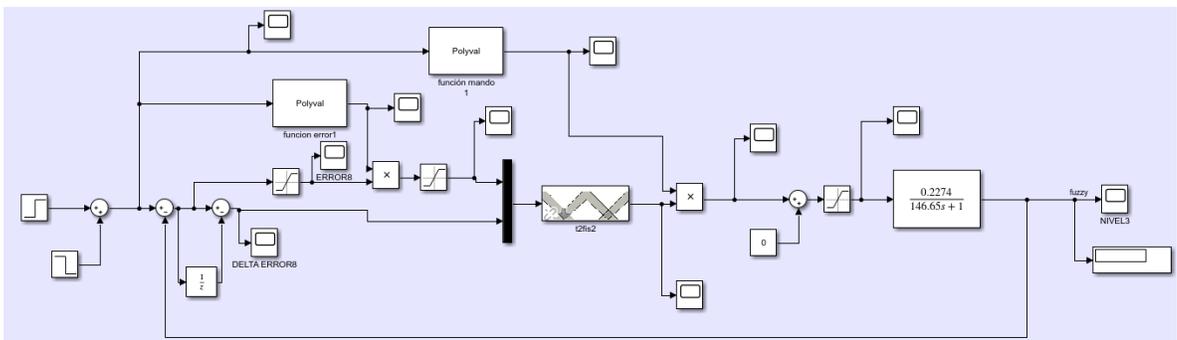


Figura 90 Diagrama de bloques del sistema con control difuso tipo 2 de intervalo de amplio rango

Donde su acción de control con un amplio rango se valida enviando dos puntos de establecimiento en diferentes valores distintos a los 15 cm para el cual fue diseñado, los resultados se observan en la figura 91.

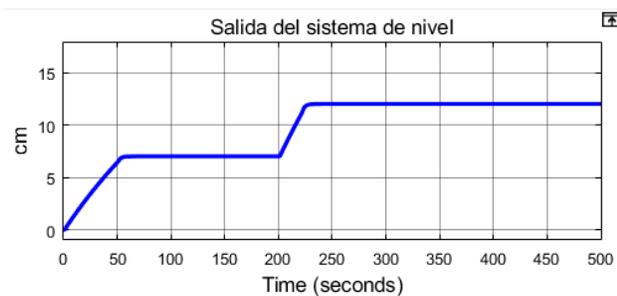


Figura 91 Respuesta del sistema ante dos S_p , un primer de 7 cm y un segundo de 12 cm

CAPITULO IV. Validación de la metodología implementada para controladores difusos tipo II.

4.1 Diseño del proceso de validación

Para el proceso de validación se tuvieron en cuenta los márgenes de respuesta del sistema ante los diferentes tipos de control (difuso IT2, difuso tipo 1 y PID) para el régimen transitorio, así como también un estudio estadístico de los datos obtenidos para el régimen estable.

Los márgenes de respuesta en el régimen transitorio tenidos en cuenta fueron tiempo de retardo (t_d), tiempo de levantamiento (t_r), máximo pico (m_p), tiempo pico (t_p) y tiempo de establecimiento (t_s) ya que es un sistema con entrada de tipo escalón unitario. Estos 5 márgenes se definen como:

- Tiempo de retardo: tiempo que tarda el sistema en llegar por primera vez al 50% del valor final.
- Tiempo de levantamiento: tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%.
- Máximo pico: Es el valor pico máximo de la curva de respuesta
- Tiempo pico: Es el tiempo que tarda el sistema en llegar al máximo pico
- Tiempo de establecimiento: tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 a 5%) y permanezca dentro de él.

El estudio estadístico se realizó con el fin de conocer la repetibilidad del sistema y la repetibilidad de respuesta ante los diferentes controladores, así como también detallar más a fondo la respuesta en estado estable, mediante indicadores como lo son la desviación estándar y el error promedio. En general se hicieron 9 experimentos, los cuales se señalan a continuación:

- Respuesta del sistema con un control difuso IT2 en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante una perturbación.
- Respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante una perturbación.
- Respuesta del sistema con un control PID en condiciones normales.
- Respuesta del sistema con un control PID ante ruido.
- Respuesta del sistema con un control PID ante una perturbación.

El estudio estadístico de todos los experimentos anteriores se realizó en base a la siguiente plantilla de ficha técnica muestral (tabla 23).

Tabla 23 Plantilla de la ficha técnica muestral

Nombre del Experimento	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Establecer el procedimiento para el muestro del experimento
Estimadores muestréales	<p>Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo.</p> <p>Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema.</p> <p>Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema.</p> <p>Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.</p>

Fuente: Creación propia.

4.2 Pruebas en condiciones normales, perturbación y ruido de los 3 métodos de control

4.2.1 Puesta del sistema de control difuso IT2 en planta real

- Condiciones normales

Inicialmente se pretendía usar el apartado External de Matlab para utilizar directamente la placa Arduino con la librería que trae incluida Simulink pero al

realizar la primera toma de data el sistema presento un error con el bloque del controlador difuso tipo 2, por tal motivo se optó por utilizar la comunicación serial del Arduino por medio de un pequeño programa preestablecido en la placa a continuación se muestra un diagrama de flujo que representa el funcionamiento del código cargado en el microcontrolador (para revisar el código ver **anexo H**).

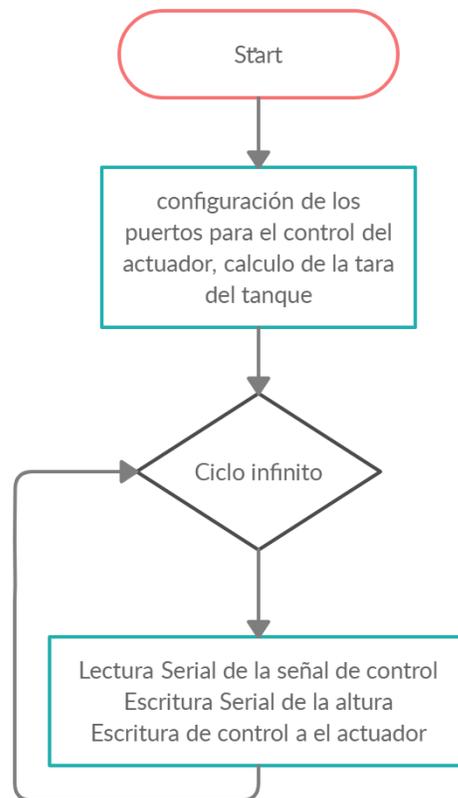


Figura 92 Diagrama de flujo del programa preestablecido en la placa para la comunicación

El proceso de la toma de datos se inicia desde simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 15 cm de nivel del tanque y se captura un total de 3000 datos por muestra.

La funcionalidad de este método de control consiste en inicialmente leer un primer dato del sensor desde la placa Arduino y luego transmitirlo a simulink a través del bloque comunicación serial de lectura, el dato ya estando en el bloque de comunicación es escalado puesto que se encuentra en valores de voltios y el lazo se encuentra configurado para centímetros, el dato ya en centímetros se introduce

al sumador para realizar el respectivo cálculo del error y posteriormente calcularse la derivada del mismo pues en conjunto son las dos entradas del controlador difuso. Interpretada las dos entradas por el controlador se emite una señal que es introducida al bloque de comunicación serial de escritura donde finalmente es recepcionado por la placa Arduino la cual redirrecciona hacia el elemento final de control.

Las consideraciones a tener en cuenta en este método fueron que el tiempo de muestreo que se establece en Matlab (0.1 segundos) debía concordar con el tiempo del programa de la placa, el valor tara del tanque es calculado en el Arduino previo al inicio del proceso por lo que el dato emitido se encuentra sin este y por último dentro del mismo programa se enviara un dato de inicialización de la comunicación.

En la figura 93 se muestra el diagrama de bloques del lazo de control real con controlador difuso tipo 2.

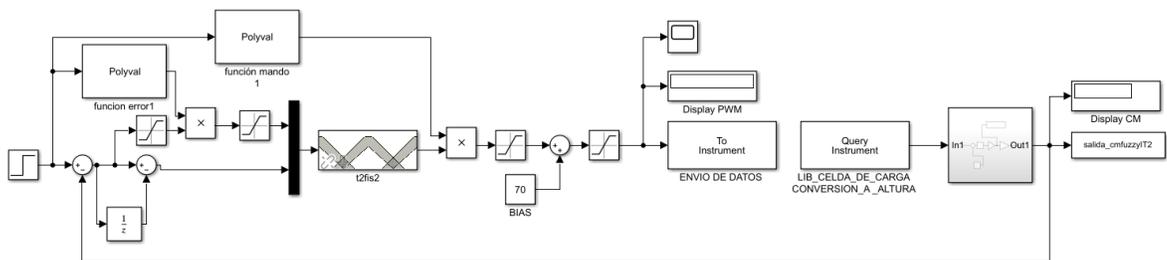


Figura 93 Lazo de control real con controlador difuso IT2

- Ruido

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico pues a la lectura del puerto analógico de la placa (puerto por donde ingresa la señal del sensor) se le agrego una señal aleatoria con un valor máximo del 0.5% del valor máximo de lectura (5 voltios).

- Perturbación

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico pues en el instante de tiempo 140 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.711 cm en promedio y en el instante de tiempo 150 es retirada del sistema.

4.2.2 Puesta del sistema de control difuso tipo 1 en planta real

El diseño del sistema de control difuso tipo 1 se puede observar en el **anexo G**.

- Condiciones normales

En la implementación del lazo de control con este tipo de controlador si se pudo hacer uso del apartado external de Matlab por lo que no se requirió realizar programa alguno para el funcionamiento del mismo.

El proceso de la toma de datos se inicia desde Simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 15 cm de nivel del tanque y se captura un total de 3000 datos por muestra.

La funcionalidad de este método de control consiste en inicialmente leer un primer dato del sensor desde la placa Arduino utilizando el bloque de lectura de puerto analógico, posteriormente es escalado puesto que se encuentra en valores de voltios y el lazo se encuentra configurado para centímetros, el dato ya en centímetros se introduce al sumador para realizar el respectivo cálculo del error y posteriormente calcularse la derivada del mismo pues en conjunto son las dos entradas del controlador difuso. Interpretada las dos entradas por el controlador, emite una señal que es introducida al bloque de escritura en puerto PWM para finalmente dar la orden al elemento final de control

Las consideraciones a tener en cuenta en este método fueron que el tiempo de muestreo que se establece en Matlab es de 0.1 segundos y el valor tara del tanque es calculado con anterioridad poniendo en marcha el proceso en lazo abierto múltiples veces y obteniendo un valor promedio, este dato es restado al valor de salida del puerto de lectura analógica de Simulink.

En la figura 94 se muestra el diagrama de bloques del lazo de control real con controlador difuso tipo 1.

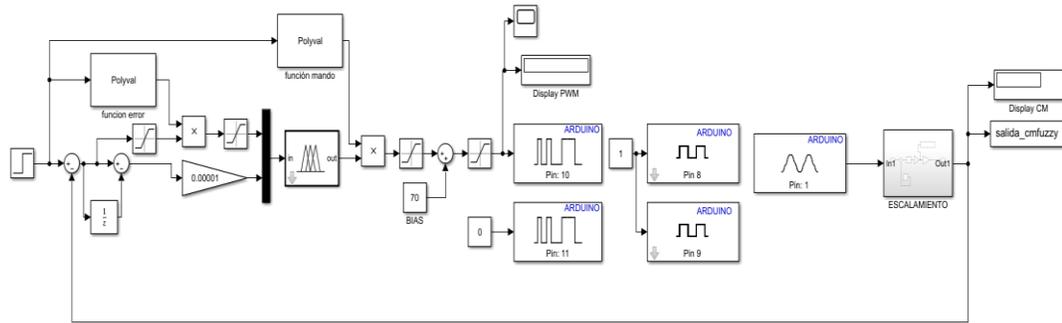


Figura 94 Lazo de control real con controlador difuso IT1

- Ruido

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico pues a la lectura del puerto analógico de la placa (puerto por donde ingresa la señal del sensor) se le agrega una señal aleatoria con un valor máximo del 0.5% del valor máximo de lectura (5 voltios).

- Perturbación

La arquitectura de comunicación y funcionamiento del lazo de control es exactamente igual a la del experimento de condiciones normales, la diferencia radica en el apartado físico, la diferencia radica en que en el instante de tiempo 140 se introduce una perturbación positiva la cual genera un pico de 0.711cm en promedio y en el instante de tiempo 150 es retirada del sistema.

4.2.3 Puesta del sistema de control PID en planta real

- Condiciones normales

En la implementación del lazo de control con este tipo de controlador si se pudo hacer uso del apartado externo de Matlab por lo que no se requirió realizar programa alguno para el funcionamiento del mismo.

El proceso de la toma de datos se inicia desde simulink solicitándole al controlador llevar el sistema a un valor de 15 cm de nivel del tanque y se captura un total de 3000 datos por muestra.

La funcionalidad de este método de control consiste en inicialmente leer un primer dato del sensor desde la placa Arduino utilizando el bloque de lectura de puerto

4.3 Validación estadística de los resultados

4.3.1 Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control difuso IT2

4.3.1.1 Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control difuso IT2

- Condiciones normales

En la figura 96 se observa la respuesta general del sistema en condiciones normales.

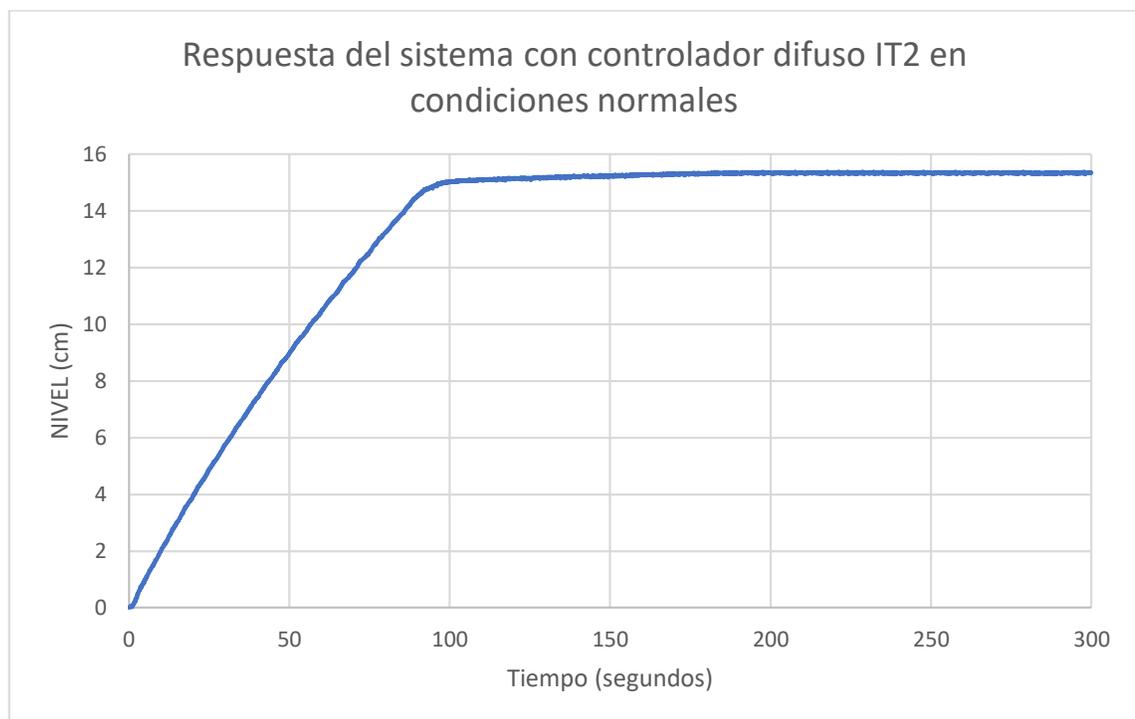


Figura 96 Respuesta del sistema con controlador difuso IT2 en condiciones normales

Valor final (VF)= 15.33 cm

➤ Td:

50% de VF= 7.665 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =41.5 segundos

➤ Tr:

90% de VF= 13.797 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) =84.3 segundos

10% de VF= 1.533 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) =7.7segundos

$Tr = 84.3 - 7.7 = 76.6$ segundos

➤ Tp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Mp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Ts:

Para el cálculo de ts se establece un rango alrededor del valor final del 2% por lo que se tiene que:

2% de VF= 0.3066

De esta manera el rango es 15.6366 para el límite superior y 15.0234 para el límite inferior

Como infiere en las datas el tiempo en el que se cumple con este rango es de 101.7 segundos, pero como se observa en la figura 97 a pesar de que la respuesta se encuentra dentro del rango establecido siguen existiendo residuales dinámicos, por lo que este método no es 100% efectivo para determinar el valor de ts, de esta manera se establece como método para el cálculo del tiempo de establecimiento la evaluación grafica de la curva de respuesta para identificar el punto en el que los armónicos u oscilaciones se establecen alrededor de un valor promedio. Para este caso en particular guiados por la figura 97 se determina que ts es 180 segundos.

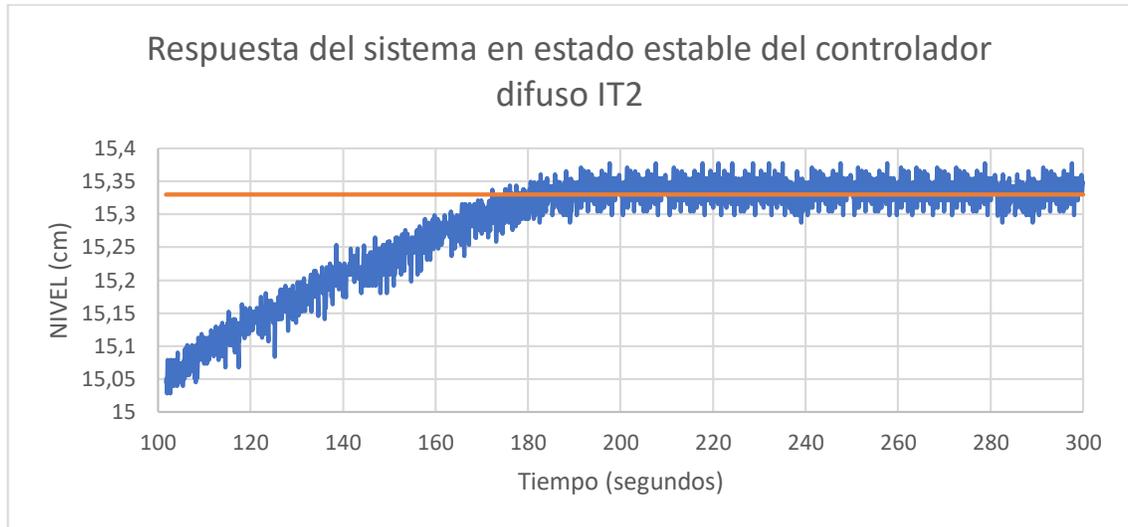


Figura 97 Respuesta del sistema en estado estable del controlador difuso IT2

En la figura 98 se plasman todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

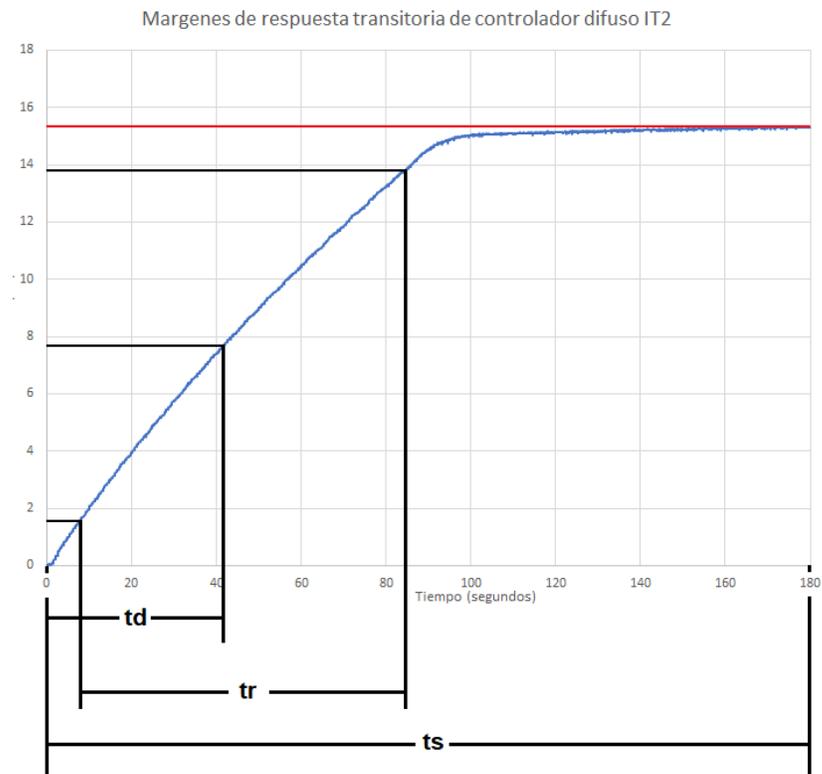


Figura 98 Márgenes de respuesta transitoria de controlador difuso IT2

- Ruido

En la figura 99 se observa la respuesta general del sistema ante ruido

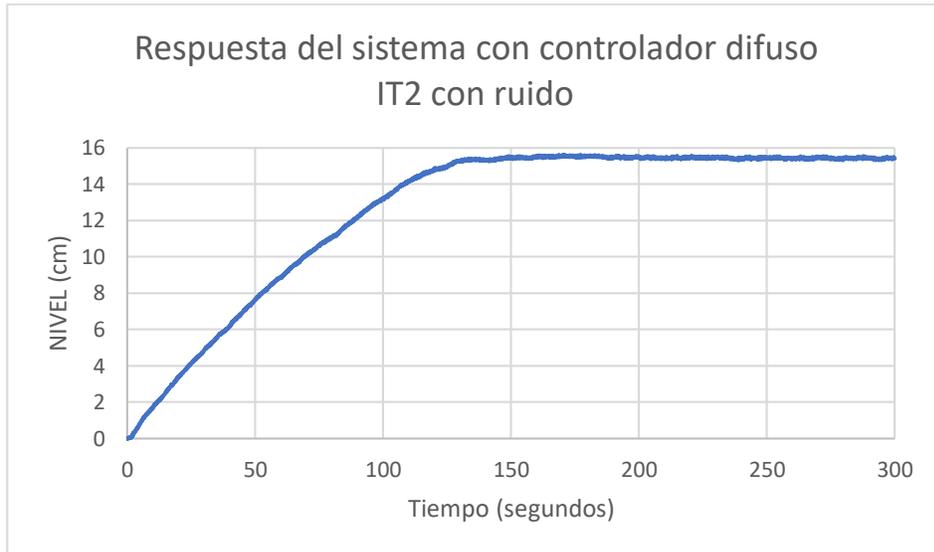


Figura 99 Resposta del sistema con controlador difuso IT2 con ruido

Valor final (VF)= 15.43 cm

➤ Td:

50% de VF= 7.715 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =50.6 segundos

➤ Tr:

90% de VF= 13.887 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) =106.6 segundos

10% de VF= 1.543 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) =8.8segundos

$Tr = 106.6 - 8.8 = 97.8$ segundos

➤ Tp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Mp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Ts:

Aplicando el método grafico se establece en 200 segundos (ver figura 100)

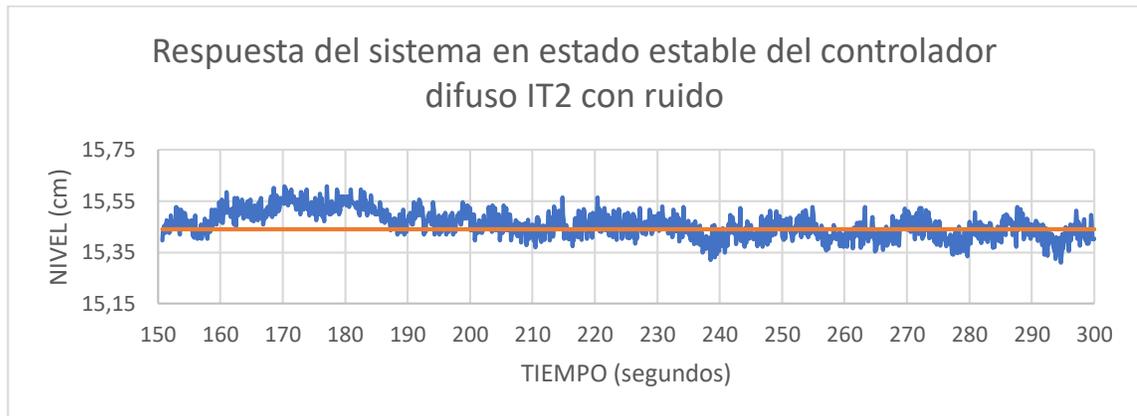


Figura 100 Respuesta del sistema en estado estable del controlador difuso IT2 con ruido

En la figura 101 se señalan todos los márgenes de respuesta transitoria en la curva de respuesta

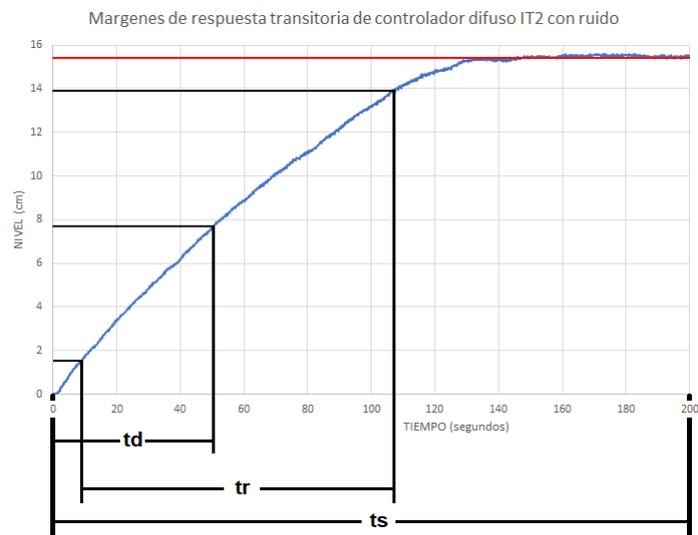


Figura 101 Márgenes de respuesta transitoria de controlador difuso IT2 con ruido

4.3.1.2 Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control difuso IT2

- Condiciones normales

La ficha técnica del experimento del control difuso IT2 en condiciones normales se observa en la tabla 24.

Tabla 24 ficha técnica muestral experimento control difuso IT2 en condiciones normales

Respuesta del sistema con un control difuso IT2 en condiciones normales	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control difuso tipo 2 de intervalo durante 300 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos.
Estimadores muestrales	<p>Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo.</p> <p>Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema.</p> <p>Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema.</p> <p>Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.</p>

Fuente: Creación propia.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 102.

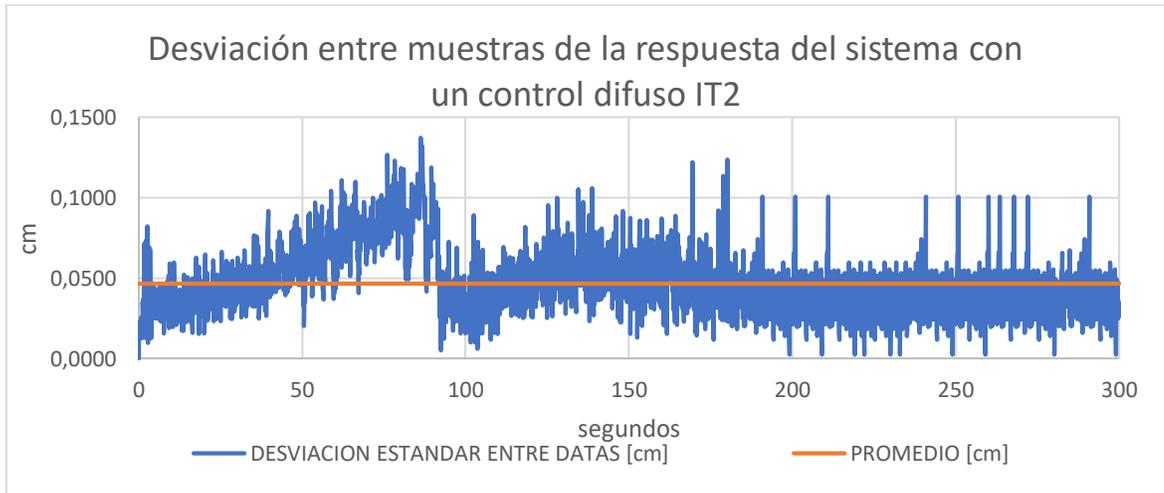


Figura 102 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control difuso IT2

Teniendo un promedio de desviación de ± 0.0466 cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después los 180 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 103, donde el promedio de dicha desviación es de ± 0.01731 cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia ± 0.01731 cm.

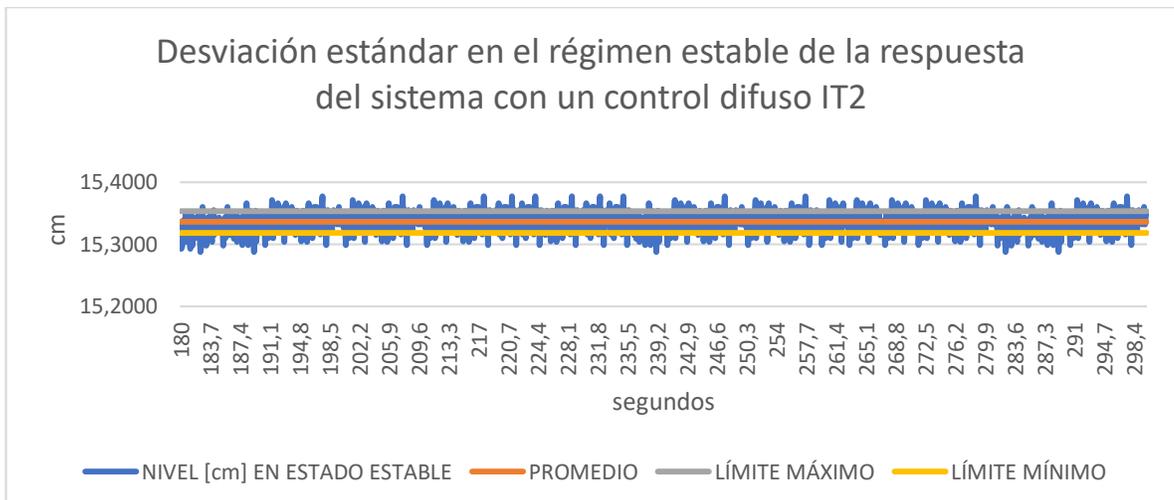


Figura 103 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso IT2

El error en régimen estable se observa en la figura 104, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 15 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 2.24%

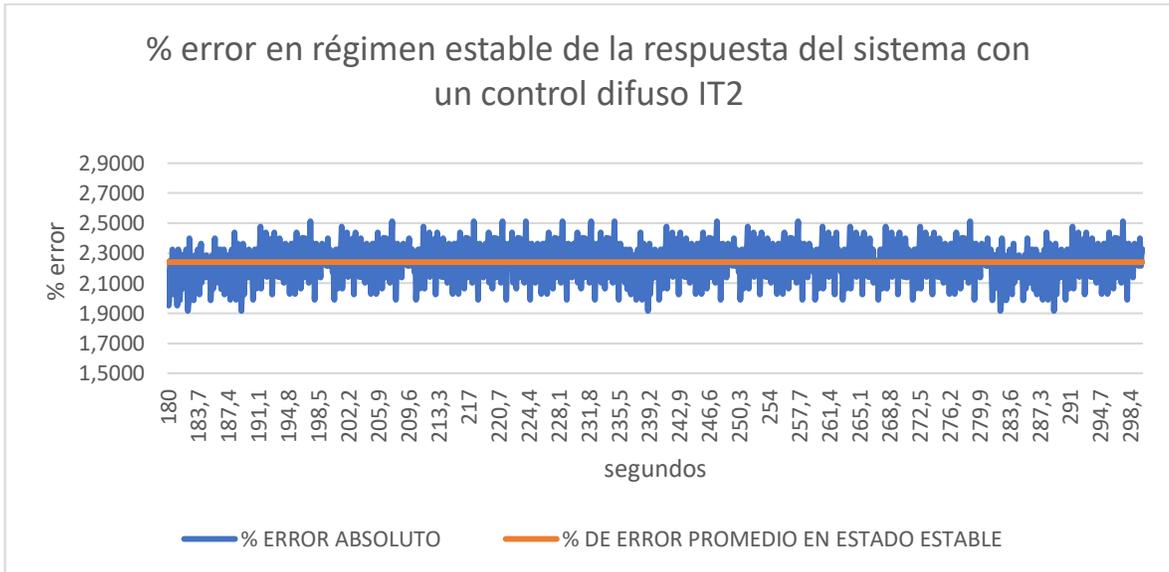


Figura 104 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso IT2

- Ruido

La ficha técnica del experimento del control difuso IT2 ante ruido se observa en la tabla 25.

Tabla 25 ficha técnica muestral experimento control difuso IT2 ante ruido

Respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante ruido	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control difuso IT2 durante 300 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se le agrega una señal aleatoria

	con un rango del 5% del valor máximo de lectura del puerto analógico
Estimadores muestréales	<p>Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo.</p> <p>Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema.</p> <p>Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema.</p> <p>Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.</p>

Fuente: Creación propia.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 105.

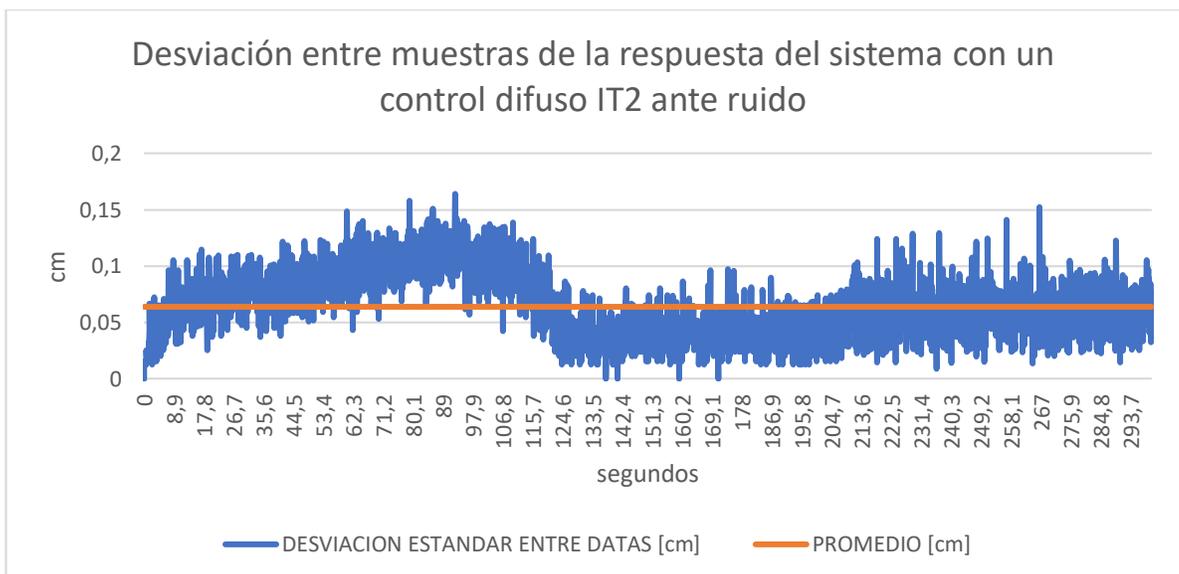


Figura 105 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante ruido

Teniendo un promedio de desviación de ± 0.06394 cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después los 200 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 106, donde el promedio de dicha desviación es de ± 0.03996 cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia ± 0.03996 cm.

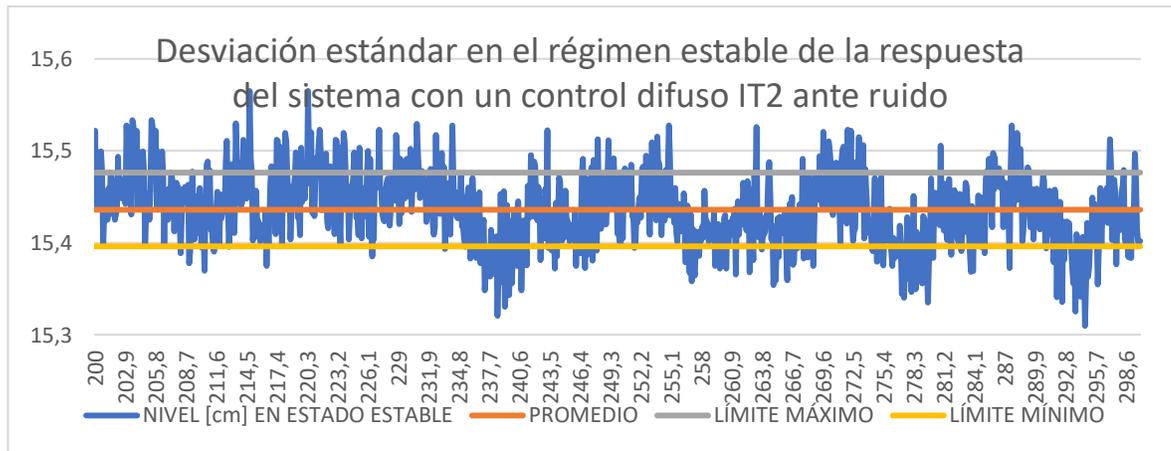


Figura 106 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante ruido

El error en régimen estable se observa en la figura 107, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 15 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 2.96%

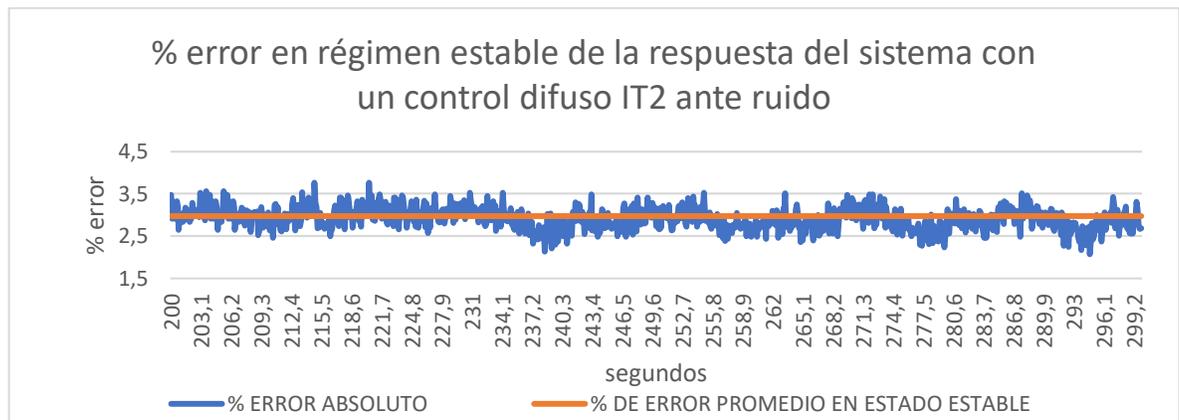


Figura 107 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante ruido

- Perturbación

La ficha técnica del experimento del control difuso IT2 ante perturbación se observa en la tabla 26.

Tabla 26 ficha técnica muestral experimento control difuso IT2 ante perturbación

Respuesta del sistema con un control difuso IT2 ante perturbación	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control difuso IT2 durante 300 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se ingresa una perturbación con amplitud de 0.71cm en el instante de tiempo 140 y 10 segundos después es retirada del sistema.
Estimadores muestréales	Tiempo de respuesta a la perturbación: indica el tiempo que le toma al sistema responder y corregir la perturbación

Fuente: Creación propia.

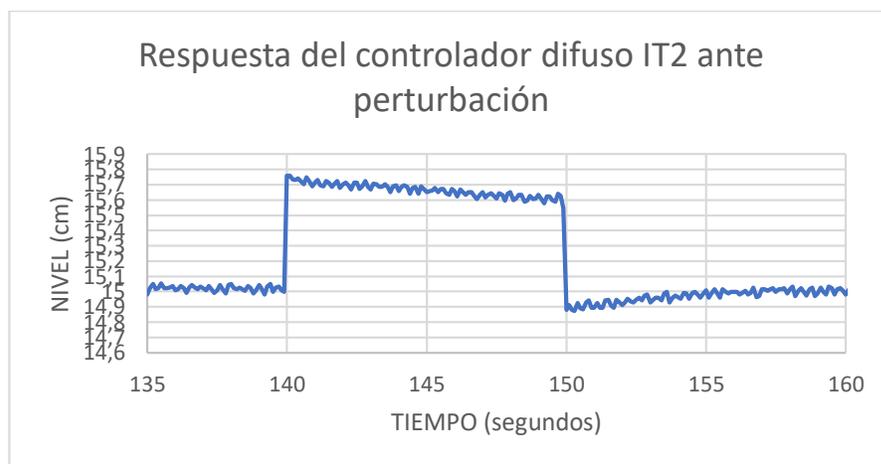


Figura 108 Respuesta del controlador difuso IT2 ante perturbación

Como se observa en la figura 108 en el instante de tiempo 140 se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 0.71cm llevando el nivel del tanque a un valor de 15.75 cm y permaneciendo en el sistema durante 10 segundos, en este trascurso de tiempo el controlador solo logra reducir la perturbación un 30% llevando el sistema a un valor de 15,54cm por lo que en definitiva no logro compensar el valor de la perturbación

4.3.2 Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control difuso tipo 1

4.3.2.1 Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control difuso tipo 1

- Condiciones normales

La respuesta en condiciones normales se observa en la figura 109.

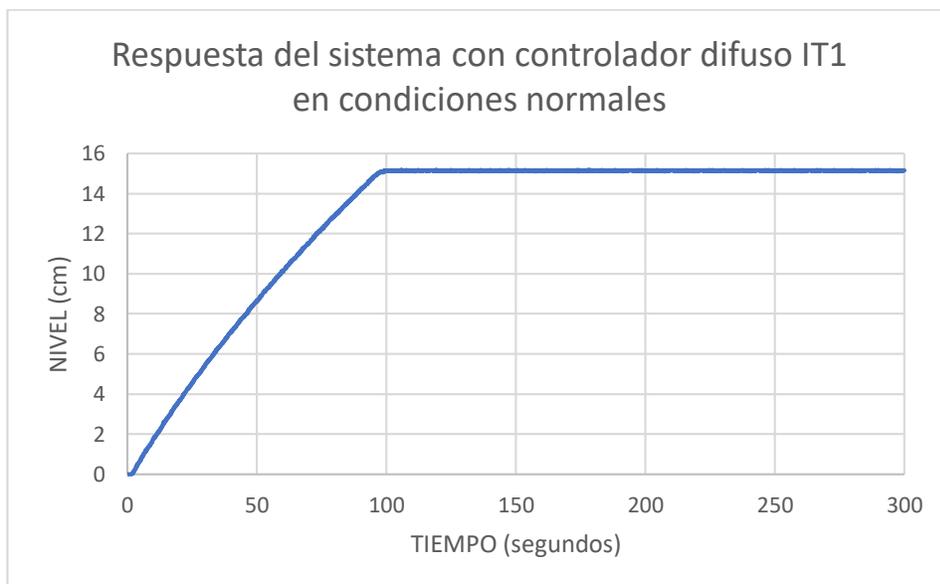


Figura 109 Respuesta del sistema con controlador difuso IT1 en condiciones normales

Valor final (VF)= 15.14 cm

➤ Td:

50% de VF= 7.57 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =43 segundos

➤ Tr:

90% de VF= 13.626 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) =85.7 segundos

10% de VF= 1.514 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) =9segundos

$Tr = 85.7 - 9 = 76.7$ segundos

➤ Tp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Mp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Ts:

Aplicando el método grafico se establece en 100 segundos (ver figura 110)

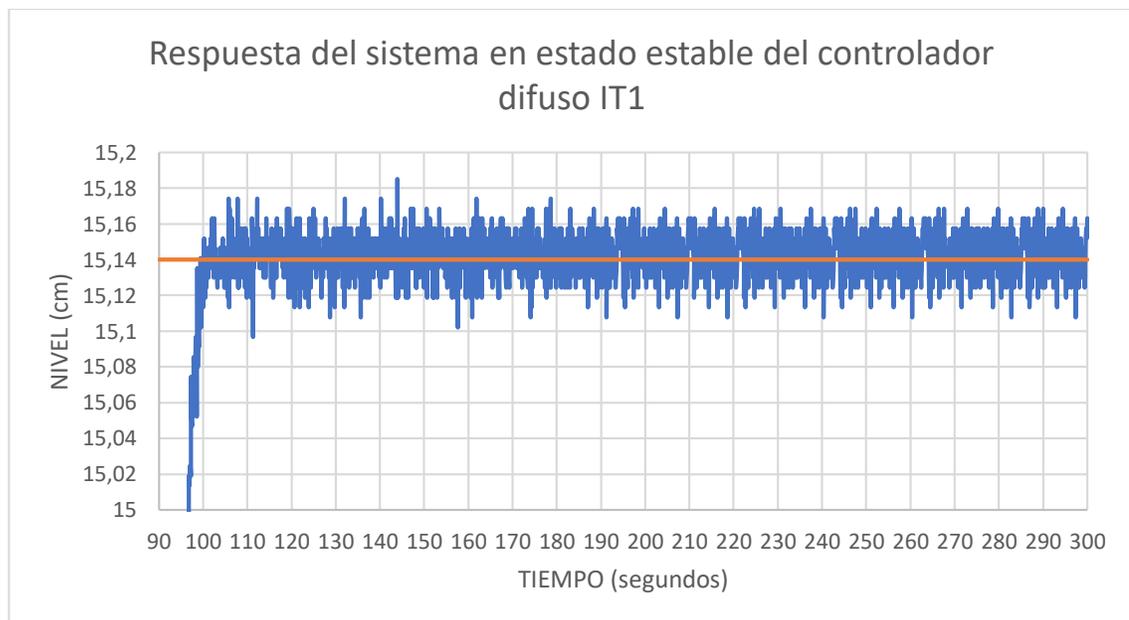


Figura 110 Respuesta del sistema en estado estable del controlador difuso IT1

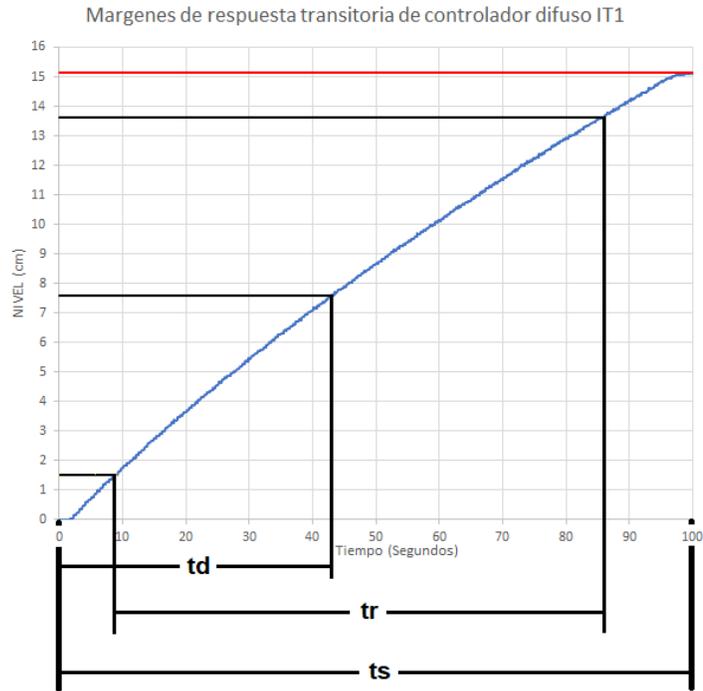


Figura 111 Márgenes de respuesta transitoria de controlador difuso IT1

- Ruido

La respuesta general del sistema ante ruido se observa en la figura 112.

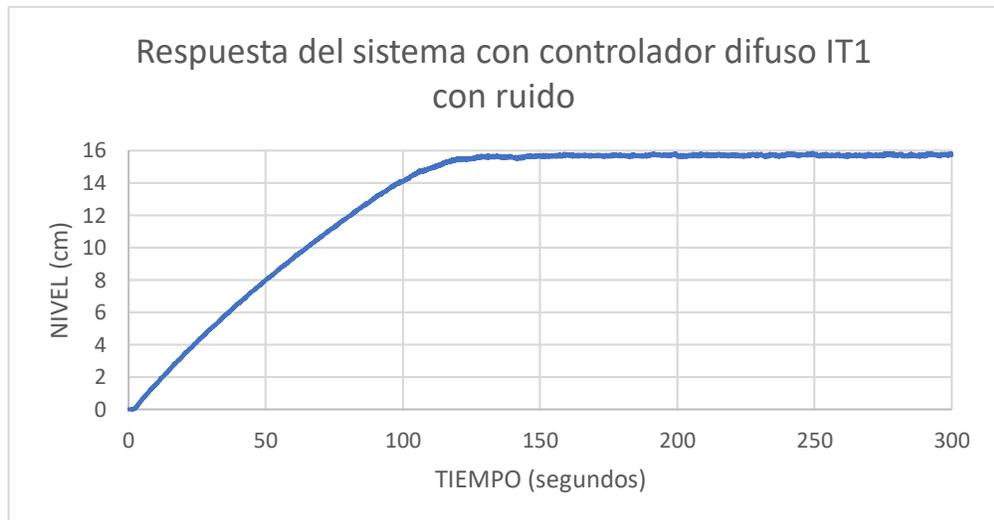


Figura 112 Respuesta del sistema con controlador difuso IT1 con ruido

Valor final (VF)= 15.69 cm

➤ Td:

50% de VF= 7.845 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =49.1 segundos

➤ Tr:

90% de VF= 14.121 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) =100.1 segundos

10% de VF= 1.559 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) =10.2 segundos

$Tr = 100.1 - 10.2 = 89.9$ segundos

➤ Tp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Mp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Ts:

Aplicando el método grafico se establece en 160 segundos (ver figura 113)

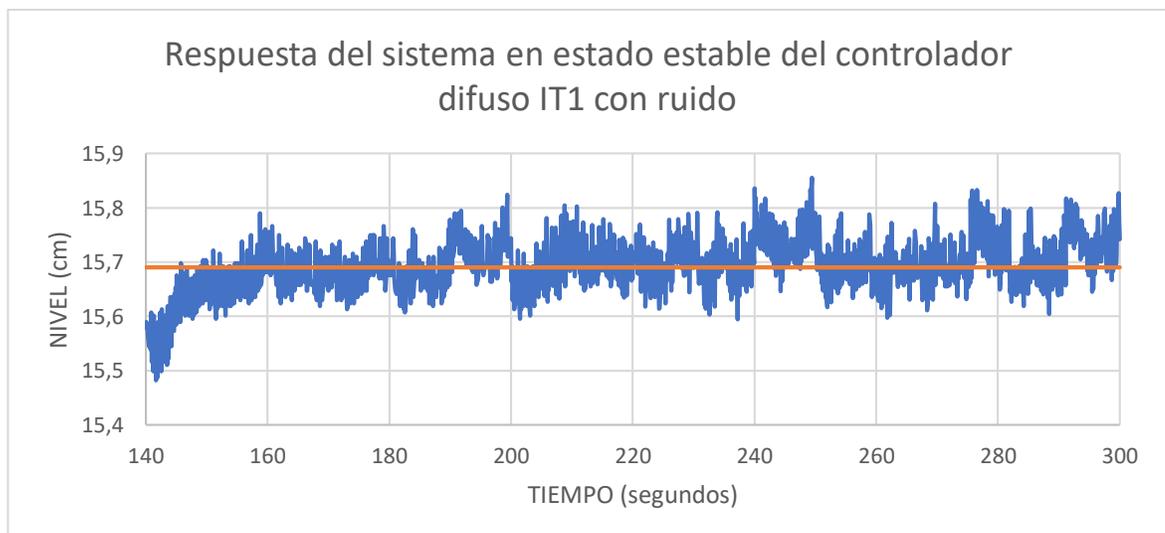


Figura 113 Respuesta del sistema en estado estable del controlador IT1 con ruido

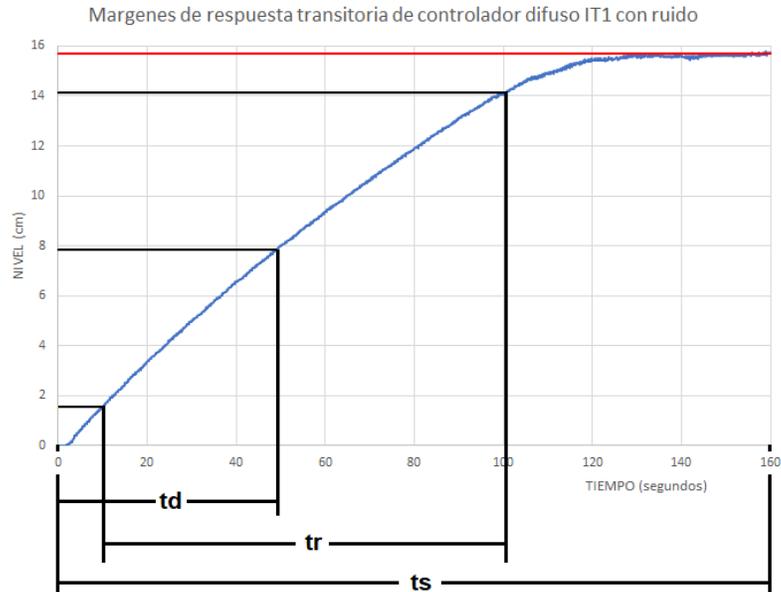


Figura 114 Márgenes de respuesta transitoria de controlador difuso IT1 con ruido

4.3.2.2 Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control difuso tipo 1

- Condiciones normales

La ficha técnica del experimento del control difuso tipo 1 en condiciones normales se observa en la tabla 27.

Tabla 27 ficha técnica muestral experimento control difuso tipo 1 en condiciones normales

Respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 en condiciones normales	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control difuso tipo 1 durante 300 segundos,

	teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos.
Estimadores muestréales	<p>Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo.</p> <p>Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema.</p> <p>Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema.</p> <p>Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.</p>

Fuente: Creación propia.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 115.

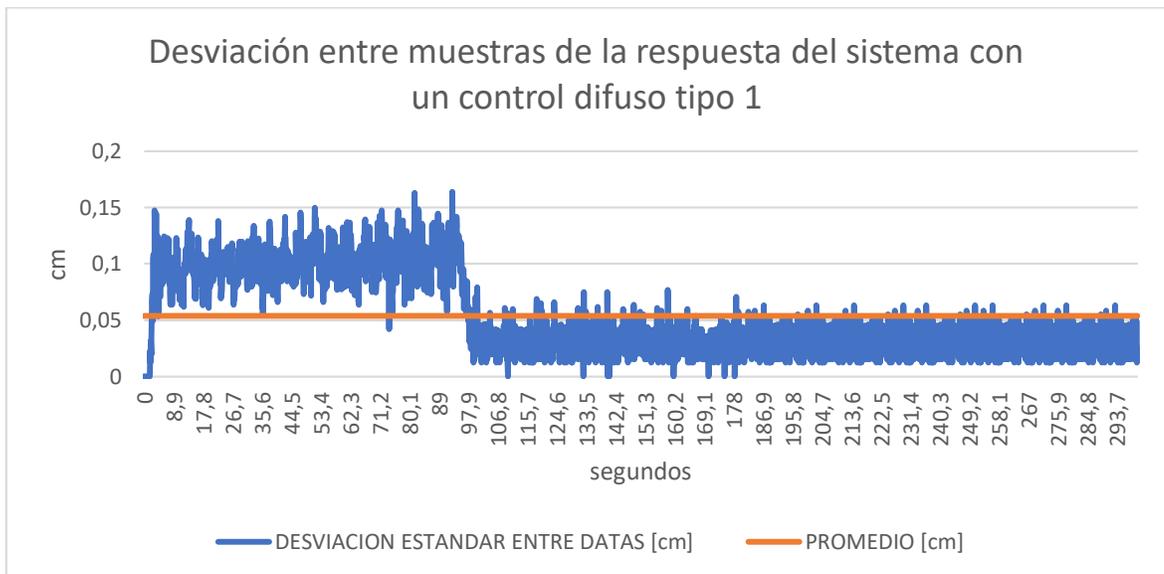


Figura 115 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1

Teniendo un promedio de desviación de ± 0.05358 cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento. Se considera el régimen estable después los 100 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 116, donde el promedio de dicha desviación es de ± 0.01220 cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia ± 0.01220 cm.

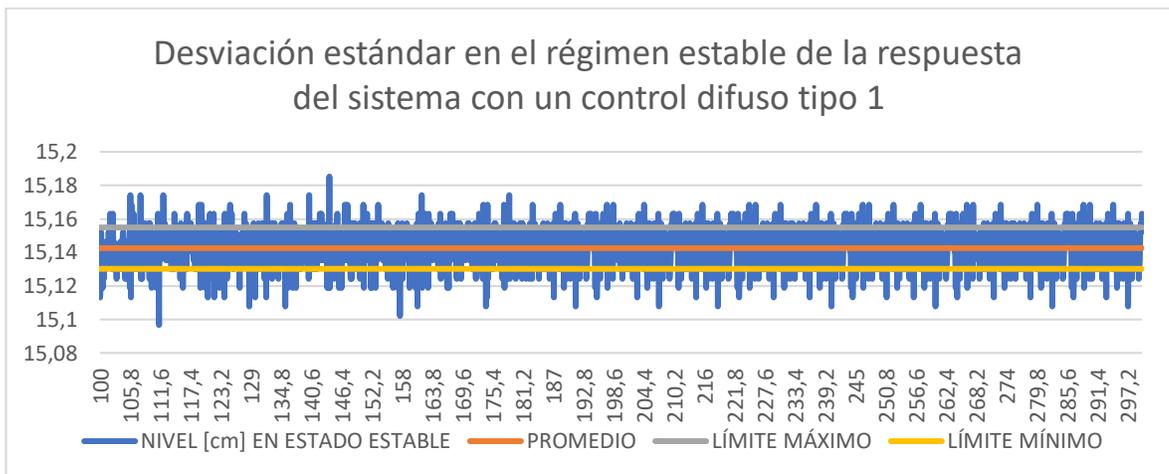


Figura 116 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1

El error en régimen estable se observa en la figura 117, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 15 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0.95%

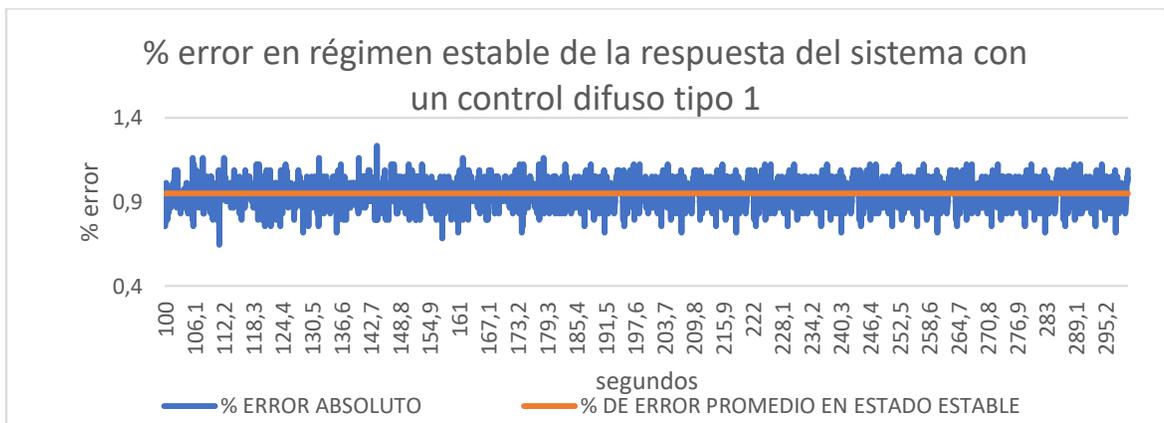


Figura 117 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1

- Ruido

La ficha técnica del experimento del control difuso tipo 1 ante ruido se observa en la tabla 28.

Tabla 28 ficha técnica muestral experimento control difuso tipo 1 ante ruido

Respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante ruido	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control difuso T1 durante 300 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se le agrega una señal aleatoria con un rango del 5% del valor máximo de lectura del puerto analógico
Estimadores muestrales	<p>Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo.</p> <p>Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema.</p> <p>Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema.</p> <p>Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.</p>

Fuente: Creación propia.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 118.

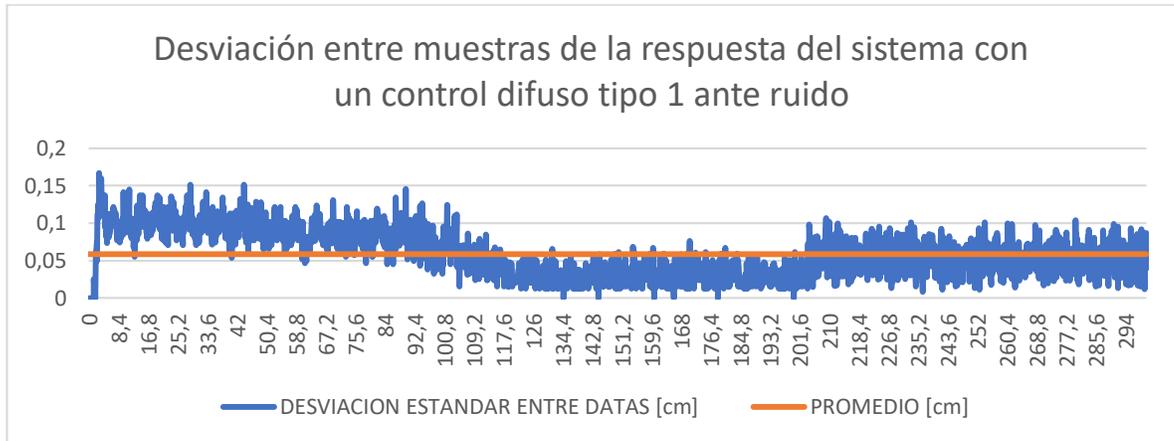


Figura 118 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante ruido

Teniendo un promedio de desviación de ± 0.05828 cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento. Se considera el régimen estable después los 160 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 120, donde el promedio de dicha desviación es de ± 0.04480 cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia ± 0.04480 cm.

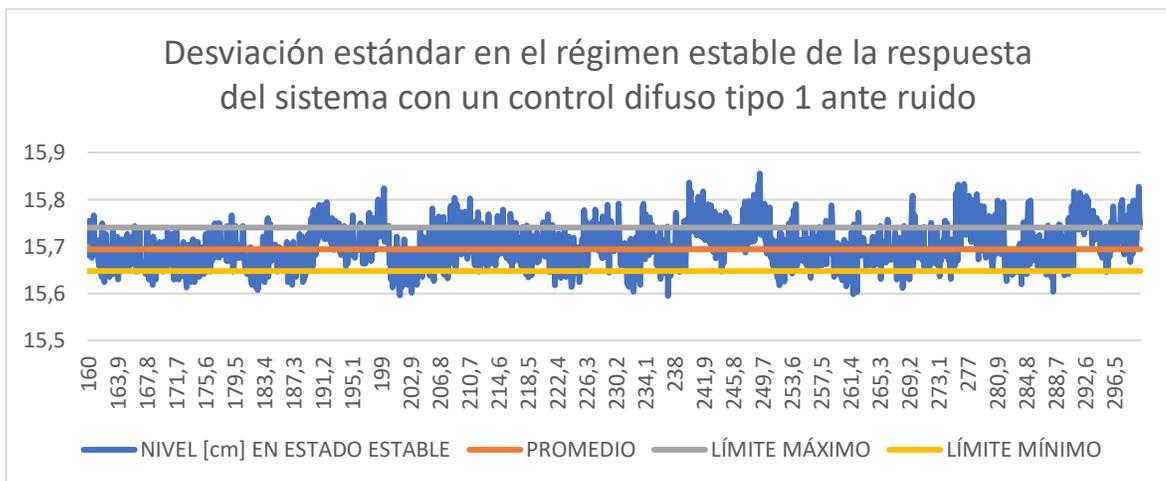


Figura 119 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante ruido

El error en régimen estable se observa en la figura 120, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 15 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 4.66%

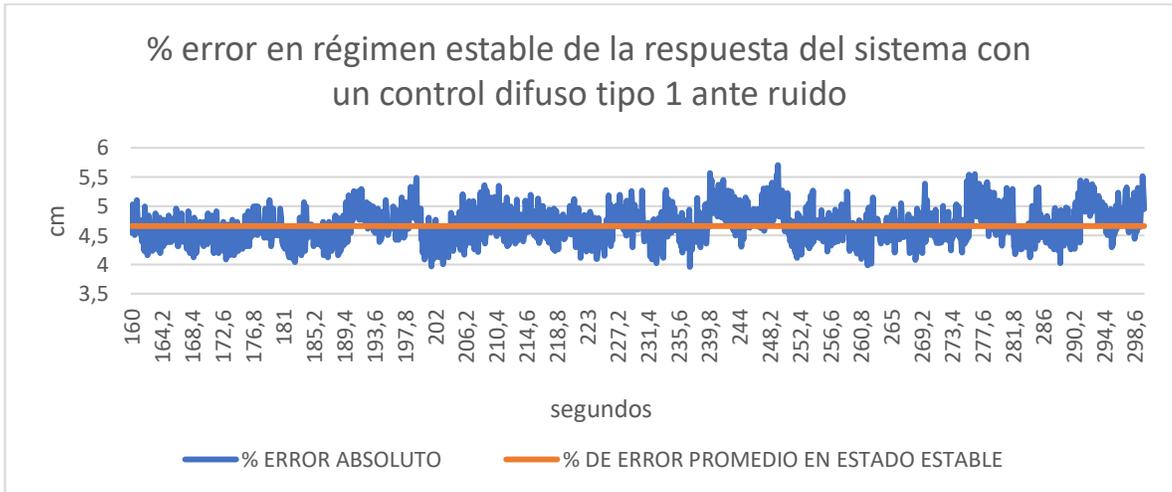


Figura 120 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante ruido

- Perturbación

La ficha técnica del experimento del control difuso tipo 1 ante perturbación se observa en la tabla 29.

Tabla 29 Ficha Técnica Muestral experimento T1 ante perturbación

Respuesta del sistema con un control difuso tipo 1 ante perturbación	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control difuso tipo 1 durante 300 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se ingresa una perturbación con amplitud de 0.71cm en el instante de tiempo 140 y 10 segundos después es retirada del sistema.

Estimadores muestrales

Tiempo de respuesta a la perturbación:
indica el tiempo que le toma al sistema responder y corregir la perturbación

Fuente: Creación propia.

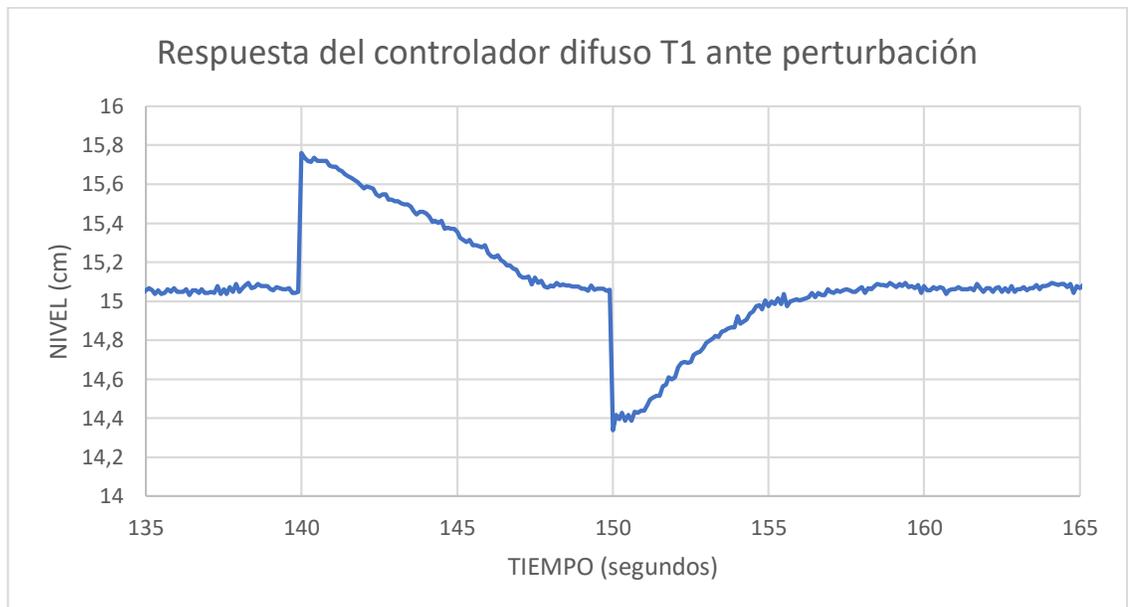


Figura 121 Respuesta del controlador difuso IT1 ante perturbación

Como se observa en la figura 121 en el instante de tiempo 140 se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 0.71cm llevando el nivel del tanque a un valor de 15.73 cm y permaneciendo en el sistema durante 10 segundos, en este transcurso de tiempo el controlador logra compensar la perturbación en su totalidad transcurridos 7.8 segundos desde que se introdujo a sistema de igual manera cuando es retirada del mismo al sistema le toma 5 segundos en recuperar el estado estable.

4.3.3 Márgenes de respuesta y estudio estadístico del sistema de control PID

4.3.3.1 Márgenes de respuesta del régimen transitorio del sistema de control PID

- Condiciones normales

Las respuestas en condiciones normales se observa en la figura 122.

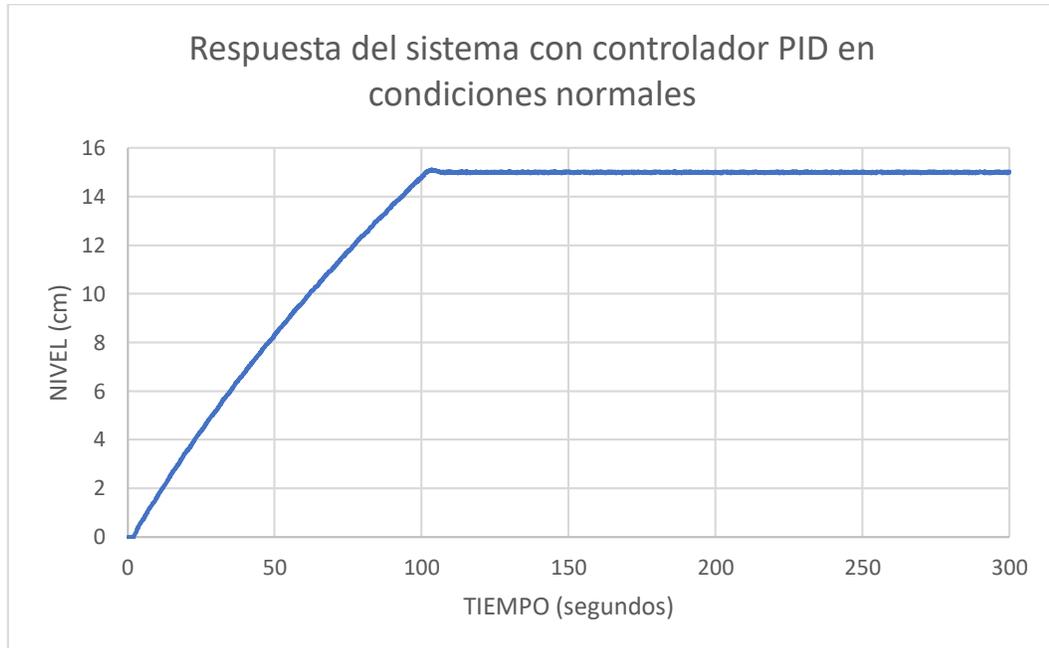


Figura 122 Respuesta del sistema con controlador PID en condiciones normales

Valor final (VF)= 14.99 cm

➤ Td:

50% de VF= 7.495 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =44.6 segundos

➤ Tr:

90% de VF= 13.626 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) =89 segundos

10% de VF= 1.499 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) =9.3 segundos

$Tr = 89 - 9.3 = 79.7$ segundos

➤ Tp:

Según la figura 123 el tiempo pico tiene un valor de 103.3 segundos

➤ M_p :

Según la figura 123 el máximo pico tiene un valor de 0.1161 cm

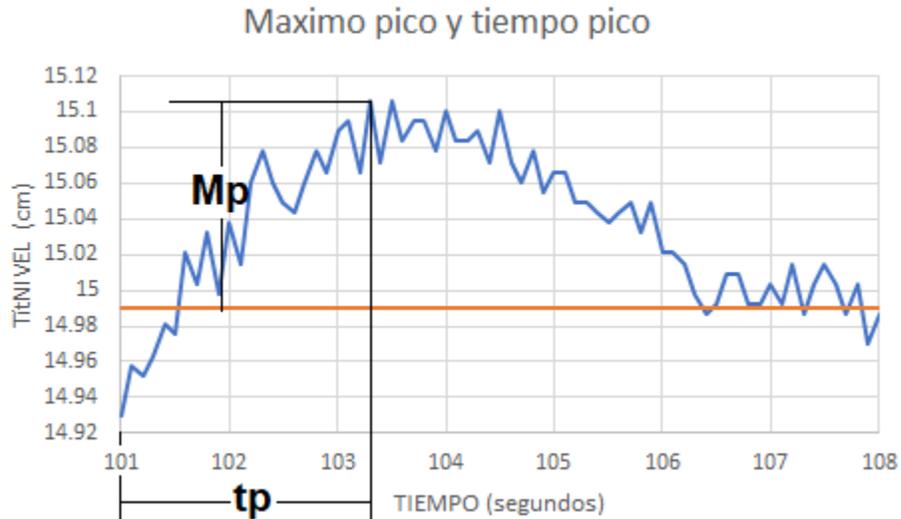


Figura 123 Máximo pico y tiempo pico de la respuesta del controlador PID

➤ T_s :

Aplicando el método grafico se establece en 106 segundos (ver figura 124)

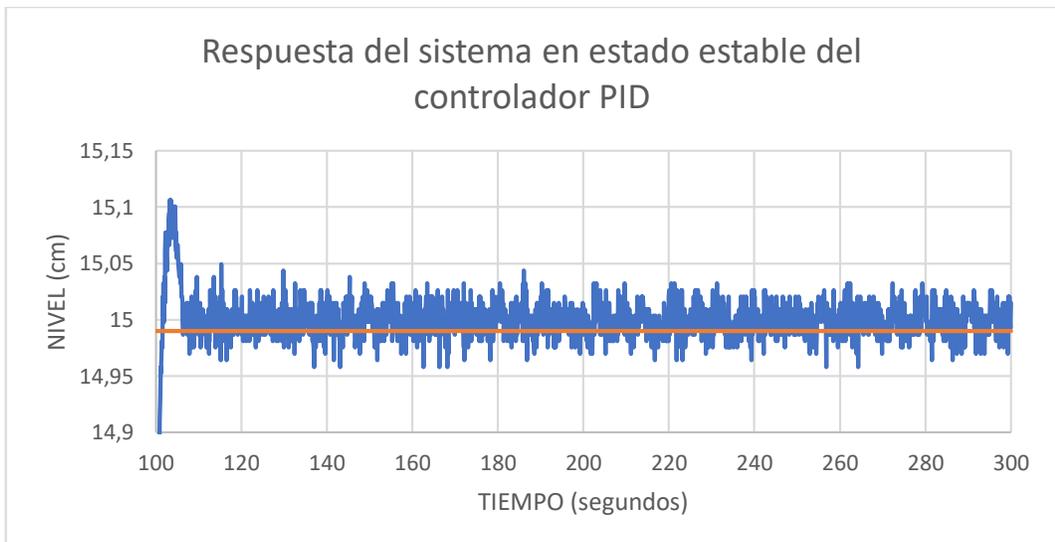


Figura 124 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID

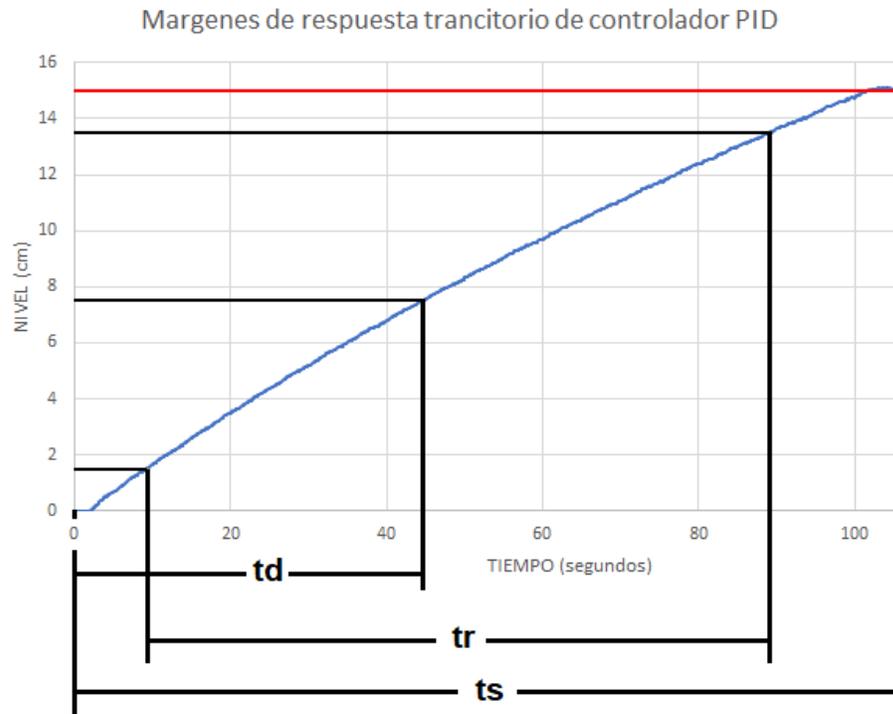


Figura 125 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID

- Ruido

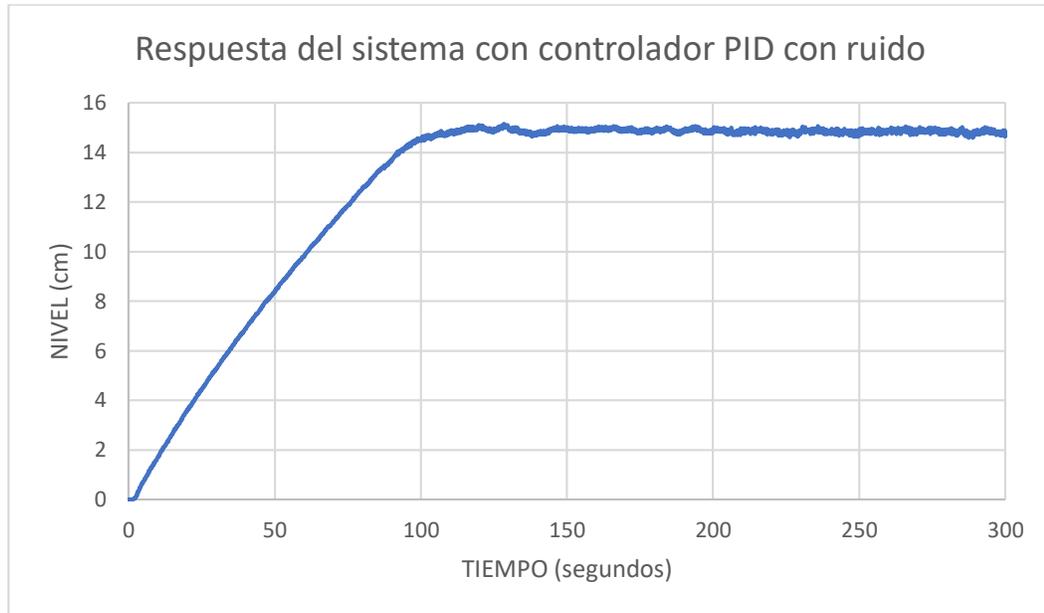


Figura 126 Respuesta del sistema con controlador PID con ruido

Valor final (VF)= 14.85 cm

➤ Td:

50% de VF= 7.425 cm

Valor en el dominio del tiempo del 50% (VF) =43.3 segundos

➤ Tr:

90% de VF= 13.365 cm

Valor en el dominio del tiempo del 90% (VF) =86.7 segundos

10% de VF= 1.485 cm

Valor en el dominio del tiempo del 10% (VF) =9 segundos

$Tr = 86.7 - 9 = 77.7$ segundos

➤ Tp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Mp:

No presenta sobre impulso por lo tanto es 0

➤ Ts:

Aplicando el método grafico se establece en 180 segundos (ver figura 127)

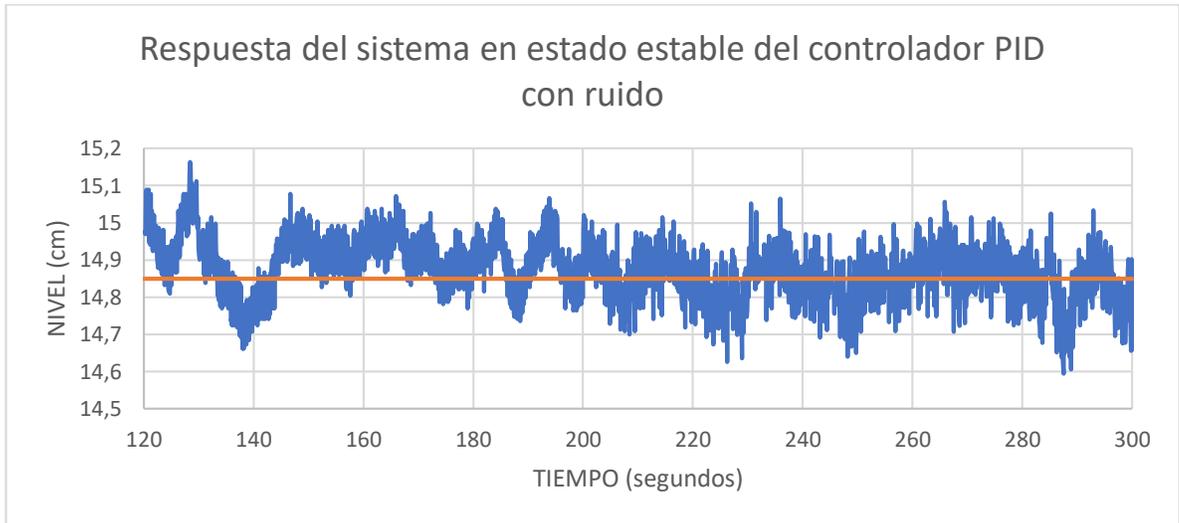


Figura 127 Respuesta del sistema en estado estable del controlador PID con ruido

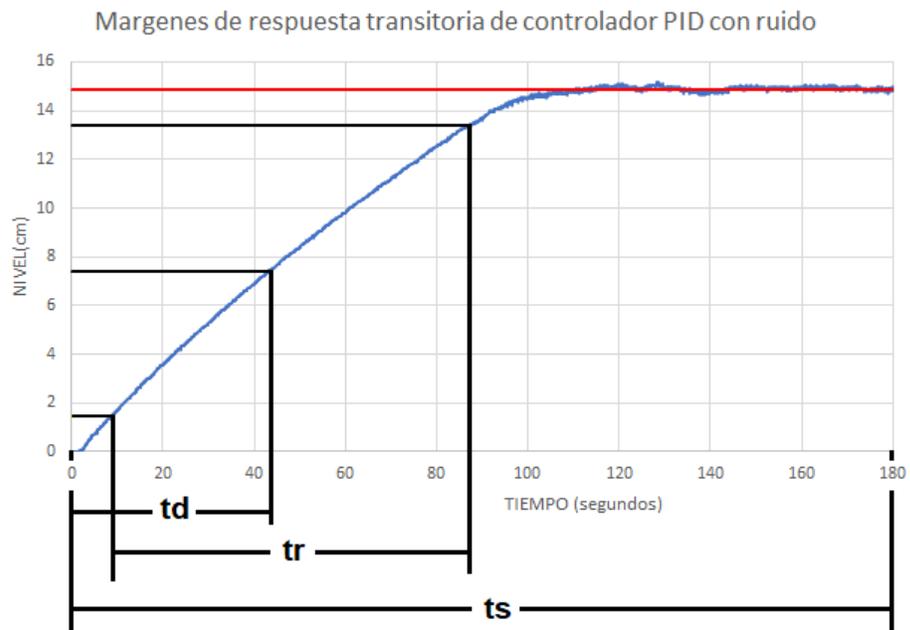


Figura 128 Márgenes de respuesta transitoria de controlador PID con ruido

4.3.3.2 Estudio estadístico del régimen estable del sistema de control PID

- Condiciones normales

La ficha técnica del experimento del control PID en condiciones normales se observa en la tabla 30.

Tabla 30 ficha técnica muestral experimento control PID en condiciones normales

Respuesta del sistema con un control PID en condiciones normales	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID durante 300 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos.
Estimadores muestrales	<p>Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo.</p> <p>Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema.</p> <p>Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema.</p> <p>Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.</p>

Fuente: Creación propia.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 129.

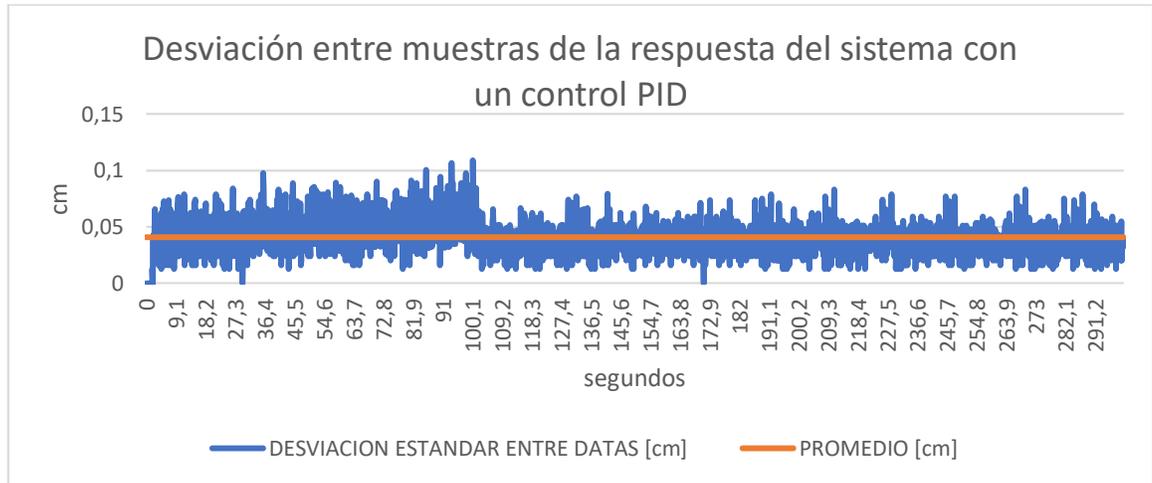


Figura 129 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID

Teniendo un promedio de desviación de ± 0.04056 cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después los 106 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho régimen se observa en la figura 130, donde el promedio de dicha desviación es de ± 0.01379 cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia ± 0.01379 cm.

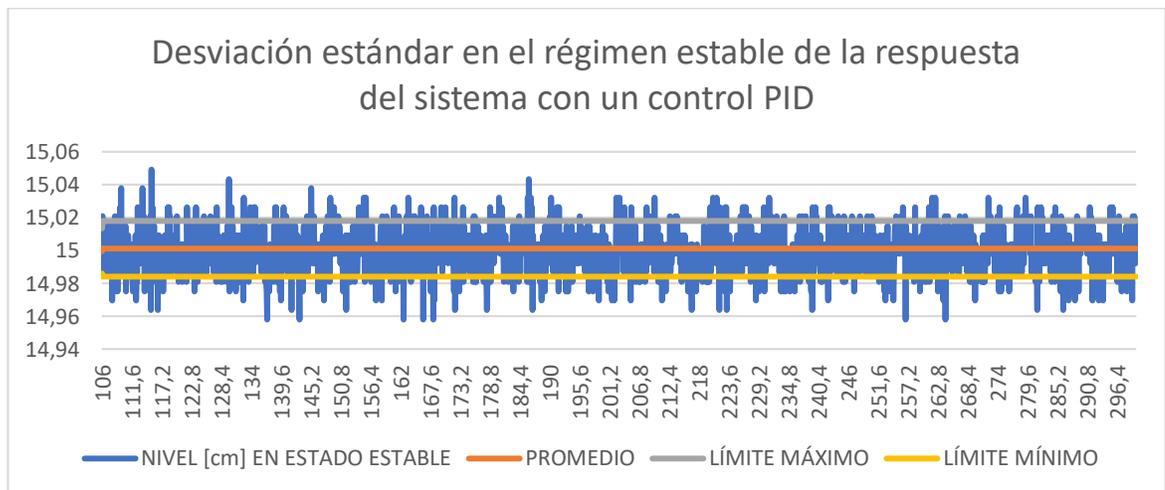


Figura 130 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID

El error en régimen estable se observa en la figura 131, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 15 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0.07%

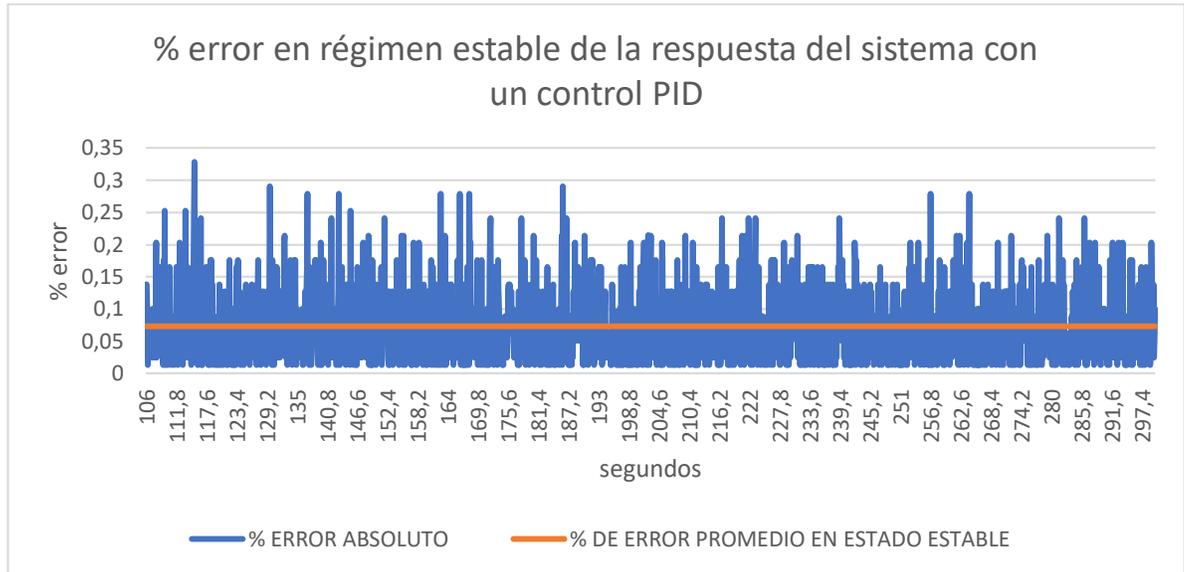


Figura 131 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID

- Ruido

La ficha técnica del experimento del control PID ante ruido en condiciones normales se observa en la tabla 31.

Tabla 31 ficha técnica muestral experimento control PID ante ruido en condiciones normales

Respuesta del sistema con un control PID ante ruido	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID durante 300 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se le agrega una señal aleatoria con un rango del

	5% del valor máximo de lectura del puerto analógico
Estimadores muestréales	<p>Desviación estándar entre muestras: Indica la dispersión entre las muestras en todos los instantes de tiempo.</p> <p>Promedio de la desviación estándar entre muestras: Indica la desviación general entre las muestras, estimador que se relaciona directamente con la repetibilidad del sistema de control y la respuesta del sistema.</p> <p>Desviación estándar en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con la estabilidad del sistema en el estado estable de la respuesta del sistema.</p> <p>Error promedio en estado estable: Indicador que se relaciona directamente con el error en el estado estable de la respuesta del sistema.</p>

Fuente: Creación propia.

La desviación estándar de los datos entre muestras se observa en la figura 132.

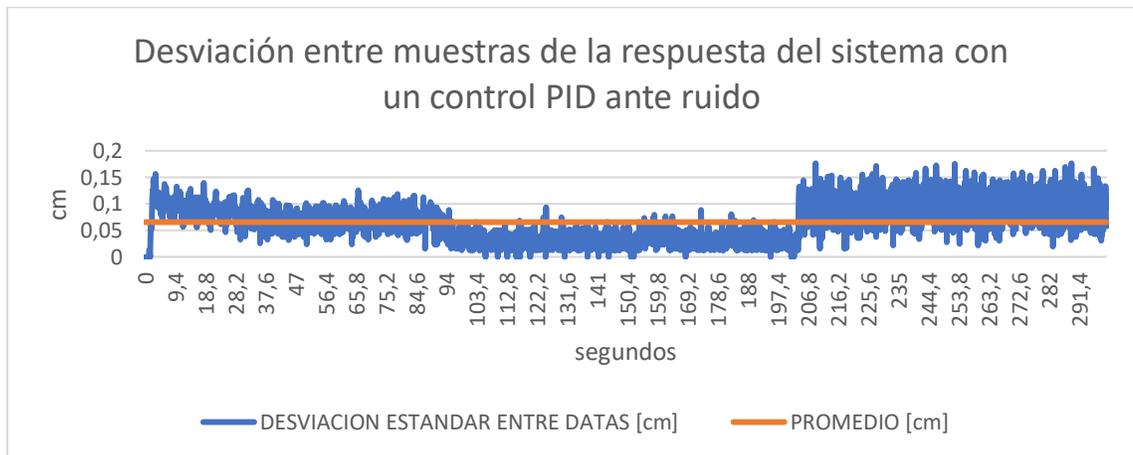


Figura 132 Desviación entre muestras de la respuesta del sistema con un control PID ante ruido

Teniendo un promedio de desviación de ± 0.06588 cm, indicador que refleja una repetibilidad aceptable del experimento.

Se considera el régimen estable después los 180 segundos, según el estudio del tiempo de establecimiento del inciso anterior. La desviación de la respuesta en dicho

régimen se observa en la figura 133, donde el promedio de dicha desviación es de ± 0.07969 cm. Lo anterior se traduce en una estabilidad del sistema en régimen estable que varía en promedio alrededor del punto de convergencia ± 0.07969 cm.

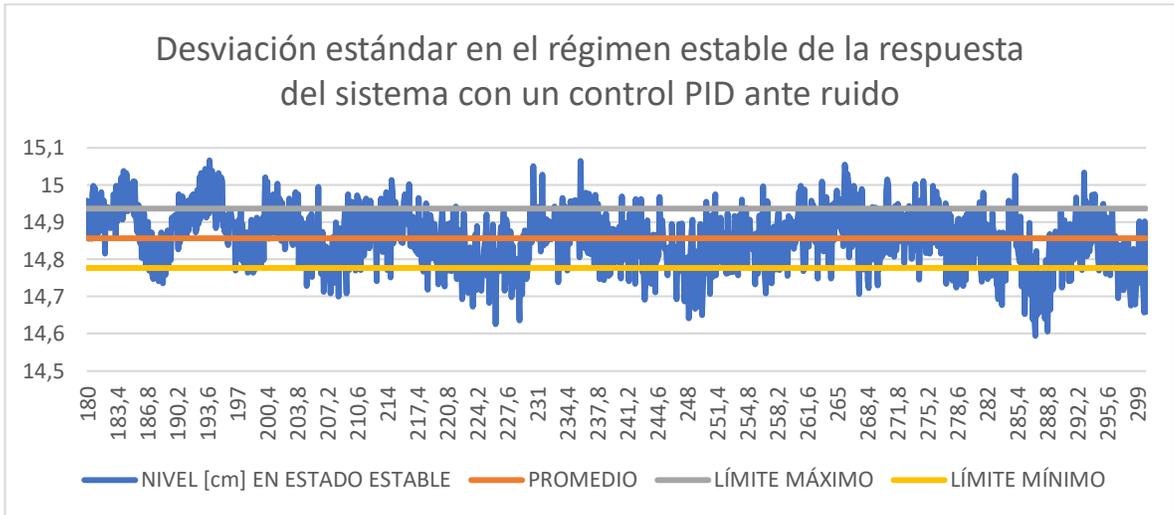


Figura 133 Desviación estándar en el régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID ante ruido

El error en régimen estable se observa en la figura 134, donde se tiene en cuenta que el valor esperado es de 15 cm. En general se obtuvo un error promedio en estado estable de 0.96%.

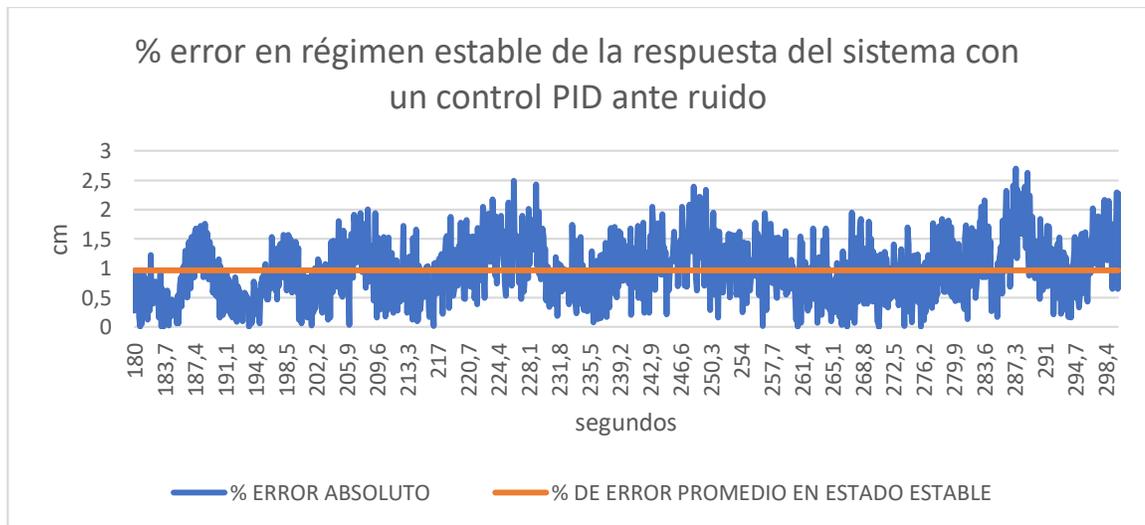


Figura 134 % error en régimen estable de la respuesta del sistema con un control PID ante ruido

- Perturbación

La ficha técnica del experimento del control PID ante perturbación se observa en la tabla 32.

Tabla 32 ficha técnica muestral experimento control PID ante perturbación normales

Respuesta del sistema con un control PID ante perturbación	
Ficha Técnica Muestral	
Universo	Planta piloto de control de nivel de líquido de un tanque
Tamaño de la muestra	5 muestras
Número de datos por muestra	3000 datos
Procedimiento de muestreo	Para cada muestra se establece un valor de referencia (S_p) de 15 cm y se recuperan los datos de la respuesta del sistema ante un control PID durante 300 segundos, teniendo un tiempo de muestreo de 0.1 segundos. Se ingresa una perturbación con amplitud de 0.71cm en el instante de tiempo 140 y 10 segundos después es retirada del sistema.
Estimadores muestrales	Tiempo de respuesta a la perturbación: indica el tiempo que le toma al sistema responder y corregir la perturbación

Fuente: Creación propia.



Figura 135 Respuesta del controlador PID ante perturbación

Como se observa en la figura 135 en el instante de tiempo 140 se ingresa al sistema una perturbación de aproximadamente 0.71cm llevando el nivel del tanque a un valor de 15.73 cm y permaneciendo en el sistema durante 10 segundos, en este

trascuro de tiempo el controlador logra regresar al valor del setpoint en 4.4 segundos, pero genera un pobre impulso que es llevado a la estabilidad en el límite de la salida de la perturbación a 9.8 segundos. Cuando la perturbación es retirada del sistema ocurre el mismo efecto de sobreimpulso siendo estabilizado el sistema en el instante de tiempo 161.5 segundos.

4.4 Análisis de resultados

Los resultados del inciso anterior se resumen en la tabla 33.

Tabla 33 Resultados generales de los experimentos

Resultados en condiciones normales y perturbación									
C o n t r o l	Experim ento	Régimen transitorio					Régimen estable		
		td	tr	tp	Mp [cm]	ts	Desviaci ón estándar en régimen estable [cm]	Punto de asentami ento [cm]	% de error promedio en régimen estable [%]
I T 2	Normal	41.5	76.6	0	0	180	0.0173	15.34	2.24
	Ruido	50.6	97.8	0	0	200	0.0399	15.43	2.97
T 1	Normal	43	76.7	0	0	100	0.0122	15.14	0.95
	Ruido	49.1	89.9	0	0	160	0.0448	15.70	4.66
P I D	Normal	44.6	79.7	103.3	0.12	106	0.0138	14.99	0.07
	Ruido	43.3	77.7	0	0	180	0.0797	14.86	0.96
Resultados ante perturbación									
		Estabiliza Si o No			Tiempo de respuesta a la perturbación				
I T 2	No			No aplica					
	Si			7,8 [s]					
P I D	Si			9,8 [s]					

Para analizar los resultados se partió por seleccionar a los indicadores con mayor deficiencia en la respuesta tanto en el régimen transitorio como estable y partiendo de los mismos se hallaron los porcentajes de mejora de los demás respecto a dichos indicadores, haciendo uso en todos los casos de la ecuación 69.

$$\% \text{ mejora} = \frac{|\text{Indicador referencia} - \text{Indicador a evaluar}|}{\text{Indicador referencia}} \times 100 \% \quad \text{Ecu. (69)}$$

Tras evaluar en Excel cada uno de los indicadores se obtuvieron los resultados que se observan en la tabla 34.

Tabla 34 Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia

Porcentajes de mejora de los indicadores de los controladores respecto al indicador con mayor deficiencia									
Condiciones	Régimen	Indicador	Mayor deficiencia	valor	Deficiencia media	% de mejora	Menor deficiencia	% de mejora	
En condiciones normales	Régimen transitorio	td	PID	44,6 [s]	T1	3,59	IT2	6,95	
		tr	PID	79,7 [s]	T1	3,76	IT2	3,89	
		tp	PID	103,3 [s]	T1/IT1	100,00	T1/IT2	100,00	
		Mp	PID	0,12	T1/IT2	100,00	T1/IT2	100,00	
		ts	IT2	180 [s]	PID	41,11	T1	44,44	
	Régimen estable	Desv. en estado estable	IT2	0,0173 [cm]	PID	20,23	T1	29,48	
		% error en estado estable	IT2	0,02	T1	57,59	PID	96,88	
	Ante ruido	Régimen transitorio	td	IT2	50,6 [s]	T1	2,96	PID	14,43
			tr	IT2	97 [s]	T1	7,32	PID	19,90
			tp	-	-	-	-	-	-
Mp			-	-	-	-	-	-	
ts			IT2	200 [s]	PID	10,00	T1	20,00	
Régimen estable		Desv. en estado estable	PID	0,0797 [cm]	T1	43,79	IT2	49,94	
		% error en estado estable	T1	0,05	IT2	36,27	PID	79,40	

Lo anterior transpone los resultados entre controladores, marcando la comparación entre los controladores en condiciones normales y ante ruido. Pero también se hace necesario comparar los cambios de cada tipo de control ante el ruido, es decir, evaluar como afecto el ruido su propia dinámica. Para lo cual se calculó el porcentaje de afectación de cada control tras el efecto del ruido, donde no se considera si el cambio arroja o no mejores márgenes, sino como cambio su dinámica frente a dicho ruido. Lo resultados de lo anterior se observan en la tabla 35 y se calcularon en base a la ecuación 70.

$$\% \text{afectación} = \frac{| \text{Condiciones normales} - \text{Ante ruido} |}{\text{Condiciones normales}} \times 100 \% \quad \text{Ecu. (70)}$$

Tabla 35 Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control

Índices de afectación por el ruido en cada tipo de control										
control	Indicadores		Régimen transitorio					Régimen estable		
			td [s]	tr [s]	tp [s]	Mp [cm]	ts [s]	Desviación estándar en régimen estable [cm]	Punto de asentamiento [cm]	% de error promedio en régimen estable [%]
IT2	Experimento	Normal	41,50	76,60	0,00	0,00	180,00	0,02	15,34	2,24
		Ruido	50,60	97,00	0,00	0,00	200,00	0,04	15,43	2,97
	% de Afectación		21,93 %	26,63 %	0,00 %	0,00 %	11,11 %	130,64 %	0,59 %	32,59 %
T1	Experimento	Normal	43,00	76,70	0,00	0,00	100,00	0,01	15,14	0,95
		Ruido	49,10	89,90	0,00	0,00	160,00	0,04	15,70	4,66
	% de Afectación		14,19 %	17,21 %	0,00 %	0,00 %	60,00 %	267,21 %	3,70 %	390,53 %
PID	Experimento	Normal	44,60	79,70	103,30	0,12	106,00	0,01	14,99	0,07
		Ruido	43,30	77,70	0,00	0,00	180,00	0,08	14,86	0,96
	% de Afectación		2,91 %	2,51 %	100,00 %	100,00 %	69,81 %	477,54 %	0,87 %	1271,43 %

Resaltando los resultados obtenidos en el régimen estable ya que es el régimen de interés principal de esta investigación, en la comparación entre controladores en condiciones normales se obtuvo que el controlador difuso tipo 2 fue el más deficiente en cuando a la desviación en estado estable, donde el controlador PID lo mejoro un 20,23% y el difuso tipo 1 un 29,48%. En cuanto al error en estado estable el controlador difuso tipo 2 también obtuvo la mayor deficiencia siendo mejorado por el tipo 1 en 57,59% y por el PID en un 96,88%.

Por otro lado, en el error en estado estable el controlador con peores resultados fue el difuso tipo uno, siendo mejorado un 36,27% por el controlador difuso tipo 2 y un 79,4% por el controlador PID.

El patrón de resultados anterior se repitió para el porcentaje de error en estado estable donde el control difuso tipo de nuevo obtuvo los mejores resultados con una afectación del 32,59%, luego el difuso tipo 1 con un 390,53% y por último el más crítico el PID con un 1271,4%.

4.4.1 Escenarios comparativos

Normalmente en la industria existen escenarios en los que el ruido eléctrico se hace presente en las señales destinadas a la comunicación y el control. Este ruido eléctrico es mayormente producto de la red que suministra la energía eléctrica, y lo es porque alrededor de los conductores se produce un campo magnético a la frecuencia de 50 o 60 Hz. Además, por estos conductores se propagan los parásitos o el ruido producido por otros dispositivos eléctricos o electrónicos como lo son los variadores de frecuencia.

Un claro ejemplo de lo anteriormente nombrado son los entornos en los que el panel de control se encuentra a una distancia considerable con respecto al proceso a controlar, en estos casos el cableado que transmite la señal de lectura de los sensores como la de control de los actuadores (señal con frecuencias de 50 o 60 Hz) tienden a estar relativamente cerca, aunque encapsulados en conductos distintos.

A pesar de que los conductos tienen como finalidad mitigar los efectos del ruido, este no es atenuado en su totalidad y es aún más difícil cuando el número de actuadores es elevado y por ende los cables que conducen la energía con frecuencias de 50 a 60 Hz es mayor. Estas condiciones llevan a que la información que recibe el panel de control proveniente de los sensores no tenga la calidad para que controlador promedio tenga un desempeño optimo o el deseado. Por tal motivo

la implementación de controladores difusos tipo 2 toman fuerza, puesto que como se evidencia en la tabla 35 el porcentaje de afectación que presentan ante ruido es considerablemente menor a arquitecturas como un CDL tipo 1 y un controlador PID clásico.

Tabla 36 FODA de los controladores difusos Tipo 2.

	Fortalezas	debilidades
Análisis interno	Poca afectación en entornos de ruido en comparación a otras estrategias de control.	Lenta reacción a las perturbaciones. Tiempo de convergencia constante. Mayor error en estado estable con respecto a otras estrategias de control.
	Oportunidades	Amenazas
Análisis externo	Innovación en el desarrollo de metodologías para el diseño e implementación de controladores con bajo índice de uso. Exploración de uso de controladores CDL IT2 en entornos industriales especialmente en los que otras estrategias muestran falencias de funcionamiento.	Riesgo de ser considerado un controlador sobre dimensionado para procesos con controladores clásicos funcionales.

CONCLUSIONES

- 1) Basados en la ecuación 66 que representa el modelo del sistema obtenido por el método de Sundaresan y Krishnaswami, se reconoce que el proceso es de primer orden por lo que el resultado obtenido en esta metodología garantiza el funcionamiento para sistemas con estas características, no obstante, en el capítulo 1.13 se muestra gran variedad de ejemplos con características de segundo orden o incluso orden superior lo que abre las puertas a que en futuros casos se pueda implementar esta metodología o se optimice de ser necesario para que contemple estos procesos de grados mayores y se evalúe si en estos casos sigue siendo útil en condiciones de alto impacto de ruido o si sus beneficios van más allá de este aspecto.
- 2) En la sección 3.1.6 se puede observar que para el cálculo del controlador clásico se utilizó el tercer método de Ziegler and Nichols y aunque este método fue efectivo para el caso de estudio planteado no quiere decir que sea el mejor de los posibles métodos a implementar, o que funcione de manera efectiva para otros casos de estudio.
- 3) Teniendo en cuenta que el controlador clásico es la base de esta metodología para crear el controlador difuso tipo 2 se concluye que es necesario determinar para las condiciones que se evalúen cuál es el método que mejor se ajuste para dar un control efectivo.
- 4) En términos generales luego de llevarse a cabo la puesta en marcha del experimento y como se muestra en el comportamiento que plasma la [figura 96](#) fue fructífera la creación de un controlador difuso tipo 2 funcional bajo la metodología planteada, esto no garantiza que en efecto sea el mejor de los controladores como se evidencia en la [tabla 33](#), pero sí permite obtener un guía para implementar controladores de esta magnitud y tratarlos como casos de estudio más recurrentes.
- 5) Como se pudo observar en la [figura 97](#) que mostraba el cálculo de t_s , el método del 2% no permite determinar con exactitud el valor en el que el sistema ya se ha estabilizado, no obstante como método de comparación evaluativa entre controladores sí es viable pues permite fijar unas condiciones en las que todos los controladores posean la misma característica de estabilidad, ya si se deseara por motivos anexos como en este caso que se requería una mayor precisión en el dato para un posterior

uso en el estudio estadístico del estado estable no es recomendable puesto que puede introducir pequeñas respuestas dinámicas aun presentes en el sistema.

- 6) En la [figura 99](#) se plasma la respuesta del controlador difuso tipo 2 sometido a ruido en esta se puede observar que la naturaleza de la curva de respuesta se vio mínimamente afectada, lo que se verifica al analizar los indicadores de respuesta en la [tabla 35](#), donde se pudo observar que en régimen transitorio el ruido género que el proceso se tornara levemente más lento y desplazando el tiempo de estabilidad de 180 segundos en condiciones normales a 200 segundos ante ruido.
- 7) Por otro lado en el estudio estadístico del régimen estable se observa un empeoramiento leve en sus características siendo la más relevante el error en estado estable llevando el sistema de un error del 2.24 al 2.96% con una variación en el punto de asentamiento del 0.59%, todo esto permite concluir que el controlador difuso soporta favorablemente condiciones donde se presente altos índices de ruido.
- 8) En la [tabla 34](#) se plantea un conjunto de situaciones, en ellas se observa como el controlador difuso tipo 2 a pesar de tener un buen régimen transitorio su respuesta para mitigar en el error en estado estable lo hace caracterizar como el peor de los controladores en condiciones normales, caso contrario ocurre una vez el sistema es sometido a ruido, en donde se observa que el CDL IT2 es más robusto en comparación a sus homólogos. Estas dos situaciones son productos de su salida por puntos donde en un caso le limita al lograr llevar el sistema a un valor de error mínimo, en el segundo garantiza que sufra menos alteraciones en señales parasitas. Esto lleva a concluir que los controladores CDL IT2 son óptimos para procesos que puedan o se encuentren sometidos a ruidos eléctricos considerables, de lo contrario según lo obtenido en este experimento no son viables para ningún proceso en condiciones normales.
- 9) Basado en los fundamentos teóricos se conocía de antemano que el controlador difuso tipo 2 al ser implementado con singleton iba a presentar una respuesta lenta del sistema, ya que al ser un control basado en puntos de magnitud fija de salida y no en una curva como se caracterizan comúnmente todos los controladores, el cambio entre sus magnitudes de respuesta serian considerablemente lenta, esto pudo observarse con

exactitud al someter el sistema ante perturbaciones donde como se muestra en la [figura 108](#) el sistema solo logro compensar un 30% la perturbación en un tramo de 10 segundos, por lo que se concluye que este control no es favorable cuando el sistema a controlar pueda presentar perturbaciones recurrentes, o bien el control difuso tipo dos que se encuentre basados en salidas con singleton.

- 10) A pesar de que los resultados expuestos en la [tabla 35](#) donde el control difuso tipo 2 obtuvo los peores márgenes respecto a los demás tipos de control, en las condiciones de ruido el control difuso tipo 2 fue el más robusto puesto que en la desviación en estado estable presento una mejora del 49,94% con respecto al controlador PID (controlador con peores resultados), y superando a la mejora del controlador difuso tipo 1 que obtuvo un valor de 43,79%.
- 11) En la [tabla 35](#) se reflejan los resultados entre controladores, quedando claro que el control difuso tipo 2 no es el mejor de los controles en condiciones normales, pero si es superior en la mayoría dadas ante el ruido. Lo que se corroboró al estudiar la afectación que genero el ruido sobre cada control, donde la desviación estándar se vio afectada en el control difuso tipo 2 un 130,64%, para control difuso tipo 1 un 267,21% y para el PID un 477,54%, teniendo la menor afectación el control difuso tipo 2.

REFERENCIAS

- Abbadi, A, L Nezli, y D Boukhetala, “Electrical Power and Energy Systems A nonlinear voltage controller based on interval type 2 fuzzy logic control system for multimachine power systems”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 45 (2013), 456–67
<<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.020>>
- Alireza, Seyed, Ehsan Zakeri, y Mohammad Eghtesad, “Optimal adaptive interval type-2 fuzzy fractional-order backstepping sliding mode control method for some classes of nonlinear systems”, *ISA Transactions*, 93 (2019), 23–39
<<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.03.006>>
- Almaraashi, Majid, “Learning of Type-2 Fuzzy Logic Systems using Simulated Annealing by Declaration of Authorship” (DE MONTFORT UNIVERSITY, 2012)
- Anil, Kanasottu, Chandra Prakash, y Eugene Fernandez, “Electrical Power and Energy Systems Design and implementation of interval type-2 fuzzy logic-PI based adaptive controller for DFIG based wind energy system”, *Electrical Power and Energy Systems*, 115 (2020), 105468
<<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105468>>
- Antonio, Marco, y Nadia Samantha, “Intervalo difuso tipo 2 con aprendizaje aplicado en control”, *Revista de Simulación Computacional*, 1 (2017), 9–17
- Araujo, Ernesto, “Lógica Difusa (Fuzzy) e Raciocínio Aproximado : Conceitos e Aplicações Lógica Difusa (Fuzzy) e Raciocínio Aproximado : Conceitos e Aplicações Fuzzy Logic and Approximate Reasoning : Concepts and Applications”, 2014
- Arguello, Juan, y Gabriel Romero, “CONTROL DIFUSO ADAPTATIVO APLICADO A UN CONTROL DE VELOCIDAD”, 2002, 18–25
- Ascención, I. Rico, “AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INTELIGENTE FUZZY DE UN REACTOR UASB VÍA WIRELESS CON LABVIEW”, 2015, 1–8
- Baghbani, F, M Akbarzadeh-t, y Alireza Akbarzadeh, “Indirect adaptive robust mixed H_2 / H_∞ general type-2 fuzzy control of uncertain nonlinear systems”, *Applied Soft Computing Journal*, 72 (2018), 392–418
<<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.049>>
- Baklouti, Nesrine, Robert John, y Adel M Alimi, “Interval Type-2 Fuzzy Logic Control of Mobile Robots”, 2012 <<https://doi.org/10.4236/jilsa.2012.44031>>
- Castillo, Oscar, *Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications*, Springer

- (Berlín, 2012) <<https://doi.org/10.1007/978-3-642-24663-0>>
- , *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications*, ed. Springer (Berlin, 2008)
- Castillo, Oscar, Leticia Amador-angulo, Juan R Castro, y Mario Garcia-valdez, “A comparative study of type-1 fuzzy logic systems , interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems”, 354 (2016), 257–74 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.026>>
- Castillo, Oscar, y Patricia Melin, “A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control”, *Elsevier*, 279 (2014), 615–31 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.015>>
- Castillo, Oscar, Patricia Melin, Emanuel Ontiveros, Cinthia Peraza, Patricia Ochoa, Fevrier Valdez, et al., “A high-speed interval type 2 fuzzy system approach for dynamic parameter adaptation in metaheuristics ☆”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85 (2019), 666–80 <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.07.020>>
- Celik, Erkan, Ozge Nalan, Melike Erdogan, Alev Taskin, y Hayri Baraclı, “An integrated novel interval type-2 fuzzy MCDM method to improve customer satisfaction in public transportation for Istanbul”, *Transportation Research Part E*, 58 (2013), 28–51 <<https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.06.006>>
- Chaoui, Hicham, Wail Gueaieb, Mohammad Biglarbegian, y Mustapha C E Yagoub, “Computationally Efficient Adaptive Type-2 Fuzzy Control of Flexible-Joint Manipulators”, *MDPI Open access robotics*, 2 (2013), 66–91 <<https://doi.org/10.3390/robotics2020066>>
- Crisanto, Regalado, y Julio César, “LÓGICA DIFUSA Y SISTEMAS DE CONTROL” (Universidad de Piura, 1999) <http://www.bibliocentral.udep.edu.pe/search~S10*spl?/tlogica+difusa+y+sistemas+de+control/tlogica+difusa+y+sistemas+de+control/-3%252C0%252C0%252CB/frameset&FF=tlogica+difusa+aplicada+al+control+de+voltaje+y+potencia+reactiva+en+subestaciones+de+distribucion&1%25>
- Diaz, Adolfo, Jesus Lopez, Eduardo Francisco, y Caicedo Bravo, “Aplicación de la lógica difusa tipo dos en una planta didáctica en control de procesos industriales, respecto de las variables nivel y flujo”, 2009
- DÍAZ, JULIO CESAR MOGOLLÓN; MARÍN ULISES DAVID MÚNERA, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL FUZZY DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR DC DE POTENCIA”, 2003
- Doctor, Faiyaz, Chih-hao Syue, Yan-xin Liu, Jiann-shing Shieh, y Rahat Iqbal, “Type-2 fuzzy sets applied to multivariable self-organizing fuzzy logic controllers for regulating anesthesia”, *Applied Soft Computing Journal*, 38

- (2016), 872–89 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.014>>
- Du, Zhenbin, Yonggui Kao, y Ju H Park, “New results for sampled-data control of interval type-2 fuzzy nonlinear systems”, *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 1–21 <<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.09.035>>
- Duarte, Osear G, “Sistemas de lógica difusa. Fundamentos”, 1999, 22–30
- Esposito, Massimo, y Giuseppe De Pietro, “Knowledge-Based Systems Interval type-2 fuzzy logic for encoding clinical practice guidelines”, *Knowledge-Based Systems*, 54 (2013), 329–41 <<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.10.001>>
- Fartash, Shirin, Mohammad-r Akbarzadeh, y Alireza Akbarzadeh, “Position tracking of a 3-PSP parallel robot using dynamic growing interval type-2 fuzzy neural control”, *Applied Soft Computing Journal*, 37 (2015), 1–14 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.07.015>>
- Fayek, H M, I Elamvazuthi, N Perumal, y B Venkatesh, “A controller based on Optimal Type-2 Fuzzy Logic : Systematic design , optimization and real-time implementation”, *ISA Transactions*, 53 (2014), 1583–91 <<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.06.001>>
- Figueroa-garcía, Juan, “Towards Solving Matrix Games with Interval Type-2 Fuzzy Optimization Abstract”, 2016 <<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2013.2.a06>>
- García-sucerquia, C Palacio-gómez J, “Control de Temperatura Utilizando Lógica Difusa Temperature Controller by Using Fuzzy Logic”, 2010, 1–5
- Gonz, Antonio, “Deteccion de puertas mediante vision y logica difusa Detección de puertas mediante visión y lógica difusa”
- González, Carlos, “Lógica Difusa. Una introducción práctica”, *Técnicas de Softcomputing*, 2011, 29 <https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf>
- Greenfield, Sarah, y Francisco Chiclana, “Accuracy and complexity evaluation of defuzzification strategies for the discretised interval type-2 fuzzy set”, *International Journal of Approximate Reasoning*, 54 (2013), 1013–33 <<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2013.04.013>>
- , “Type-Reduced Set structure and the truncated type-2 fuzzy set”, *Fuzzy Sets and Systems*, 352 (2018), 119–41 <<https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.02.012>>
- Greenfield, Sarah, Francisco Chiclana, Simon Coupland, y Robert John, “The Collapsing Method of Defuzzification for Discretised Interval Type-2 Fuzzy

Sets”, 1–25

Guzmán, D, “La lógica difusa en ingeniería : Principios , aplicaciones y futuro”, 24 (2006), 87–107

Haiyue, Wang, Luo Chao, y Wang Xingyuan, “Synchronization and identification of nonlinear systems by using a novel self-evolving interval type-2 fuzzy LSTM-neural network”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 81 (2019), 79–93 <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.02.002>>

Hao, Minshen, y Jerry M Mendel, “Similarity measures for general type-2 fuzzy sets based on the α -plane representation”, *Information Sciences*, 277 (2014), 197–215 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.01.050>>

Hassan, Mohammad, Taher Niknam, y Frede Blaabjerg, “A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles”, 143 (2017), 585–98 <<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.057>>

Hu, Bao Qing, y Chun Yong Wang, “On type-2 fuzzy relations and interval-valued type-2 fuzzy sets”, *Fuzzy Sets and Systems*, 236 (2014), 1–32 <<https://doi.org/10.1016/j.fss.2013.07.011>>

Huang, Sharina, Guoliang Zhao, y Minghao Chen, “A fast analytical approximation type-reduction method for a class of spiked concave type-2 fuzzy sets \star ”, *International Journal of Approximate Reasoning*, 103 (2018), 212–26 <<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2018.10.002>>

Intervalo, Difuso Tipo- De, Diego Fernando Pach, Juan Carlos Figueroa-garc, Universidad Distrital, y Francisco Jos, “A Comparison Between the Centroid and the Yager Index Rank for Type Reduction of an Interval Type-2 Fuzzy Number on entre el Indice de Yager y el Centroide para”, 2016, 225–34

Jafari, Adeleh Arabzadeh, Seyed Mohammad, y Ali Mohammadi, “Adaptive type-2 fuzzy backstepping control of uncertain fractional-order nonlinear systems with unknown dead-zone”, *Applied Mathematical Modelling*, 69 (2019), 506–32 <<https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.01.002>>

Karnik, Nilesh N, Jerry M Mendel, y Qilian Liang, “Type-2 Fuzzy Logic Systems”, 7 (1999), 643–58

Kassir, Eduardo Estrada, “Sistemas de control difuso”, 2002

Kelekci, Ethem, y Selcuk Kizir, “Trajectory and vibration control of a flexible joint manipulator using interval type-2 fuzzy logic”, *ISA Transactions*, 2019 <<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.04.001>>

Kouro, Samir, y Rodrigo Musalem, “Control Mediante Lógica Difusa”, 2002, 1–7

- Li, Hongyi, Xingjian Sun, Peng Shi, y Hak-keung Lam, "Control design of interval type-2 fuzzy systems with actuator fault : Sampled-data control approach", *INFORMATION SCIENCES*, 302 (2015), 1–13
<<https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.01.008>>
- Liang, Qilian, Nilesh N Karnik, Associate Member, y Jerry M Mendel, "Connection Admission Control in ATM Networks Using Survey-Based Type-2 Fuzzy Logic Systems", 30 (2000), 329–39
- Liang, Qilian, y Jerry M Mendel, "Equalization of Nonlinear Time-Varying Channels Using Type-2 Fuzzy Adaptive Filters", 2017
<<https://doi.org/10.1109/91.873578>>
- , "Overcoming Time-Varying Co-Channel Interference Using Type-2 Fuzzy Adaptive Filters", 2017 <<https://doi.org/10.1109/82.899635>>
- Liu, W Y, J G Han, y X N Lu, "Expert Systems with Applications A high speed railway control system based on the fuzzy control method", 40 (2013), 6115–24 <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.04.034>>
- López, Francisco E, "Control de un sistema eólico-fotovoltaico utilizando un controlador fuzzy", 2009
- Marín, Luis G, "Introducción a Sistemas Difusos Modelo computacional Sistemas Difusos", 2016
<https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiGgcHqzcPsAhVHmVvKHQRmALMQFjAAegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.u-cursos.cl%2Fingenieria%2F2016%2F2%2FEL7012%2F1%2Fmaterial_docente%2Fbajar%3Fid_material%3D1487705&usq=AOvVaw0KD-JWq>
- Martínez, Rosalío Farfán, José A Ruz Hernández, José L Rullán Lara, y Universidad Autónoma, "Control Difuso Tipo 2 en el Enfoque de Lyapunov Aplicado a un Servomecanismo", 2012, 1–9
- Matute, Arnaldo, y William Bernal, "Técnicas de Lógica Difusa en Ingeniería de Control Fuzzy Logic Techniques in Control Engineering", III (2017), 125–34
- Mcculloch, Josie, y Christian Wagner, "On the choice of similarity measures for type-2 fuzzy sets", 510 (2020), 135–54
<<https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.027>>
- Medina, Emilio R Moo, David Romero Romero, Instituto Politécnico Nacional, y Sepi-ezime Zacatenco, "Controlador difuso tipo-2 para el control de velocidad de un motor de CD sujeto a un disturbio grande Speed Control of a DC Motor with a Type-2 Fuzzy Logic Controller Subject to a Large Disturbance", 22 (2018), 521–36 <<https://doi.org/10.13053/CyS-22-2-2251>>

- Mendel, Jerry M, Life Fellow, Robert I John, Feilong Liu, y Student Member, "Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple", 14 (2006), 808–21
- Mendel, Jerry M, y Robert I Bob John, "Type-2 Fuzzy Sets Made Simple", 10 (2002), 117–27
- Meza-palacios, Ramiro, Alberto A Aguilar-Iasserre, Enrique L Ureña-bogarín, Carlos F Vázquez-rodríguez, Rubén Posada-gómez, y Armín Trujillo-mata, "Development of a fuzzy expert system for the nephropathy control assessment in patients with type 2 diabetes mellitus", *Expert Systems With Applications*, 72 (2017), 335–43 <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.10.053>>
- Ming, Chun, Tommy Yip, Woei Wan, y Maowen Nie, "On the difference in control performance of interval type-2 fuzzy PI control system with different FOU shapes", *Applied Soft Computing Journal*, 76 (2019), 517–32 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.12.039>>
- Mo, Hong, F Wang, Min Zhou, Runmei Li, y Zhiquan Xiao, "Footprint of uncertainty for type-2 fuzzy sets", *Information Sciences*, 272 (2014), 96–110 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.092>>
- Mohan, B M, y Arpita Sinha, "Analytical structure and stability analysis of a fuzzy PID controller", 8 (2008), 749–58 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.06.003>>
- Morata, Francisco, "Controlador Fuzzy de un Quadrotor", 2009
- Morsli, Sebaa, Allaoui Tayeb, y Denai Mouloud, "A robust adaptive fuzzy control of a unified power flow", 20 (2012), 87–98 <<https://doi.org/10.3906/elk-1003-468>>
- Ngan, Shing-chung, "A concrete and rational approach for building type-2 fuzzy subsethood and similarity measures via a generalized foundational model", *Expert Systems With Applications*, 130 (2019), 236–64 <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.04.002>>
- Nie, Maowen, y Woei Wan Tan, "logic systems", 2 (2008), 1425–32
- Obando, Oscar, y Cesar Garita, "Riesgo Químico : Un Modelo Computacional de Cálculo Mediante Lógica Difusa", 2017
- Ojha, Varun, Ajith Abraham, y Václav Snášel, "Heuristic design of fuzzy inference systems : A review of three decades of", *Elsevier*, 85 (2019), 845–64 <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.010>>
- Pablo, Anderson, Freitas Evangelista, Ginalber Luiz, y De Oliveira Serra, "State space black-box modelling via Markov parameters based on evolving type-2 neural-fuzzy inference system for nonlinear multivariable dynamic systems", *Fuzzy Sets and Systems*, 1 (2019), 1–39

<<https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.08.013>>

Patiño, Victor, Osvaldo Venturini, y José Escobar, “CONCEPÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM CONTROLADOR BASEADO EM LÓGICA CONCEPÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM CONTROLADOR BASEADO EM”, *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2016

Raj, Ritu, y B M Mohan, “General structure of Interval Type-2 fuzzy PI / PD controller of Takagi – Sugeno”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87 (2020), 103273
<<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103273>>

Raju, S Krishnama, y G N Pillai, “Design and real time implementation of type-2 fuzzy vector control for DFIG based wind generators”, *Renewable Energy*, 88 (2016), 40–50 <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.006>>

Rivera, Alfonso Vela, Luis Enrique, Arámbula Miranda, Luis Alejandro, Flores Oropeza, y Edgar López, “TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA TIPO 2” (Mexico, 2013), p. 2013
<https://investigacion.uaa.mx/seminario/memoria_abstracts/14seminario/ponencias/m_ing/ALFONSO_VELA_RIVERA.pdf>

Rodríguez, Mónica, y Yeniffer Huertas, “Metodología para el Diseño de Conjuntos Difusos Tipo-2 a partir de Opiniones de Expertos”, *Revista Ingeniería*, 21 (2016), 121–37

Rong, Nannan, Zhanshan Wang, Sanbo Ding, y Huaguang Zhang, “Interval type-2 regional switching T – S fuzzy control for time-delay systems via membership function dependent approach ☆”, *Fuzzy Sets and Systems*, 374 (2019), 152–69 <<https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.10.014>>

Roy, Kunal, Anupam Mukherjee, y Dipak Kumar, “South African Journal of Chemical Engineering Prediction of maximum oil-yield from almond seed in a chemical industry : A novel type-2 fuzzy logic approach”, *South African Journal of Chemical Engineering*, 29 (2019), 1–9
<<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.03.001>>

Ruvalcaba, Francisco, y Miguel Llama, “CONTROL ADAPTABLE DIFUSO TIPO 2 APLICADO A UN SISTEMA CARRO-PENDULO”, *Memorias del XVIII Congreso Mexicano de Robótica 2016*, 2016, 50–55

Sáenz, David Cortés, Dra Nelly, y Gordillo Castillo, “Técnicas de Visión y Lógica Difusa para la Detección de la Pupila”, 2012

Sanchez, Mauricio A, Oscar Castillo, y Juan R Castro, “Expert Systems with Applications Generalized Type-2 Fuzzy Systems for controlling a mobile robot

- and a performance comparison with Interval Type-2 and Type-1 Fuzzy Systems”, *Expert Systems With Applications*, 42 (2015), 5904–14
<<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.03.024>>
- Sarabakha, Andriy, Changhong Fu, y Erdal Kayacan, “Intuit before tuning : Type-1 and type-2 fuzzy logic controllers”, *Applied Soft Computing Journal*, 81 (2019), 105495 <<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105495>>
- Shahparast, Homeira, y Eghbal G Mansoori, “Developing an online general type-2 fuzzy classifier using evolving type-1 rules”, *International Journal of Approximate Reasoning*, 113 (2019), 336–53
<<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.07.011>>
- Shari, Amir, Samaneh Fathi Sasansara, y Alireza Agah Balgori, “Neurocomputing A new control method based on type-2 fuzzy neural PI controller to improve dynamic performance of a half-bridge DC – DC converter”, 214 (2016), 718–28 <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.07.001>>
- SPC Consulting Group Copyright, “Diseño de Experimentos - DOE | SPC Consulting Group”, 2020 <<https://spcgroup.com.mx/doe/>> [consultado 19 noviembre 2020]
- Starczewski, Janusz T, “Centroid of triangular and Gaussian type-2 fuzzy sets”, *INFORMATION SCIENCES*, 280 (2014), 289–306
<<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.05.004>>
- Taskin, A., y T Kumbasar, “GitHub - ahmettaskin/type-2-fuzzy-logic-systems-matlab-toolbox: Matlab Toolbox for Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems”, 2015 <<https://github.com/ahmettaskin/type-2-fuzzy-logic-systems-matlab-toolbox/>> [consultado 1 septiembre 2020]
- Tejada, Guillermo, “tutorial de lógica difusa” (Lima, Perú: UNMSM, 2000)
- Tibaduiza, D A, y I Amaya, “Implementación de un control fuzzy para el control cinemático directo en un robot manipulador”, 19 (2011), 312–22
- Torshizi, Abolfazl Doostparast, Mohammad Hossein, y Fazel Zarandi, “Hierarchical collapsing method for direct defuzzification of general type-2 fuzzy sets”, *Information Sciences*, 277 (2014), 842–61
<<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.03.018>>
- Wang, Huidong, Xiaohong Pan, Jun Yan, Jinli Yao, y Shifan He, “A projection-based regret theory method for multi-attribute decision making under interval type-2 fuzzy sets environment”, *Information Sciences*, 512 (2020), 108–22
<<https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.041>>
- Wu, Dongrui, Student Member, Jerry M Mendel, Life Fellow, Abstract The, y Karnik

- Mendel, “Enhanced Karnik – Mendel Algorithms”, 17 (2009), 923–34
- Wu, Dongrui, y Jerry M Mendel, “Recommendations on designing practical interval type-2 fuzzy systems ☆”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85 (2019), 182–93 <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.06.012>>
- Wu, Dongrui, y Woei Wan Tan, “Computationally Efficient Type-Reduction Strategies for a Type-2 Fuzzy Logic Controller”, 2005 <<https://doi.org/10.1109/FUZZY.2005.1452419>>
- Wu, Dongrui, y Woei Wan, “A simplified type-2 fuzzy logic controller for real-time control”, 45 (2006), 503–16
- Wu, Hongwei, y Jerry M Mendel, “Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems”, 10 (2002), 622–39
- Xie, Shiwen, Yongfang Xie, Fanbiao Li, Zhaohui Jiang, y Weihua Gui, “Hybrid fuzzy control for the goethite process in zinc production plant combining type-1 and type-2 fuzzy logics”, *Neurocomputing*, 366 (2019), 170–77 <<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.06.089>>
- Xing, Haihua, Hui He, Dan Hu, Tao Jiang, y Xianchuan Yu, “Computers and Geosciences An interval Type-2 fuzzy sets generation method for remote sensing imagery classification ☆”, *Computers and Geosciences*, 133 (2019), 104287 <<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.008>>
- Xu, Jindong, Guozheng Feng, Tianyu Zhao, Xiao Sun, y Meng Zhu, “Computers and Geosciences Remote sensing image classification based on semi-supervised adaptive interval type-2 fuzzy c-means algorithm”, *Computers and Geosciences*, 131 (2019), 132–43 <<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.005>>
- Yang, Liang, Zhi Liu, y Yong Chen, “Energy efficient walking control for biped robots using interval type-2 fuzzy logic systems and optimized iteration algorithm”, *ISA Transactions*, 87 (2019), 143–53 <<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.11.018>>
- Yu, Wen-shyong, y Ho-sheng Chen, “Interval type-2 fuzzy adaptive tracking control design for PMDC motor with the sector dead-zones”, *INFORMATION SCIENCES*, 288 (2014), 108–34 <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.07.004>>
- Zeghlache, Samir, Ali Djerioui, Loutfi Benyettou, Tarak Benslimane, y Hemza Mekki, “Fault tolerant control for modified quadrotor via adaptive type-2 fuzzy backstepping subject to actuator faults”, *ISA Transactions*, 2019 <<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.04.034>>
- Zhang, Chi, Wei Zou, Ningbo Cheng, y Junshan Gao, “Trajectory tracking control

for rotary steerable systems using interval type-2 fuzzy logic and reinforcement learning”, *Journal of the Franklin Institute*, 355 (2018), 803–26
<<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2017.12.001>>

Zhang, H K, Y F Wang, D H Wang, y Y L Wang, “Adaptive robust control of oxygen excess ratio for PEMFC system based on type-2 fuzzy logic system”, *Information Sciences*, 511 (2020), 1–17
<<https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.08.005>>

ANEXOS

Anexo A. Selección de la instrumentación de la planta de control de nivel de agua en un tanque.

Anexo B. Acondicionamiento de señales.

Anexo C: Graficas de las datas de la respuesta del sistema lazo abierto.

Anexo D: Datas del sistema en lazo abierto con promedio.

Anexo E: Selección del modelo que más se ajuste al comportamiento de la planta.

Anexo F: Ampliación de rango difuso tipo 2.

Anexo G: Diseño del sistema de control difuso tipo 1.

Anexo H: código Arduino para el funcionamiento real del controlador difuso tipo 2.

ANEXO A: SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE LA PLANTA DE CONTROL DE NIVEL DE AGUA EN UN TANQUE.

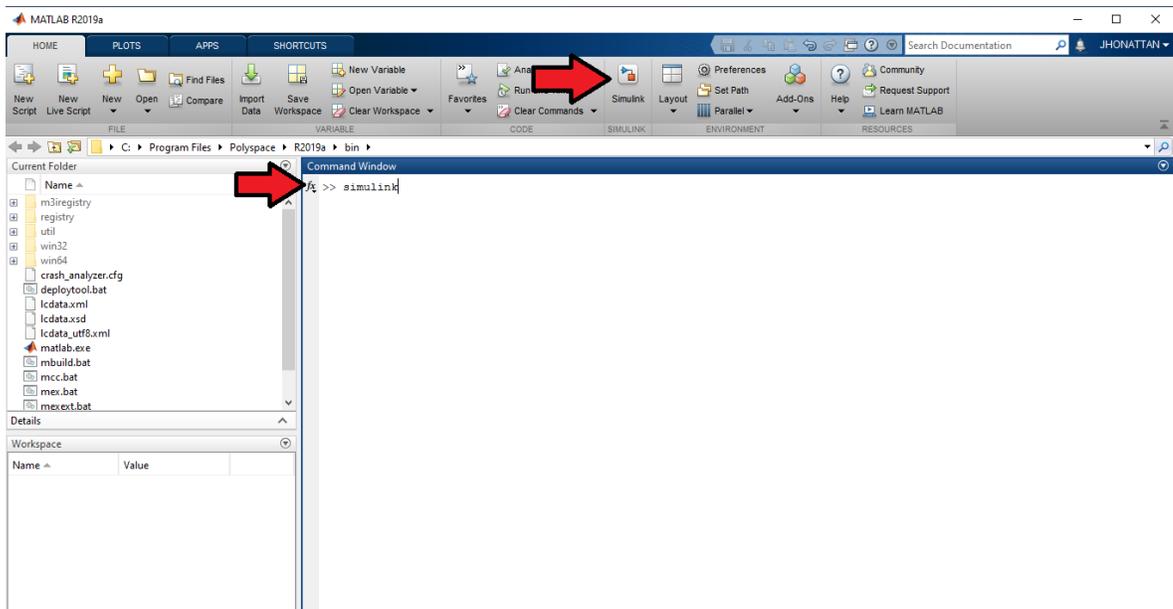
1. Software de control: Matlab – simulink

SIMULINK es una toolbox especial de MATLAB que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. Puede simular sistemas lineales y no lineales, modelos en tiempo continuo y tiempo discreto y sistemas híbridos de todos los anteriores. Es un entorno gráfico en el cual el modelo a simular se construye clicando y arrastrando los diferentes bloques que lo constituyen. Los modelos SIMULINK se guardan en ficheros con extensión *.mdl.

- Cómo iniciar Simulink:

Para abrir la librería de bloques SIMULINK puede hacerse escribiendo `>>simulink` en la ventana de comandos de MATLAB, o bien clicando en el icono de la barra de menús de MATLAB.

Figura 1 Pantalla principal de Matlab



Si ya tenemos algún modelo SIMULINK creado, modelo1.mdl, basta hacer doble clic en su nombre para que primero se abra MATLAB y a continuación se abra la ventana modelo1 que contiene a dicho modelo. O bien, si se tiene el MATLAB abierto, basta con teclear `>>modelo1` en la ventana de comandos.

- Construcción de modelos Ventana de modelo:

Cada modelo (o submodelo) se construye en una ventana diferente. Por ello, para construir un nuevo modelo hay que abrir una nueva ventana de modelo untitled. A partir de ahí, se trata de arrastrar los bloques que compondrán el modelo desde la librería de SIMULINK a dicha ventana. Antes de empezar a trabajar con SIMULINK, se sugiere echar un vistazo a las opciones de la barra de menús y la barra de herramientas de la ventana de modelo.

- Interconectar bloques:

Las interconexiones entre bloques se realizan arrastrando el ratón entre los puertos de entrada y salida de dichos bloques. También es posible seleccionar un bloque y, manteniendo la tecla presionada, clicar en el otro bloque. Se puede poner texto en cualquier sitio (haciendo doble clic en el sitio deseado), se pueden cambiar los nombres de los bloques y se pueden usar distintos colores, etc.

2. Hardware de control

2.1. Tarjeta de adquisición de datos: Arduino mega

El Arduino Mega 2560 es una placa de microcontrolador basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada / salida digital (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para soportar el microcontrolador; simplemente conéctelo a una computadora con un cable USB o enciéndalo con un adaptador de CA a CC o una batería para comenzar.

Figura 2 Arduino mega 2560



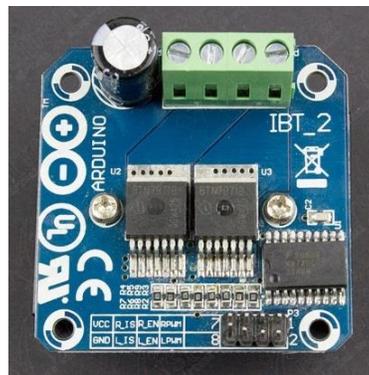
Especificaciones técnicas:

- Microcontrolador: ATmega2560
- Tensión de funcionamiento: 5V
- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12 V
- Voltaje de entrada (límite): 6-20 V
- Pines de E / S digitales: 54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
- Pines de entrada analógica: dieciséis
- Corriente CC por pin de E / S: 20 mA
- Corriente CC para pin de 3.3V: 50 mA
- Memoria flash: 256 KB de los cuales 8 KB utiliza el gestor de arranque
- SRAM: 8 KB
- EEPROM: 4 KB
- Velocidad de reloj: 16 MHz
- LED_BUILTIN: 13
- Longitud: 101,52 milímetros
- Anchura: 53,3 milímetros
- Peso: 37 g

2.2. Módulo Puente H BTS7960:

El Módulo Puente H BTS7960 usa los integrados BTS7960 Infineon como puente H para permitir el control de los motores, cuenta con un protector ante sobrecalentamiento y sobrecorriente. Este módulo cuenta con un aislador que permite separar el circuito de control de la parte de potencia para mantener la integridad del dispositivo, puesto que este driver puede llegar a soportar una corriente de hasta 43A.

Figura 3 Modulo BTS7960



Principales Características:

- ✓ Voltaje de Operación DC: 5.5V ~ 27V
- ✓ Corriente Máxima soportada: 43A
- ✓ Protección de sobre corriente
- ✓ Frecuencia Máxima de Operación: 25 KHz
- ✓ Dimensiones: 40 mm x 50 mm x 12mm

3. Selección del sensor

Para determinar que sensor implementar se hace una matriz de selección, donde se asignan una serie de pesos dependiendo las características que se requieren en el proceso, se debe hacer una buena elección para estos elementos ya que el tiempo de respuesta del sistema depende directamente del sensor y el transmisor, por lo cual se requiere una gran precisión y velocidad de respuesta.

La tabla 1 refleja los pesos asignados para llevar a cabo la elección del sensor para medir la distancia, en este caso la distancia será vertical, lo cual daría es el dato del nivel del tanque y la tabla 2 muestra la selección del sensor basado en los criterios previamente establecidos.

Tabla 1 matriz de evaluación de las características para la selección del sensor

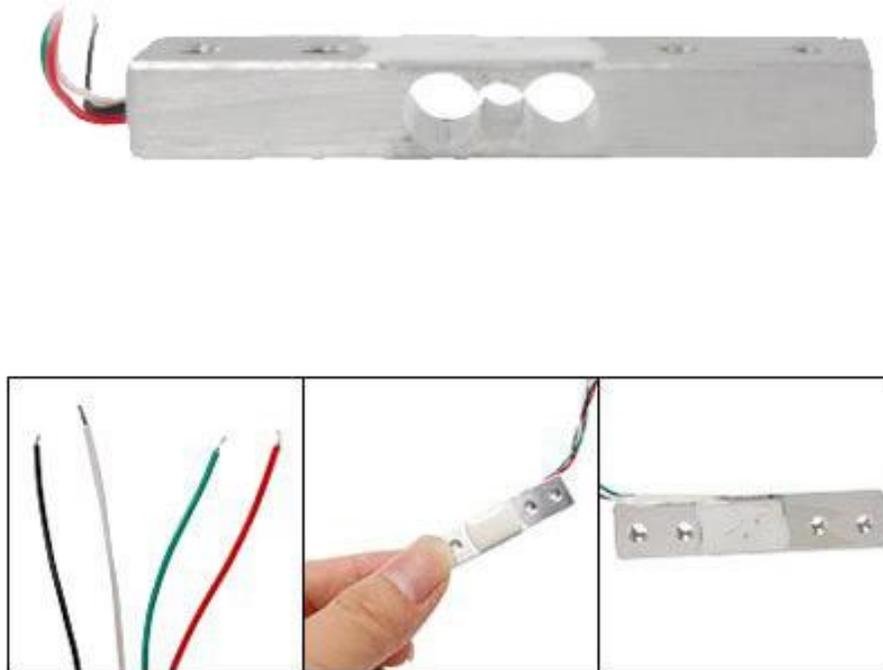
Criterios y puntaje	1	2	3	4	5
Factibilidad	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta
Impacto	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta
Innovación	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta
costo	Elevado	Regular	Medio	Alta	Muy alta
Tiempo de respuesta	Muy lento	Lento	Regular	Rápido	Muy rápido

Tabla 2 Matriz de selección del sensor

	CRITERIOS	ULTRASONICO HC-SR04	CELDA DE CARGA 5 KG	PRESOSTATO
TECNICOS	Sensibilidad	4	5	5
	Precisión	4	5	5
	Capacidad (Rango)	5	4	5
	SUBTOTAL	4.3	4.6	5
ECONOMICOS	Costo del equipo	5	5	1
	Garantía y servicio	5	5	5
	SUBTOTAL	5	5	3
	TOTAL	4.65	4.8	4

Presentadas las características de los sensores más empleados para medir distancia se ha hecho la elección de la celda de carga, a continuación, se presentan los rangos de funcionamiento de este sensor y otras características.

Figura 4 Celda de carga



Características del sensor seleccionado:

- Rango de carga :5kg
- Salida nominal: $1,0 \pm 0.15\text{mV} / \text{V}$
- Repetitividad: 0,03% FS
- Efecto de la temperatura en la salida: $0,01\% \text{ F.S} / ^\circ \text{C}$
- Efecto de la temperatura sobre cero: $0.05\% \text{ F.S} / ^\circ \text{C}$
- Cero: $\pm 0.1000 \text{ mV} / \text{V}$
- Impedancia de entrada: $1115 + -10\% \Omega$
- Impedancia de salida: $1000 + - 10\% \Omega$
- Resistencia de aislamiento: $> = 1000 \text{ M}\Omega$

- Tasa Sobrecarga segura: 150% FS
- Tasa de sobrecarga final: 200% FS
- Rango de temperatura: -20 - 60 ° C
- Voltaje de funcionamiento: 3VDC ~ 14 VDC.
- Material: Aleación de aluminio
- Grado de protección: IP65
- Cable: $\varnothing 0.8 \times 25$ cm
- Tamaño: :4.5 x 0.9 x 0.6cm
- Cableado:
- Rojo: Alimentación +
- Negro: Fuente -
- Verde: Señal +
- Blanco: Señal –

4. Selección del transmisor

Para determinar que transmisor se implementara para el sensor se hace una matriz de selección, donde se asignan una serie de pesos dependiendo las características que se requieren en nuestro sistema, se debe hacer una buena elección para estos de elementos ya que el tiempo de respuesta del sistema depende directamente de estos dos, por lo cual se requiere una gran precisión y velocidad de respuesta.

La tabla 3 refleja los pesos asignados para llevar a cabo la elección del transmisor y la tabla 4 muestra la selección del transmisor basado en los criterios previamente establecidos.

Tabla 3 matriz de evaluación de las características para la selección del transmisor

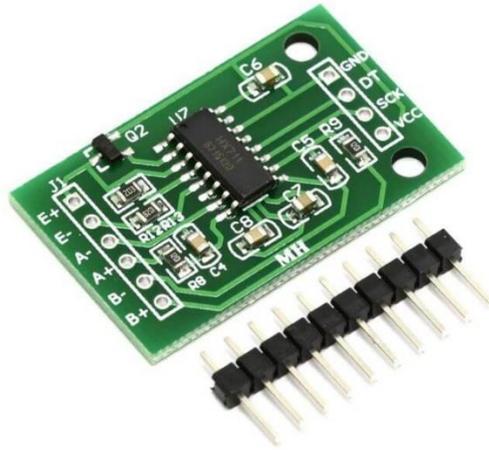
Criterios y puntaje	1	2	3	4	5
Factibilidad	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta
Impacto	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta

Innovación	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta
costo	Elevado	Regular	Medio	Alta	Muy alta
Tiempo de respuesta	Muy lento	Lento	Regular	Rápido	Muy rápido

Tabla 4 Matriz de selección del transmisor

	CRITERIOS	HX711	AD820F	AD620
TECNICOS	Eficiencia en el tiempo	5	2	4
	Precisión	4	3	3
	Rango de variación	4	3	4
	Consumo de corriente	5	2	3
	Flujo volumétrico	4	3	5
	SUBTOTAL	4.4	2.6	3.8
ECONOMICOS	Costo del equipo	5	4	3
	Garantía y servicio	5	5	5
	SUBTOTAL	5	4.5	4
	TOTAL	4.7	3.55	3.9

Figura 5 Transmisor HX711



Este módulo permite trabajar fácilmente con el circuito integrado HX711, que facilita en gran medida la interfaz con celdas de carga para medir peso / fuerza. Al conectar el amplificador al microcontrolador es posible medir los cambios en la resistencia de la celda de carga y con algunas calibraciones y cálculos, es posible obtener medidas bastante precisas. Esto es ideal para crear tu propia báscula en aplicaciones industriales, realizar sistemas de control de inventario, sistemas de detección de presencia, etc.

El HX711 usa una interfaz de 2 hilos para realizar la comunicación. Para esto es posible utilizar 2 pines de I/O de cualquier microcontrolador. En cuanto al software, ya hay varias librerías que permiten realizar la interfaz de este dispositivo con plataformas populares como Arduino.

Las celdas de carga utilizan un puente wheatstone que requiere de 4 conexiones con el HX711, los colores utilizados habitualmente son Rojo, Negro, Blanco, Verde y Amarillo. Cada color corresponde a una señal como se muestra a continuación:

- Rojo: Voltaje de excitación +, E+, VCC
- Negro: Voltaje de excitación -, E- GND
- Blanco: Amplificador +, Señal +, A+
- Verde: Amplificador -, Señal -, A-
- Amarillo: Tierra, normalmente no conectada a la celda, solo como protección contra interferencia electromagnética.

Características del HX711 Módulo amplificador para celda de carga

- Digitalización completa en el chip HX711

- Conexión a protoboard o tarjeta con header estándar
- 2 canales diferenciales de entrada
- Interfaz de salida digital serial
- Regulador integrado en chip para fuente analógica
- Voltaje de operación: 2.7 – 5 volts
- Corriente de operación: < 1.5mA
- Corriente en espera: <1 uA
- Tiempo de muestreo: seleccionable entre 80 y 10 muestras por segundo
Funciona con Arduino, Microcontroladores PIC y de otras marcas.

5. Selección del actuador

Para determinar que actuador implementar se hace una matriz de selección, donde se asignan una serie de pesos dependiendo las características que se requieren en nuestro sistema, se debe hacer una buena elección para estos de elementos ya que el tiempo de respuesta del sistema depende directamente de estos dos, por lo cual se requiere una gran precisión y velocidad de respuesta.

La tabla 5 refleja los pesos asignados para llevar a cabo la elección del actuador y la tabla 6 muestra la selección del actuador basado en los criterios previamente establecidos.

Tabla 5 Matriz de evaluación de las características para la selección del actuador

Criterios y puntaje	1	2	3	4	5
Factibilidad	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta
Impacto	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta
Innovación	Muy poca	Poca	Mediana	Alta	Muy alta
costo	Elevado	Regular	Medio	Alta	Muy alta
Tiempo de respuesta	Muy lento	Lento	Regular	Rápido	Muy rápido

Tabla 6 Matriz de selección del actuador

	CRITERIOS	Mini Bomba QR303	Bomba DC de carro Renault	Bomba AC de pecera
TECNICOS	Eficiencia en el tiempo	5	2	4
	Precisión	4	3	3
	Rango de variación	4	3	4
	Consumo de corriente	5	2	3
	Flujo volumétrico	4	3	5
	SUBTOTAL	4.4	2.6	3.8
ECONOMICOS	Costo del equipo	5	4	3
	Garantía y servicio	5	5	5
	SUBTOTAL	5	4.5	4
TOTAL		4.7	3.55	3.9

Presentadas las características de los actuadores más empleados para transportar el líquido, se ha hecho la elección de la mini bomba QR30E, a continuación, se presentan las características y generalidades de esta bomba.

Figura 6 Mini bomba QR30E



Descripción general:

Mini Bomba de Agua Sumergible Impermeable DC Ultra silencioso 12 V 4.2 W
240L/H Caudal Bomba Sin Escobillas

características:

- H Max → Altura Máxima → 300cm
- sin escobillas, rotor magnético permanente.
- súper larga vida útil (más de 30000 horas).
- bajo consumo y bajo nivel de ruido.
- eje de cerámica de alto rendimiento.
- diseño anfibia, instalación sumergible y totalmente resistente al agua.
- con los ejes se incluye con el lacre estático, no dinámico, que puede evitar problemas de fugas.

especificaciones:

- tamaño: 54 (L) x37 (W) x42 (H) mm
- Voltaje: DC12V
- Corriente nominal: MA
- Consumo de energía: 4.2 W
- Caudal: 240L/H
- Material: de plástico
- diámetro de entrada: 8mm
- diámetro de salida: 8mm

- Vida Útil de trabajo: 20000 horas
- ruido: = 40DB
- A Prueba De agua: IP68
- Resistencia Al calor: 0-100 °
- Longitud del cable: 45 CM
- Color: negro

ANEXO B: ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.

1. Pre-acondicionamiento de la señal: comunicación sensor transmisor - Arduino

Debido al funcionamiento del transmisor (HX711) de la celda de carga resulta complejo acondicionar directamente la señal del mismo desde Matlab, ya que este dispositivo dispone de un emisor y un receptor, el cual tiene su propio protocolo de comunicación. Protocolo el cual es fácil de recibir con Arduino, ya que este microcontrolador posee una librería para dicha comunicación. Y aparte dicha comunicación no cumple los protocolos estándar industriales de comunicación 4-20 mA, 1-5V, o protocolo de comunicación serial factory bus, field bus.

Por lo que la señal de entrada (resultante del sensor), debe ser previamente obtenida desde un Arduino nano donde se acondiciona, para luego ser enviada por un convertor D/A en protocolo 1-5V.

Para lo cual, inicialmente se debe plasmar el código fuente en Arduino para la lectura del sensor, donde como resultado se obtendrá el peso del líquido contenido en el tanque. El código es el siguiente:

Primero para hallar la escala:

```
// Librería para utilizar el transmisor de celda de carga HX711
#include "HX711.h"
#define DT A0
#define SCK A1
// Creación del objeto para el transmisor de celda de carga HX711
HX711 balanza(DT, SCK);
//Programa principal
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Lectura del valor del ADC:t");
  Serial.println(balanza.read());//Muestro por serial la lectura de la balanza digital
  Serial.println("No ponga ningun objeto sobre la balanza");
  Serial.println("Destarando...");
  balanza.set_scale();//La escala por defecto es 1
  balanza.tare(20);//El peso actual es considerado Tara.
  Serial.println("Coloque un peso conocido:");
}

void loop()
{
  Serial.print("Valor de lectura: t");
  Serial.println(balanza.get_value(10), 0); // Se obtiene el valor necesario para calcular la ESCALA
  delay(100);
}
```

Luego para pesar el peso del líquido contenido en el tanque en el protocolo no estandarizado:

```
// Librería para utilizar el transmisor de celda de carga HX711
#include "HX711.h"
#define DT A1
#define SCK A0
// Creación del objeto para el transmisor de celda de carga HX711
HX711 balanza(DT, SCK);
// Programa principal
int ESCALA=360000/900;// ESCALA=(Valor de lectura)/(Peso real)
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Lectura del valor del ADC:t");
  Serial.println(balanza.read()); // Comienzo de la lectura de la balanza digital
  Serial.println("No ponga ningun objeto sobre la balanza");
  Serial.println("Destarando...");
  Serial.println("...");
  balanza.set_scale(ESCALA); // Establecemos la ESCALA calculada anteriormente
  balanza.tare(20); // El peso actual es considerado Tara.
  Serial.println("BALANZA DIGITAL, LISTO PARA PESAR");
  delay(5000); // Esperamos 5 segundos para comenzar a pesar
}

void loop()
{
  Serial.print("Peso: ");
  Serial.print(balanza.get_units(20), 0); // Se obtiene el valor real del peso en Kg del elemento
  Serial.println("g");
}
```

Ya teniendo la señal en el protocolo no estandarizado se procede a estandarizarlo con un conversor D/A a la salida del Arduino.

```
// Librería para utilizar el transmisor de celda de carga HX711
#include "HX711.h"
#define DT A1
#define SCK A0
// Creación del objeto para el transmisor de celda de carga HX711
HX711 balanza(DT, SCK);
// Programa principal
int ESCALA=360000/900;// ESCALA=(Valor de lectura)/(Peso real)
#include<Wire.h>
#define MCP4725 0x62// Codigodel bus I2C
unsigned int var2;
unsigned int peso;
float pesoconv;
byte buffer[3];
```

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();//Iniciar I2C
  Serial.print("Lectura del valor del ADC:t");
  Serial.println(balanza.read()); // Comienzo de la lectura de la balanza digital
  Serial.println("No ponga ningun objeto sobre la balanza");
  Serial.println("Destarando...");
  Serial.println("...");
  balanza.set_scale(ESCALA); // Establecemos la ESCALA calculada anteriormente
  balanza.tare(20); // El peso actual es considerado Tara.
  Serial.println("BALANZA DIGITAL, LISTO PARA PESAR");
  delay(5000); // Esperamos 5 segundos para comenzar a pesar
}

void loop()
{
  Serial.print("Peso: ");
  peso=balanza.get_units(5);
  Serial.print(peso);
  Serial.println("g");
  pesoconv=((int)peso)*4;
  var2=(pesoconv*818/(2159))+204*4;
  //MCP
  buffer[0]=0b01000000;//byte de control
  buffer[1]=var2>>4;//MSB 11-4 shift righth 4 places
  buffer[2]=var2<<4;//LSB 3-0 shift left left 4 places

  Wire.beginTransmission(MCP4725); //Direccion del dispositivo
  Wire.write(buffer[0]);//Puntero
  Wire.write(buffer[1]);//8 MSB
  Wire.write(buffer[2]);//4 LSB
  Wire.endTransmission();
}

```

2. Acondicionamiento de la señal de entrada: comunicación Arduino- Matlab

La señal protocolada 1-5V es recibida por un segundo Arduino el cual es controlado por la toolbox de Arduino de Simulink

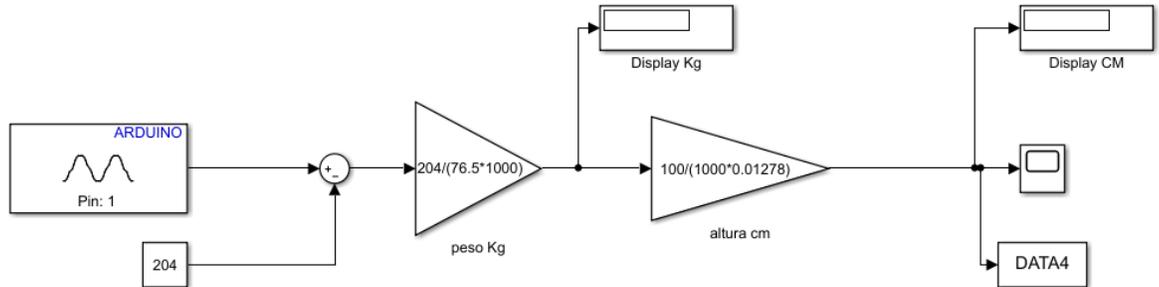


Figura 7 diagrama de bloques del escalamiento del dato de lectura del sensor

El dato llega en analógico y es escalado para convertirlo en peso, a partir de la equivalencia de escalamiento del transmisor 1-5V. Pasando luego por un segundo escalamiento que llevar el peso en altura, basado en la siguiente ecuación matemática:

$$densidad = \frac{m}{v}$$

$$densidad = \frac{m}{A \times h}$$

$$h = \frac{m}{A \times densidad}$$

3. Acondicionamiento de la señal de salida: Envío de señal de control (PWM – BOMBA)

A continuación, se presenta el diagrama de bloques para enviar el dato del control del PWM al microcontrolador haciendo uso del serial.

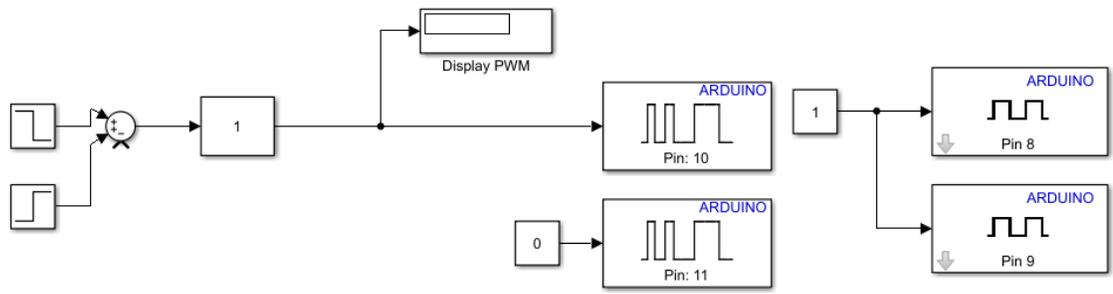


Figura 8 diagrama de bloques de la emisión de la señal de control hacia el actuador

ANEXO C: GRAFICAS DE LAS DATAS DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA LAZO ABIERTO

1. Datas del proceso de identificación

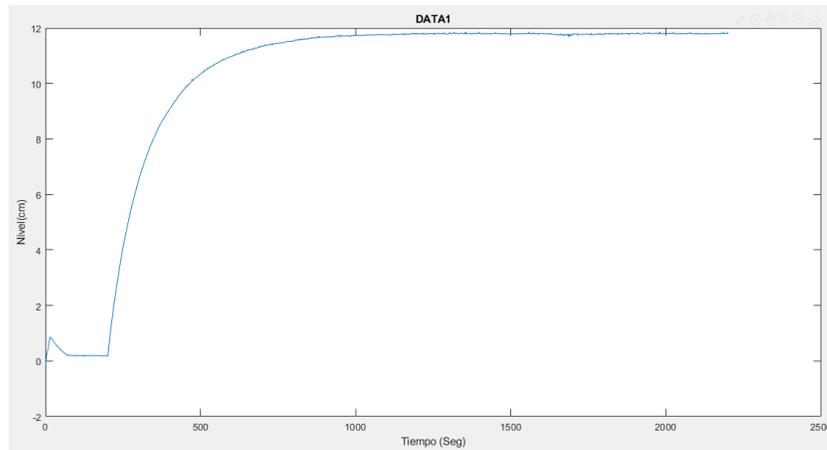


Figura 9 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 1)

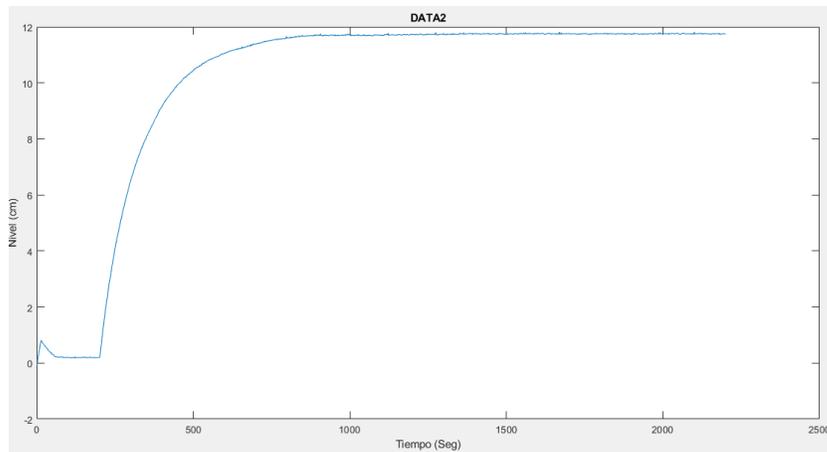


Figura 10 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 2)

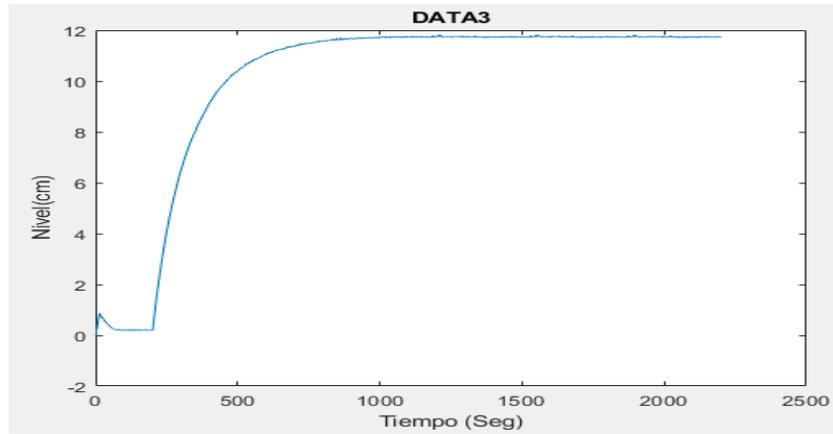


Figura 11 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 3)

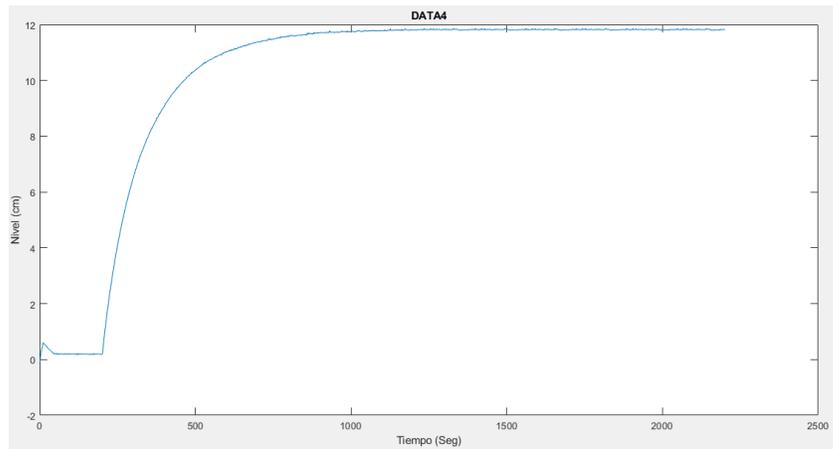


Figura 12 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 4)

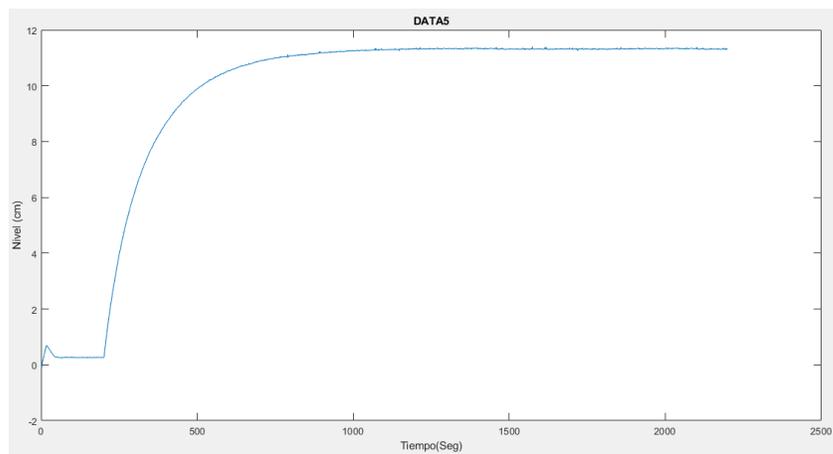


Figura 13 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 5)

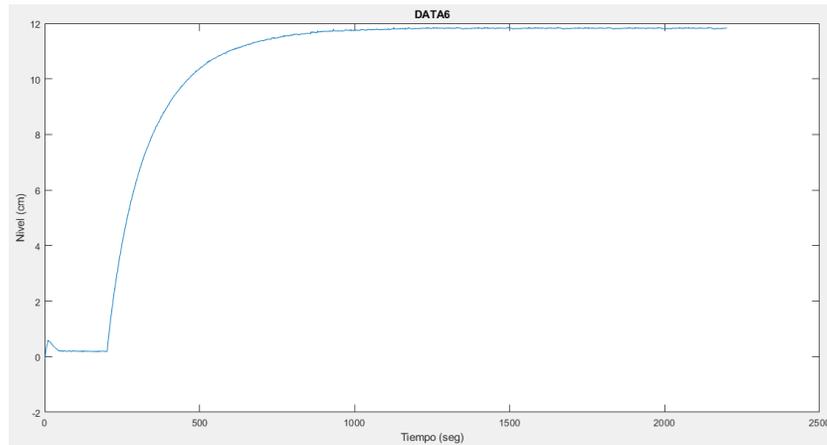


Figura 14 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 6)

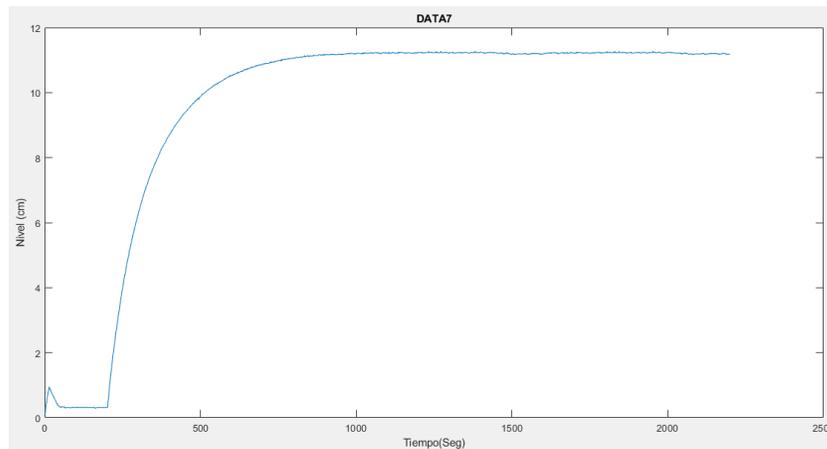


Figura 15 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 7)

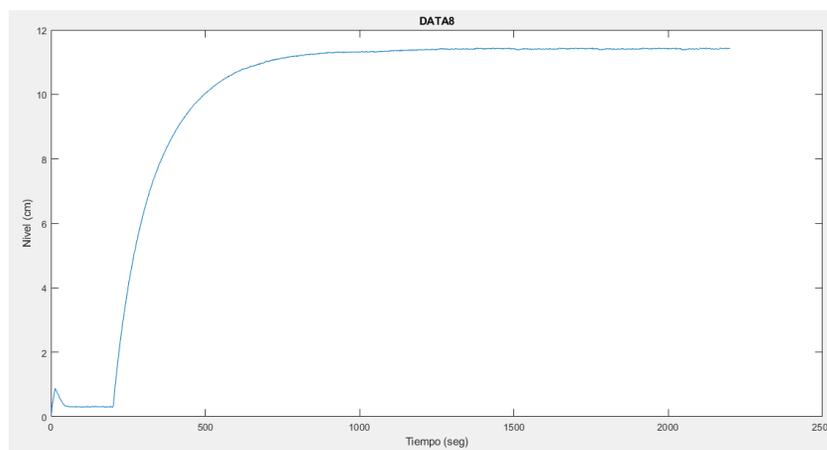


Figura 16 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 8)

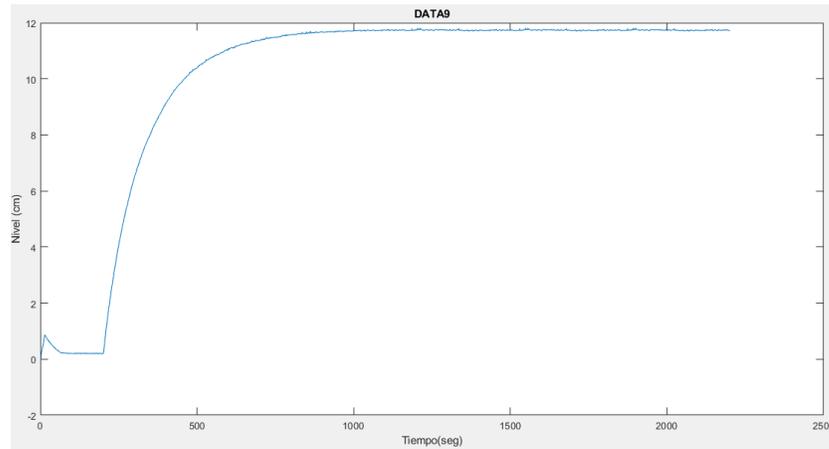


Figura 17 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 9)

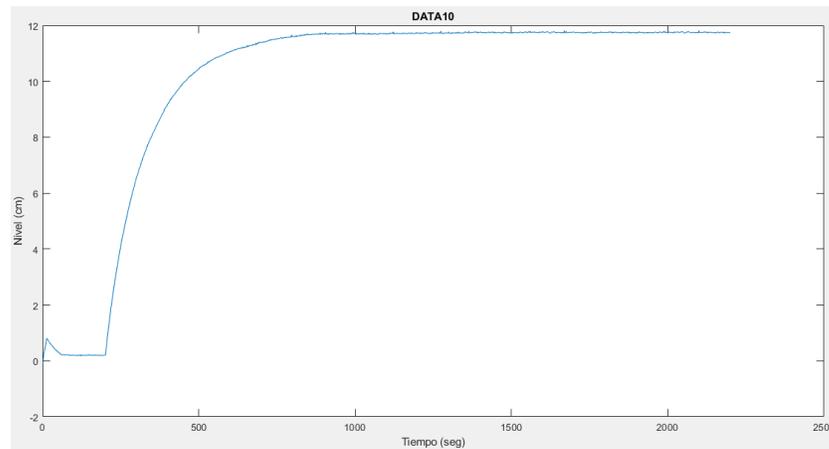


Figura 18 Respuesta del sistema en lazo abierto(Data 10)

ANEXO D: DATAS DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO CON PROMEDIO

1. Método de dos puntos de Smith

- Punto de convergencia:

$$\Delta y = 11.37 \text{ cm}$$

- Punto de convergencia al 63.2%:

$$\Delta y_{63\%} = 7.18 \text{ cm}$$

- Punto de convergencia al 63.2% en el dominio del tiempo según data promedio:

TIEMPO SEGUNDO ESCALON (s)	PROMEDIO
132	7.08083
133	7.11198
134	7.13690
135	7.16805
136	7.20232
137	7.22723
138	7.25215
139	7.28953

Ya que por tabla no se consiguió el valor deseado se interpolo entre los dos valores cercanos al valor requerido obteniéndose así:

$$t_{63\%} = 135.5s$$

- Punto de convergencia al 28.3%:

$$\Delta y_{28\%} = 3.21 \text{ cm}$$

- Punto de convergencia al 28.3% en el dominio del tiempo según data promedio:

TIEMPO SEGUNDO ESCALON (s)	PROMEDIO
40	2.99030
41	3.05572
42	3.13359
43	3.20212
44	3.26130
45	3.32360
46	3.40459
47	3.46377

Ya que por tabla no se consiguió el valor deseado se interpolo entre los dos valores cercanos al valor requerido obteniéndose así:

$$t_{28\%} = 43.16s$$

2. Método de Sundaresan y Krischnaswami

- Punto de convergencia:

$$\Delta y = 11.37 \text{ cm}$$

- Punto de convergencia al 63%:

$$\Delta y_{85.3\%} = 9,69 \text{ cm}$$

- Punto de convergencia al 85.3% en el dominio del tiempo según data promedio:

TIEMPO SEGUNDO ESCALON (s)	PROMEDIO
273	9.67866
274	9.68178
275	9.68178
276	9.69735
277	9.70981
278	9.75030
279	9.77211

$$t_{35\%} = 276s$$

- Punto de convergencia al 35.3%:

$$\Delta y_{35.3\%} = 4,01 \text{ cm}$$

- Punto de convergencia al 35.3% en el dominio del tiempo según data promedio:

TIEMPO SEGUNDO ESCALON (s)	PROMEDIO
54	3.91543
55	3.97461
56	3.93899
57	4.00331
58	4.08095
59	4.09979
60	4.11350
61	4.15374

Ya que por tabla no se consiguió el valor deseado se interpolo entre los dos valores cercanos al valor requerido obteniéndose así:

$$t_{35\%} = 57.12s$$

Véase la data promedio completa pulsando aquí

ANEXO E: SELECCIÓN DEL MODELO QUE MÁS SE AJUSTE AL COMPORTAMIENTO DE LA PLANTA

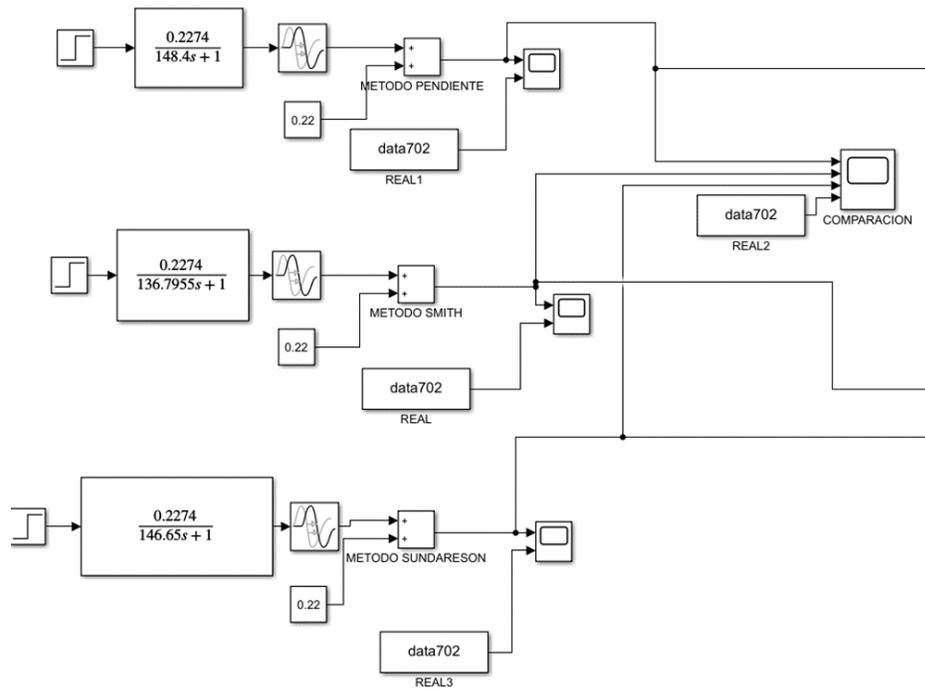


Figura 19 Diagrama de bloques de los métodos de identificación aplicados (tangente de Ziegler y Nichols, dos puntos de Smith y Sundaresan y krischnaswami).

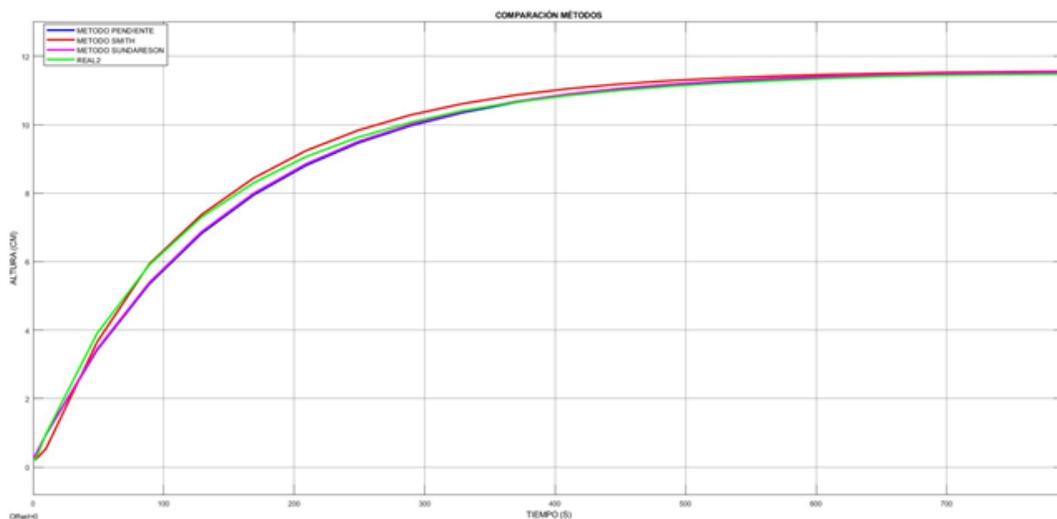


Figura 20 Comparación grafica de los métodos de identificación

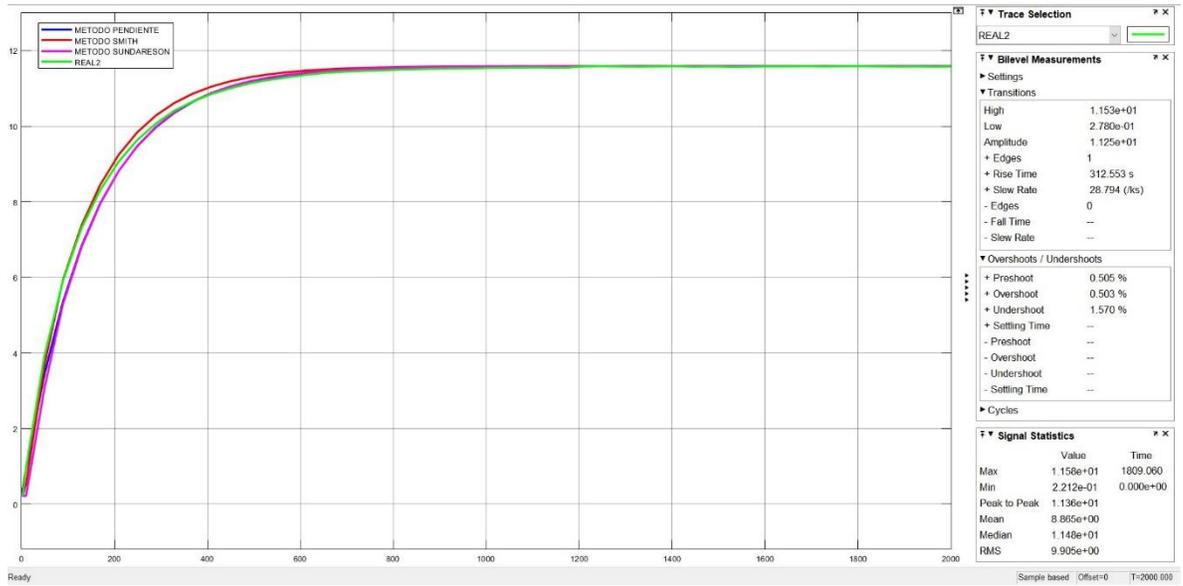


Figura 21. Análisis de los márgenes de la respuesta real

- Análisis del método de la pendiente de Ziegler y Nichols

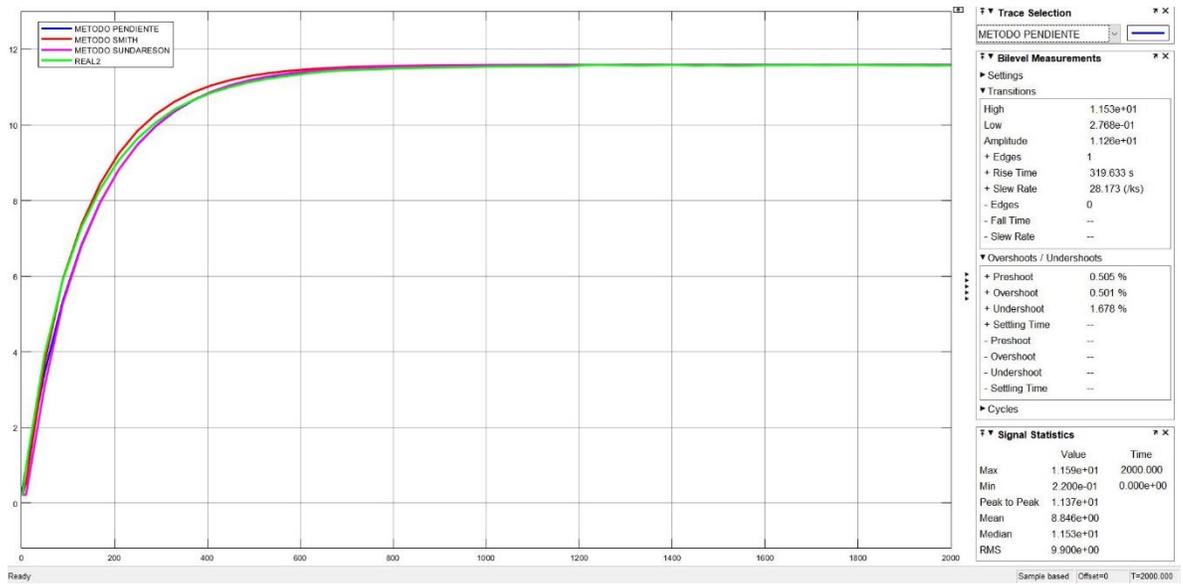


Figura 22 Análisis de los márgenes del método de la pendiente de Ziegler y Nichols

Tabla 7 Márgenes de respuesta del método de la pendiente de Ziegler y Nichols

MARGEN	METODO	REAL	METODO DE LA PENDIENTE	ERROR POR DESVIACION
Transitorio	High	11.53	11.53	0
	Low	0.2780	0.2768	0,43165468
	Amplitude	11.25	11.26	0,08888889
	Rise Time	312.553 s	319.633 s	2,26521582
	Slew Rate	28.794 (/ks)	28.173 (1/ks)	2,15669931
Estacionario	Max	11.58	11.59	0,08635579
	Min	0.2212	0.22	0,54249548
	Peak to Peak	11.36	11.37	0,08802817
	Mean	8.865	8.846	0,214326
	Median	11.48	11.53	0,43554007
	RMS	9.905	9.90	0,05047956
Overshoots/Undershoots	Preshoot	0.505%	0.505%	0
	Overshoot	0.503%	0.501%	0,39761431
	Undershoot	1.570	1.678%	6,87898089

- Análisis del método de los dos puntos de Smith

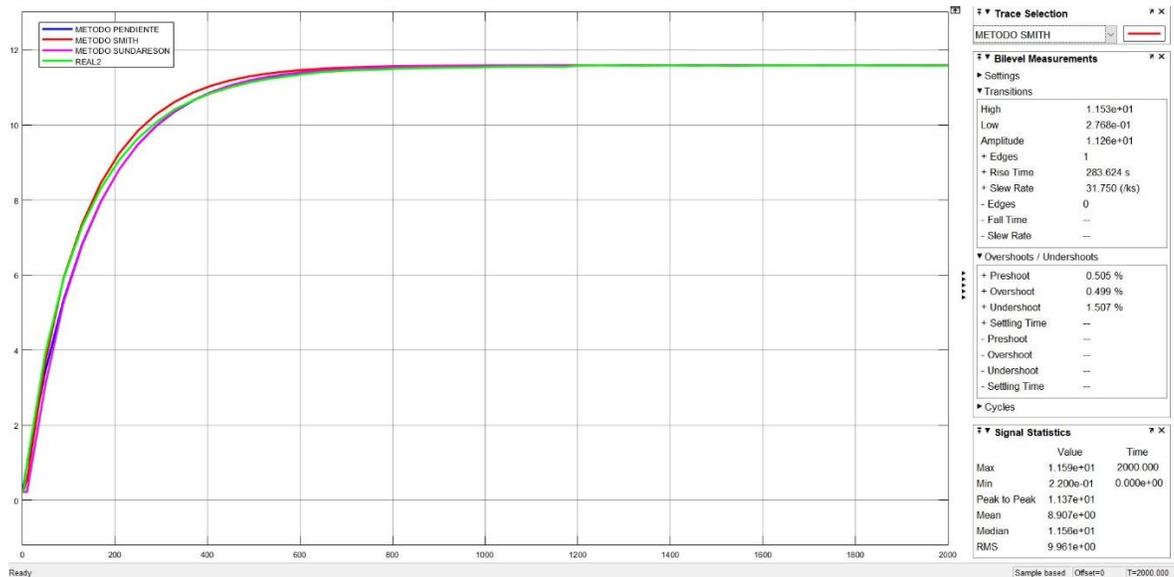


Figura 23 Análisis de los márgenes del método de los dos puntos de Smith

Tabla 8 Márgenes de respuesta del método de los dos puntos de Smith

MARGEN	METODO	REAL	METODO DE SMITH	ERROR POR DESVIACION
Transitorio	High	11.53	11.53	0
	Low	0.2780	0.2768	0,43165468
	Amplitude	11.25	11.26	0,08888889
	Rise Time	312.553 s	283.624 s	9,25571023
	Slew Rate	28.794 (/ks)	31.750 (1/ks)	10,2660276
Estacionario	Max	11.58	11.59	0,08635579
	Min	0.2212	0.22	0,54249548
	Peak to Peak	11.36	11.37	0,08802817
	Mean	8.865	8.907	0,47377327
	Median	11.48	11.56	0,69686411
	RMS	9.905	9.961	0,56537102
	Preshoot	0.505%	0.505%	0

Overshoots/Undershoots	Overshoot	0.503%	0.499%	0,79522863
	Undershoot	1.570	1.507%	0

- Análisis del método de Sundaresan y Krishnaswami

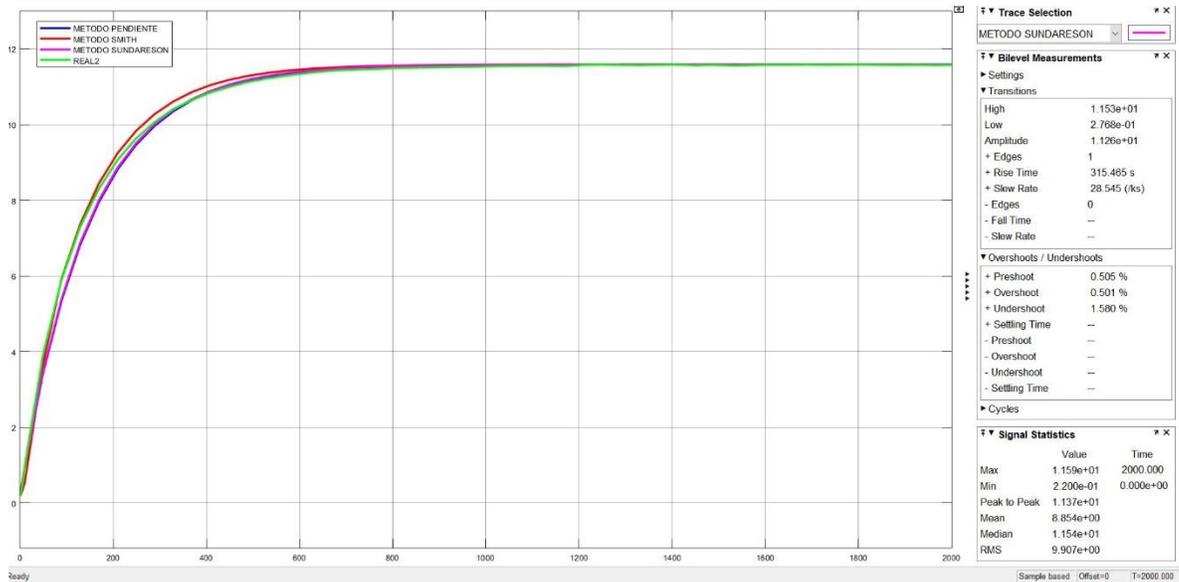


Figura 24 Análisis de los márgenes del método de Sundaresan y Krishnaswami

Tabla 9 Márgenes de respuesta del método de Sundaresan y Krishnaswami

MARGEN	METODO	REAL	METODO DE S Y K	ERROR POR DESVIACION
Transitorio	High	11.53	11.53	0
	Low	0.2780	0.2768	0,43165468
	Amplitude	11.25	11.26	0,08888889
	Rise Time	312.553 s	315,465 s	0,93168199
	Slew Rate	28.794 (/ks)	28,545 (1/ks)	0,86476349
Estacionario	Max	11.58	11.59	0,08635579

	Min	0.2212	0.22	0,54249548
	Peak to Peak	11.36	11.37	0,08802817
	Mean	8.865	8.854	0,12408347
	Median	11.48	11.54	0,52264808
	RMS	9.905	9,907	0,02019182
Overshoots/ Undershoots	Preshoot	0.505%	0.505%	0
	Overshoot	0.503%	0,501%	0,39761431
	Undershoot	1.570	1,580%	0,63694268

- Comparación de los márgenes de respuesta de los métodos aplicados

Tabla 10 Comparación numérica de los márgenes de respuesta

		ERROR POR DESVIACIÓN	Método Pendiente (%)	Método Smith (%)	Método S Y K (%)
MARGEN					
Transitorio	High		0	0	0
	Low		0,43165468	0,43165468	0,43165468
	Amplitude		0,08888889	0,08888889	0,08888889
	Rise Time		2,26521582	9,25571023	0,93168199
	Slew Rate		2,15669931	10,2660276	0,86476349
Estacionario	Max		0,08635579	0,08635579	0,08635579
	Min		0,54249548	0,54249548	0,54249548
	Peak to Peak		0,08802817	0,08802817	0,08802817
	Mean		0,214326	0,47377327	0,12408347
	Median		0,43554007	0,69686411	0,52264808
	RMS		0,05047956	0,56537102	0,02019182

Overshoots/Undershoots	Preshoot	0	0	0
	Overshoot	0,39761431	0,79522863	0,39761431
	Undershoot	6,87898089	0	0,63694268

Tabla 11. Métodos con menor error en cada margen

MARGEN		Método con menor error
Transitorio	High	1/2/3
	Low	1/2/3
	Amplitude	1/2/3
	Rise Time	3
	Slew Rate	3
Estacionario	Max	1/2/3
	Min	1/2/3
	Peak to Peak	1/2/3
	Mean	3
	Median	1
	RMS	3
Overshoots/Undershoots	Preshoot	1/2/3
	Overshoot	1/3
	Undershoot	3

ANEXO F: AMPLIACIÓN DE RANGO DIFUSO TIPO 2

Se parametrizan los valores de las ganancias de entrada y salida de tal forma que se obtenga una ecuación que describa los valores ideales de ganancia para cada Setpoint dentro del rango de trabajo del proceso. Para cumplir con dicha actividad se documentaron los valores de ganancia para diferentes Setpoint en todo el rango de trabajo del proceso, para posteriormente caracterizar la ecuación que modela el comportamiento de las ganancias.

Para un Sp de 1:

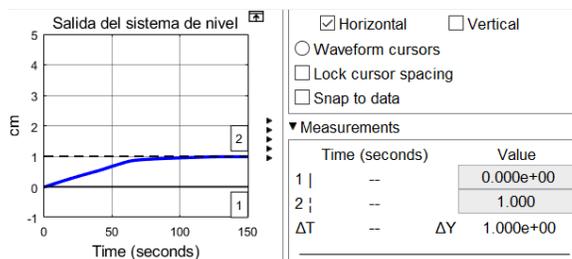


Figura 25 Salida del sistema

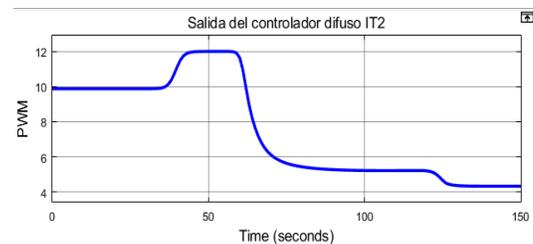


Figura 26 Salida del controlador

Para un Sp 1.5:

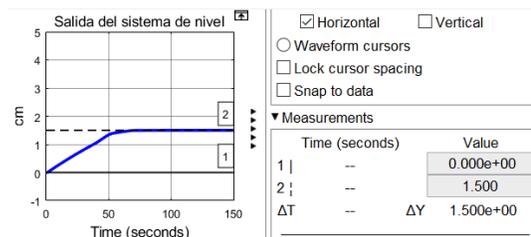


Figura 27 Salida del sistema

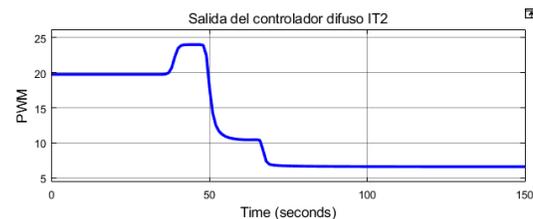


Figura 28 Salida del controlador

Para un Sp 2:

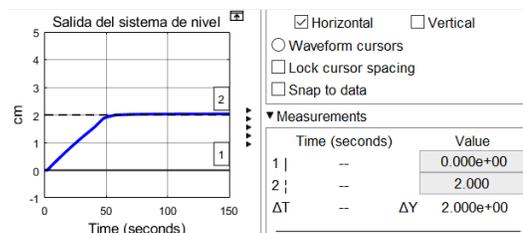


Figura 29 Salida del sistema

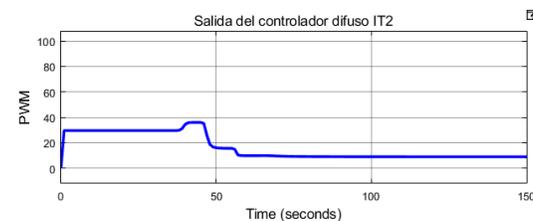


Figura 30 Salida del controlador

Para un Sp 2.5:

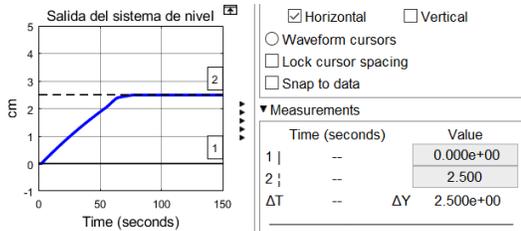


Figura 31 Salida del sistema

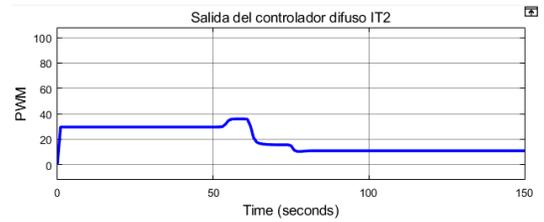


Figura 32 Salida del controlador

Para un Sp 3:

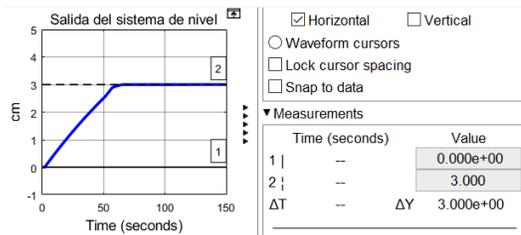


Figura 33 Salida del sistema

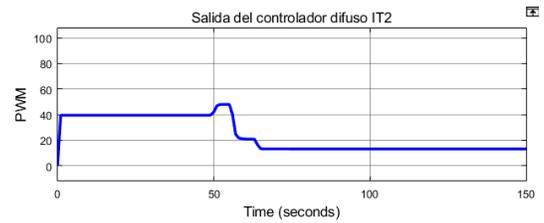


Figura 34 Salida del controlador

Para un Sp 3.5:

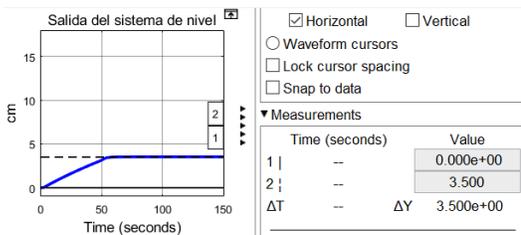


Figura 35 Salida del sistema

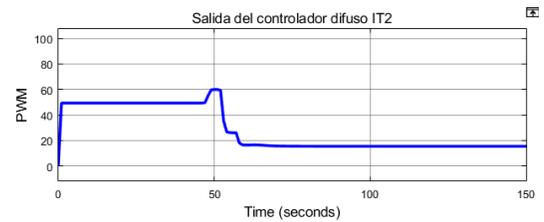


Figura 36 Salida del controlador

Para un Sp 4:

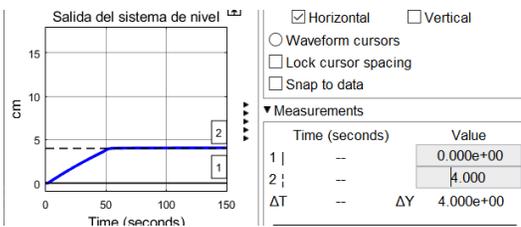


Figura 37 Salida del sistema

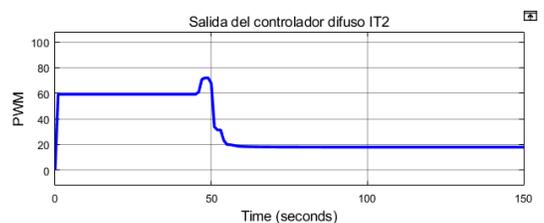


Figura 38 Salida del controlador

Para un Sp 4.5:

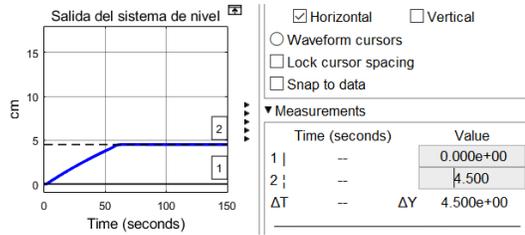


Figura 39 Salida del sistema

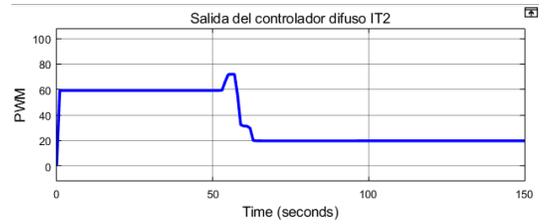


Figura 40 Salida del controlador

Para un Sp 5:

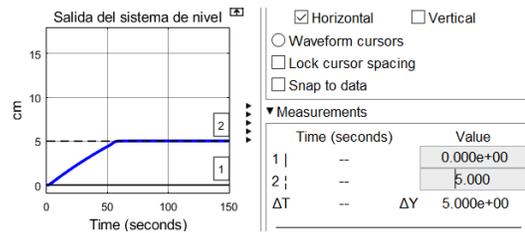


Figura 41 Salida del sistema

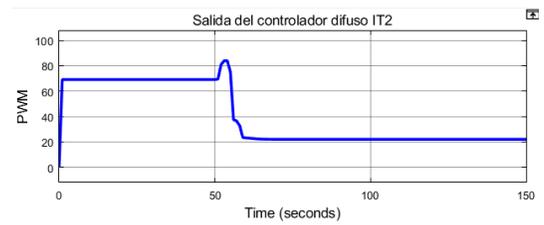


Figura 42 Salida del controlador

Para un Sp 5.5:

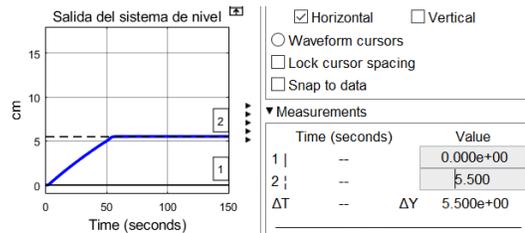


Figura 43 Salida del sistema



Figura 44 Salida del controlador

Para un Sp 6:

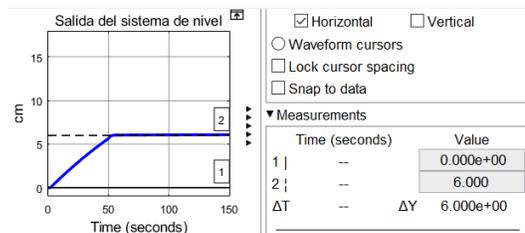


Figura 45 Salida del sistema



Figura 46 Salida del controlador

Para un Sp 6.5:

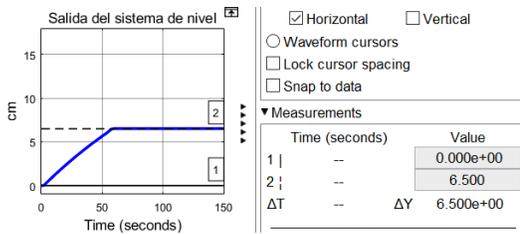


Figura 47 Salida del sistema

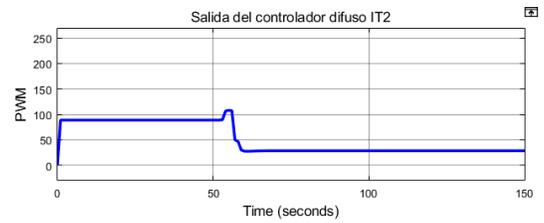


Figura 48 Salida del controlador

Para un Sp 7:

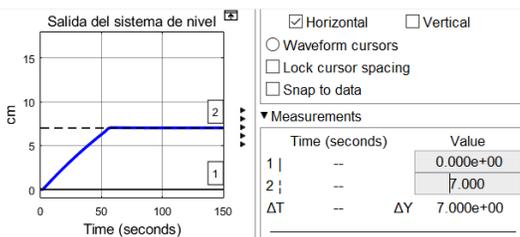


Figura 49 Salida del sistema

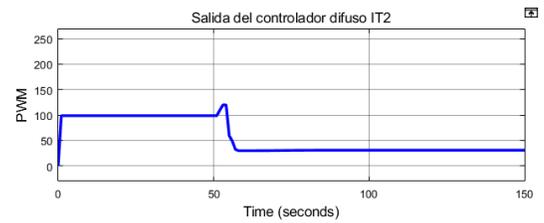


Figura 50 Salida del controlador

Para un Sp 7.5:

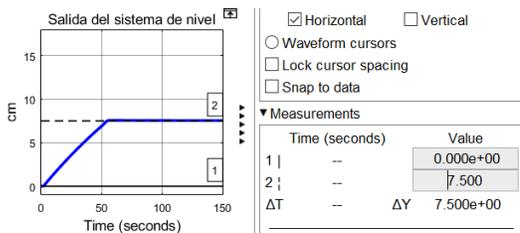


Figura 51 Salida del sistema

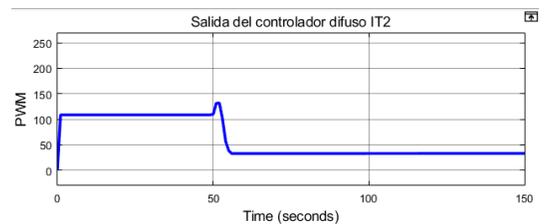


Figura 52 Salida del controlador

Para un Sp 8:

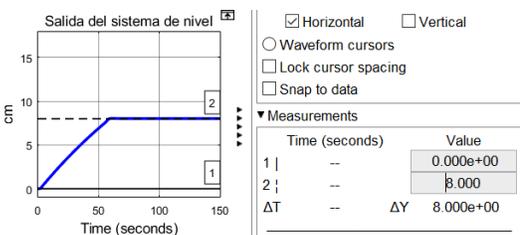


Figura 53 Salida del sistema

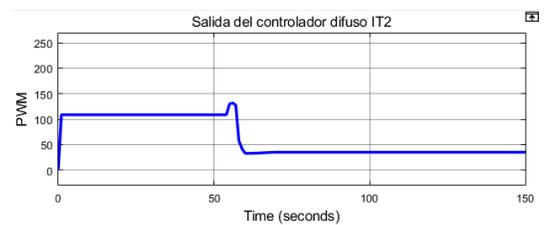


Figura 54 Salida del controlador

Para un Sp 8.5:

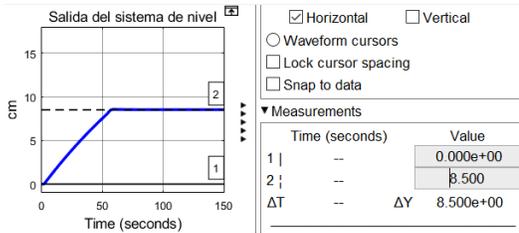


Figura 55 Salida del sistema

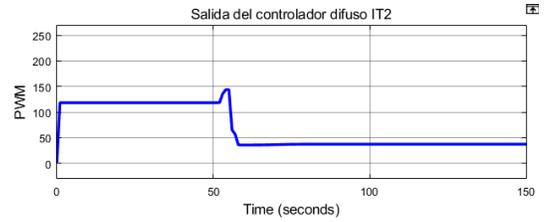


Figura 56 Salida del controlador

Para un Sp 9:

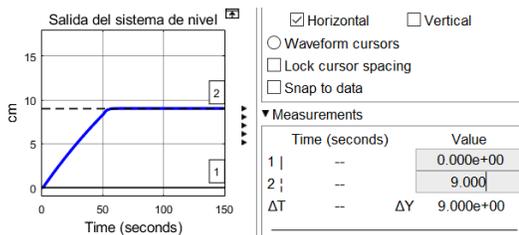


Figura 57 Salida del sistema

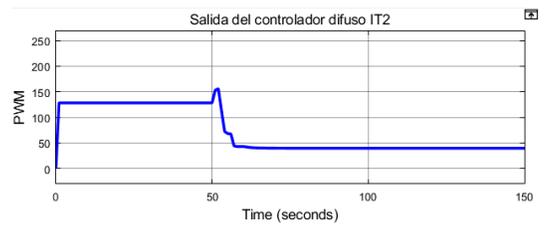


Figura 58 Salida del controlador

Para un Sp 9.5:

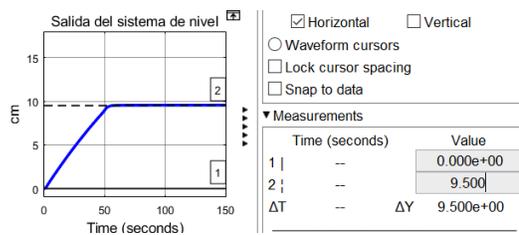


Figura 59 Salida del sistema

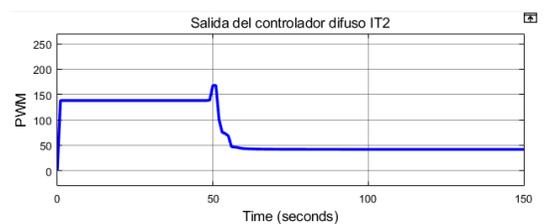


Figura 60 Salida del controlador

Para un Sp 10:

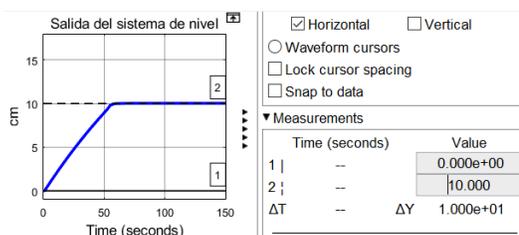


Figura 61 Salida del sistema

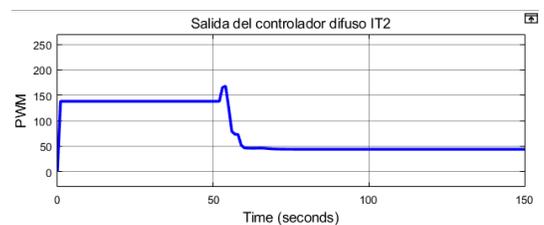


Figura 62 Salida del controlador

Para un Sp 10.5:

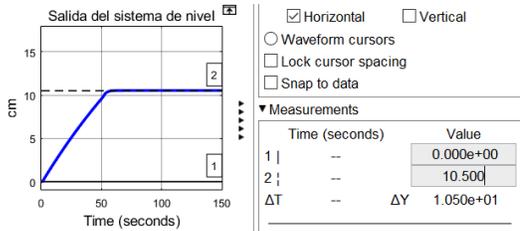


Figura 63 Salida del sistema

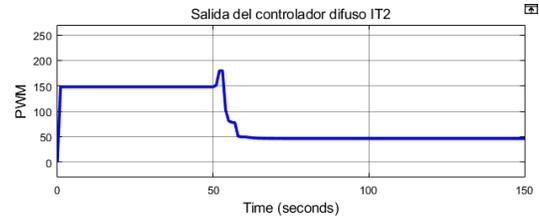


Figura 64 Salida del controlador

Para un Sp 11:

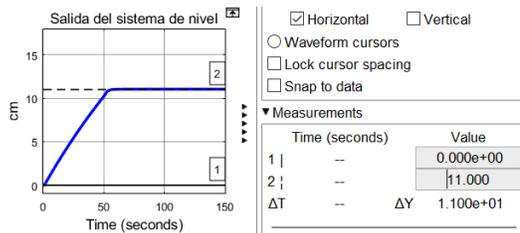


Figura 65 Salida del sistema

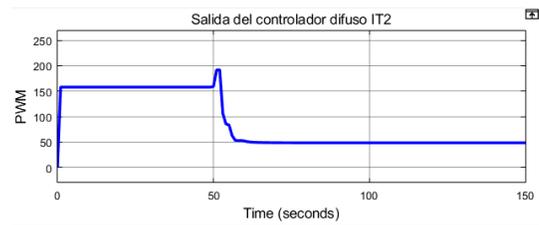


Figura 66 Salida del controlador

Para un Sp 11.5:

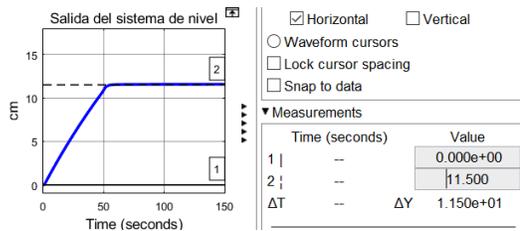


Figura 67 Salida del sistema

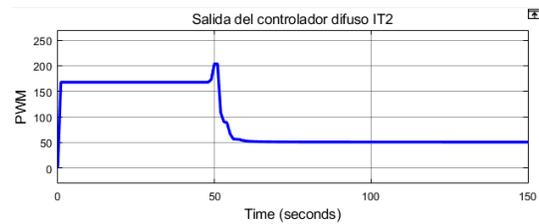


Figura 68 Salida del controlador

Para un Sp 12:

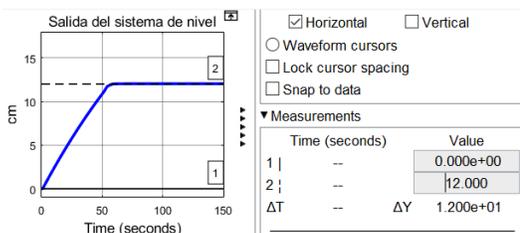


Figura 69 Salida del sistema

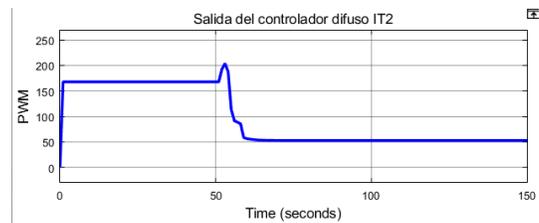


Figura 70 Salida del controlador

Para un Sp 12.5:

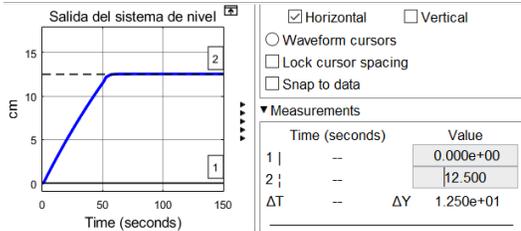


Figura 71 Salida del sistema

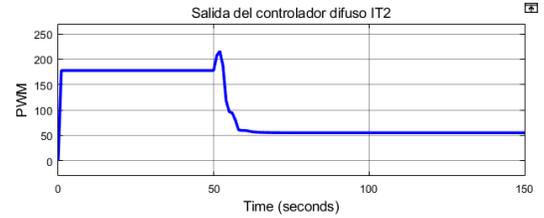


Figura 72 Salida del controlador

Para un Sp 13:

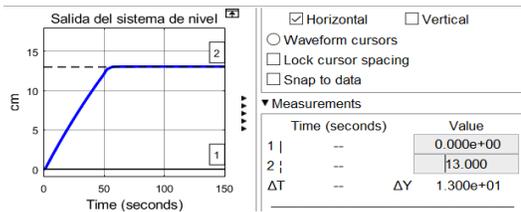


Figura 73 Salida del sistema

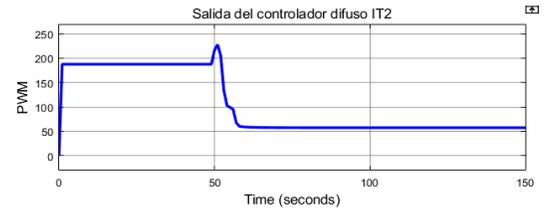


Figura 74 Salida del controlador

Para un Sp 13.5:

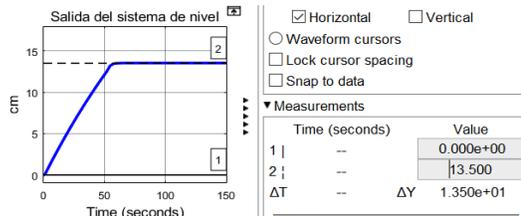


Figura 75 Salida del sistema

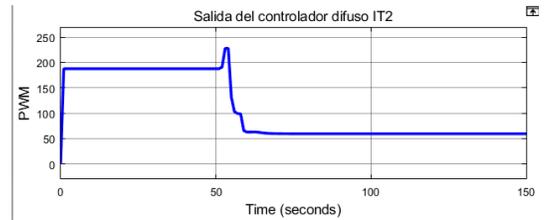


Figura 76 Salida del controlador

Para un Sp 14:

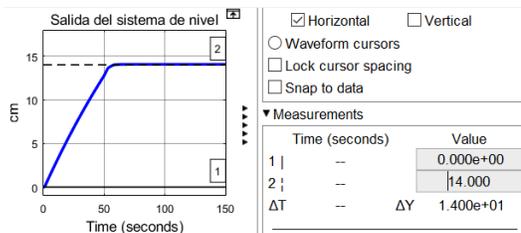


Figura 77 Salida del sistema

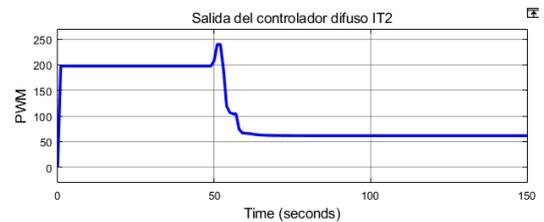


Figura 78 Salida del controlador

Para un Sp 14.5:

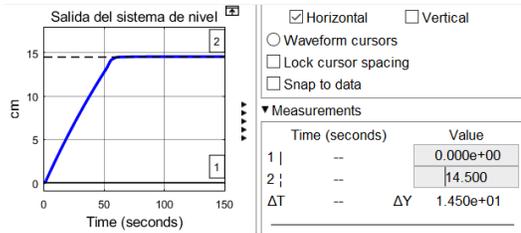


Figura 79 Salida del sistema



Figura 80 Salida del controlador

Para un Sp 15.5:

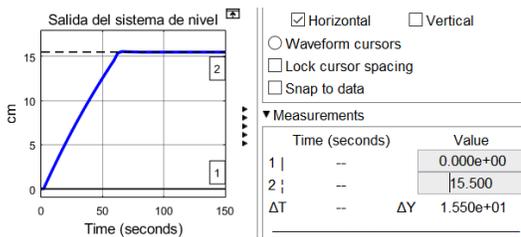


Figura 81 Salida del sistema



Figura 82 Salida del controlador

Para un Sp 16:

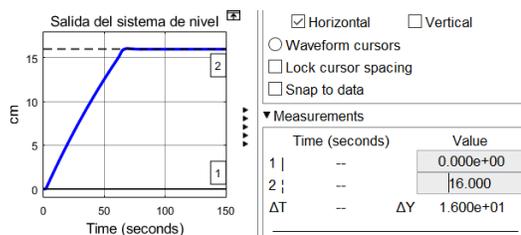


Figura 83 Salida del sistema

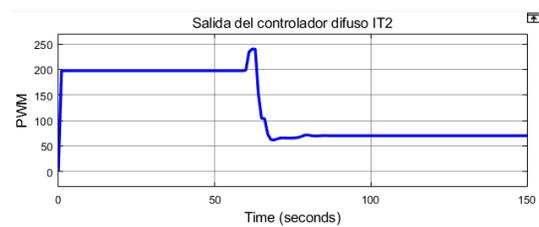


Figura 84 Salida del controlador

Para un Sp 16.5:

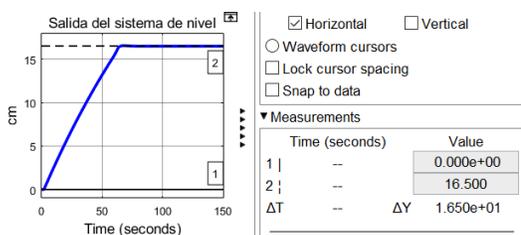


Figura 85 Salida del sistema

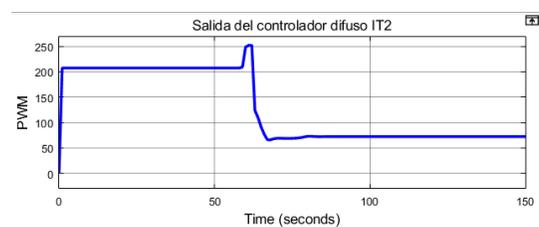


Figura 86 Salida del controlador

Para un Sp 17:

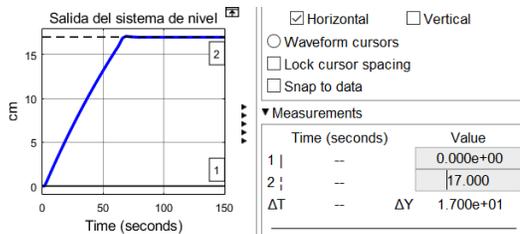


Figura 87 Salida del sistema



Figura 88 Salida del controlador

En la tabla 12 se plasman las ganancias requeridas por el error y la salida del controlador para cada valor de Setpoint

Tabla 12. Ganancia del error y la salida del controlador para valores de Setpoint

Setpoint	Ganancia error	Ganancia mando
1	15	0.05
1.5	15	0.1
2	15	0.15
2.5	15	0.15
3	15	0.2
3.5	15	0.25
4	15	0.3
4.5	15	0.3
5	15	0.35
5.5	15	0.4
6	14	0.45
6.5	14	0.45
7	14	0.5
7.5	13	0.55
8	13	0.55
8.5	12	0.6
9	12	0.65
9.5	11	0.7
10	11	0.7
10.5	10	0.75
11	10	0.8
11.5	9	0.85

12	9	0.85
12.5	8.5	0.9
13	8	0.95
13.5	8	0.95
14	6	1
14.5	6	1
15	6	1
15.5	6	1
16	6	1
16.5	6	1.05
17	6	1.05

Fuente: autor

Obtenida la tabla de ganancias se procede a realizar la respectiva caracterización de cada una en funciones que las interpreten, de esa manera se tiene que:

- Caracterización del error

Usando la herramienta Matlab se calcula la función que interpreta en mejor medida el Setpoint con la ganancia del error, la cual se parametriza como se observa en la figura 89.

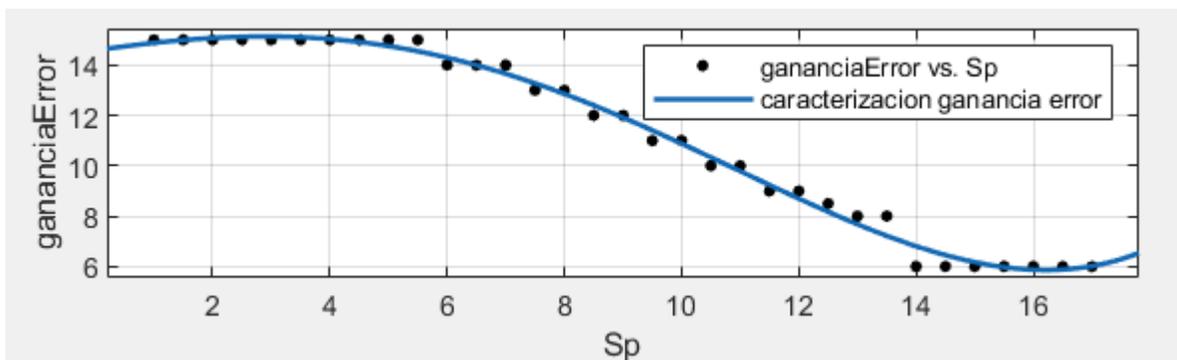


Figura 89 Función de la ganancia del error con respecto al Setpoint

Matlab entrega la información de la caracterización, la cual se da a continuación.

Linear model Poly4:

$$f(x) = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = 0.0004345 (9.737e-05, 0.0007716)

p2 = -0.008746 (-0.02096, 0.00347)

p3 = -0.02577 (-0.1749, 0.1234)

p4 = 0.327 (-0.3717, 1.026)

p5 = 14.59 (13.58, 15.59)

Goodness of fit:

SSE: 3.033

R-square: 0.9925

Adjusted R-square: 0.9914

RMSE: 0.3291

Los resultados obtenidos arrojan una ecuación polinomial del cuarto orden, la cual es configurada en la Simulink como se observa en la figura 90.

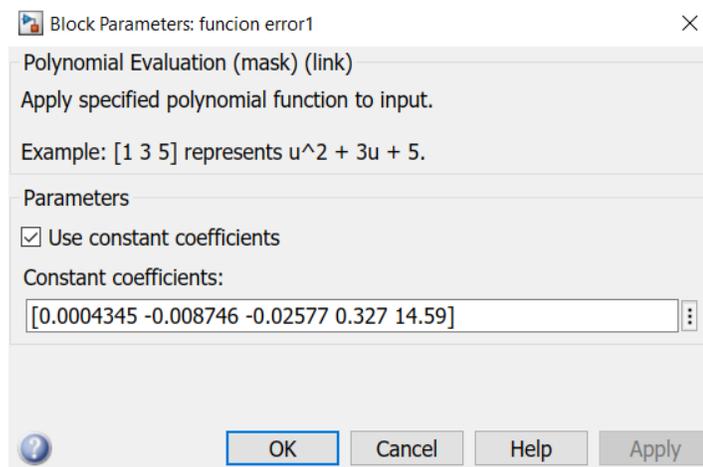


Figura 90. bloque de funciones polinomiales para la ganancia del error

- Caracterización de la salida del controlador

Repitiendo el mismo proceso usado para la caracterización del error se tiene para la acción de control la parametrización que se observa en la figura 91.

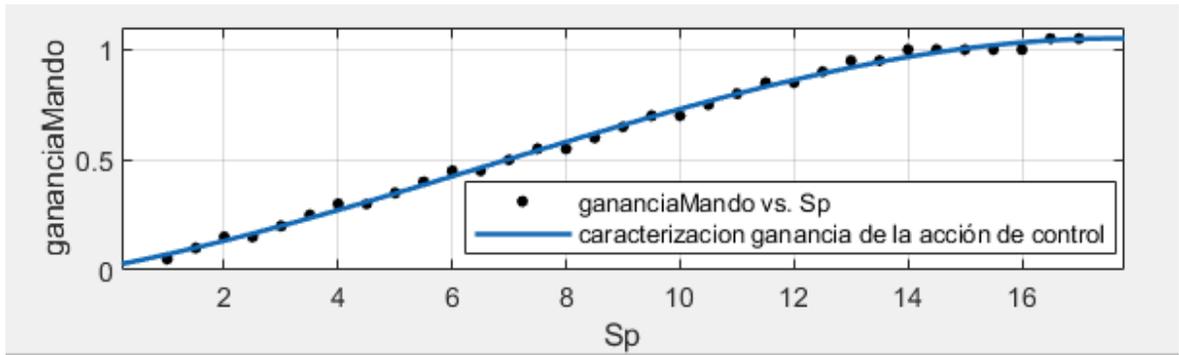


Figura 91. Función de la ganancia de la salida del controlador con respecto al Setpoint

Matlab entrega la información de la caracterización, la cual se da a continuación.

Linear model Poly3:

$$f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -0.0002166 \quad (-0.0002959, -0.0001372)$$

$$p2 = 0.004318 \quad (0.00215, 0.006485)$$

$$p3 = 0.04978 \quad (0.03261, 0.06696)$$

$$p4 = 0.01753 \quad (-0.01993, 0.05499)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.01025

R-square: 0.9969

Adjusted R-square: 0.9966

RMSE: 0.0188

Los resultados obtenidos arrojan una ecuación polinomial del tercer orden, la cual es configurada en la Simulink como se observa en la figura 92.

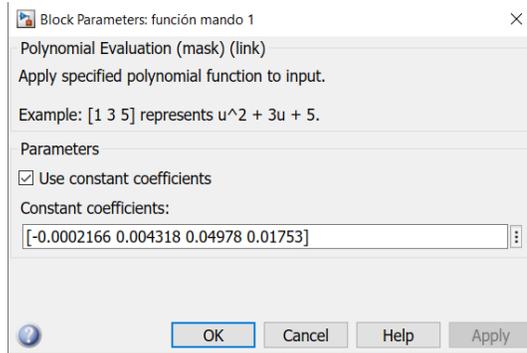


Figura 92 bloque de funciones polinomiales para la ganancia de la salida del controlador

Tras caracterizar las ganancias, se procede a ensamblar el diagrama de bloques general, el cual se observa en la figura 93.

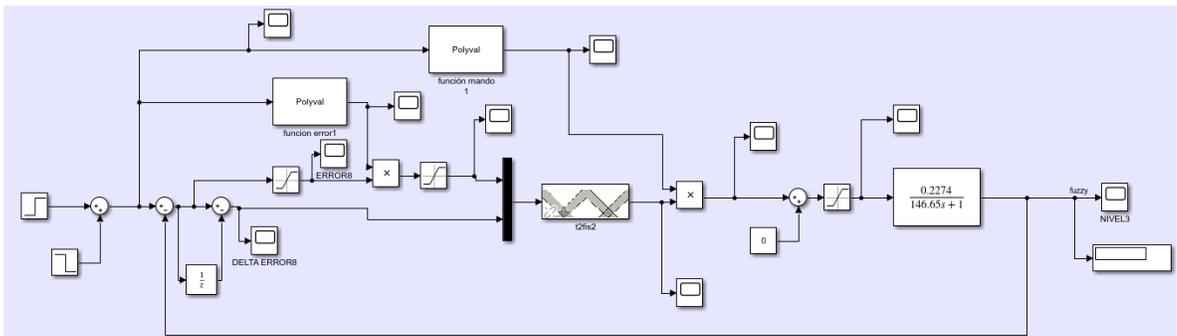


Figura 93 Diagrama de bloques del sistema con control difuso tipo 2 de intervalo de amplio rango

Donde su acción de control con un amplio rango se valida enviando dos puntos de establecimiento en diferentes valores distintos a los 15 cm para el cual fue diseñado, los resultados se observan en la figura 94.

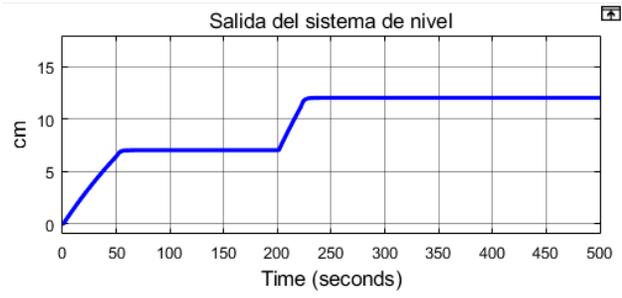


Figura 94 Respuesta del sistema ante dos S_p , un primer de 7 cm y un segundo de 12 cm

ANEXO G: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO TIPO 1

La arquitectura seleccionada fue un PD fuzzy, las entradas que se tendrán en cuenta son solo dos, 1. El error y 2. El delta del error y una salida de mando que actúa sobre el elemento final de control. Para implementar la estrategia de control PD fuzzy se hizo uso de la interpretabilidad forzando el comportamiento del controlador haciéndolo más rígido analizando ciertos puntos estratégicos de la respuesta del sistema como se muestra a continuación.

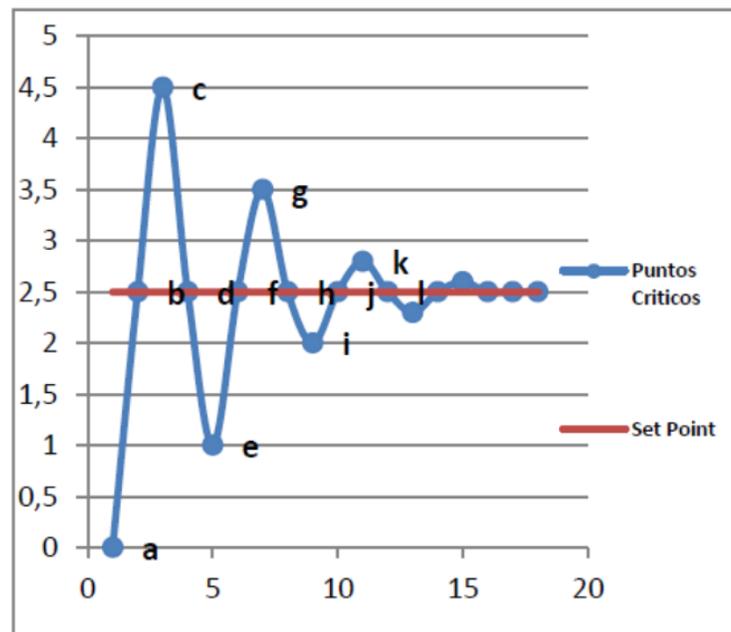


Figura 95 . Análisis de interpretabilidad del controlador

Donde para la distribución de los conjuntos de la variable lingüística error y la derivada del error se han subdividido en 7 para obtener buenos resultados en cuanto a decisiones en la salida del controlador, obteniendo que la tabla de combinación de los conjuntos es:

Tabla 13. Controlador fuzzy ideal entradas

ERROR→							
DERIVADA	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
DEL ERROR							

NG	MMB	MMB	MMB	MMB	MMA	MMA	MMA
NM	MMB	MB	MB	MB	MA	MA	MMA
NP	MMB	MB	B	B	A	MA	MMA
Z	MMB	MB	B	M	A	MA	MMA
PP	MMB	MB	B	A	A	MA	MMA
PM	MMB	MB	MB	MA	MA	MA	MMA
PG	MMB	MMB	MMB	MMA	MMA	MMA	MMA

Donde las etiquetas lingüísticas significan,

NG: Negativo Grande
Z: Cero

NM: Negativo Mediano

NP: Negativo Pequeño

PP: Positivo Pequeño

PM: Positivo Mediano

PG: Positivo Grande

De igual forma los conjuntos de la variable de salida son 7, presentados a continuación.

Tabla 14. Conjuntos de la variable de salida (MANDO)

ACCIÓN DE CONTROL	Z	MMB	MB	B	A	MA	MMA
--------------------------	---	-----	----	---	---	----	-----

Donde las etiquetas lingüísticas significan,

MMA: Muy Muy Alto

MA: Muy Alto

A: Alto

Z: Cero

B: Bajo

MB: Muy Bajo

MMB: Muy Muy Bajo

Al hacer el estudio de los puntos críticos se descubrió que las combinaciones que influían en dichos puntos son los siguientes.

Tabla 15. Descripción de los puntos críticos más importantes

ERROR	DERIVADA DEL ERROR	ACCIÓN DE CONTROL	PUNTO CRITICO
--------------	---------------------------	--------------------------	----------------------

1	PG	Z	MMA	a
2	PM	Z	MA	e
3	PP	Z	A	i
4	Z	NG	MMB	b
5	Z	NM	MB	f
6	Z	NP	B	j
7	NG	Z	MMB	c
8	NM	Z	MB	g
9	NP	Z	B	k
10	Z	PG	MMA	d
11	Z	PM	MA	h
12	Z	PP	A	l
13	Z	Z	Z	Estable

De esta manera si se analizan dichos puntos podría lograrse obtener la activación correcta de las reglas para obtener el resultado deseado de control.

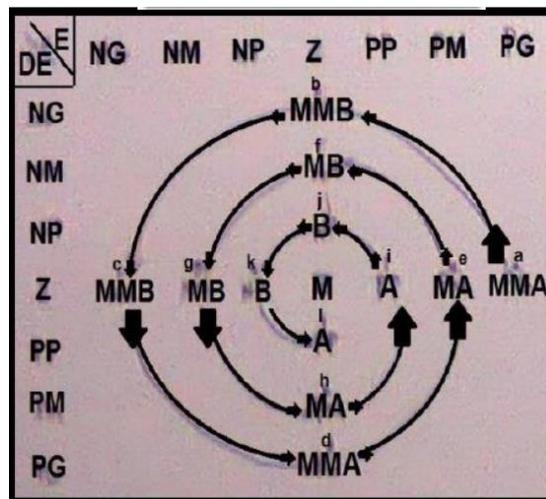


Figura 96. Orden de disparo de las reglas

Por lo anteriormente dicho se establece entonces que a partir de dicho modelo se hará la implementación no de las 49 reglas posibles sino simplemente teniendo en cuenta los puntos críticos, por lo cual existirán 13 reglas de estudio para el desarrollo del controlador.

UNIVERSOS DE DISCURSO DE CADA VARIABLE LINGÜÍSTICA

1. **Error:** Para definir el universo de discurso (valores que puede tomar) de esta variable se hace el estudio mediante análisis de las magnitudes asociadas a los universos de discurso en un controlador clásico.

Dado que para el caso de estudio el máximo setpoint es 15 cm se establece un universo de discurso para el error de ± 17 cm, asignando una tolerancia de ± 2 cm.

Current Variable	
Name	ERROR
Type	input
Range	<input type="text" value="[-17 17]"/>
Display Range	<input type="text" value="[-17 17]"/>

Figura 97. Asignación del universo de discurso del error

El siguiente paso es definir los rangos de cada etiqueta lingüística establecida (7), por lo que para cada una de ellas hay una función de pertenencia, para ello se ha usado el sentido común y la heurística que se tiene del proceso para establecer dichos rangos de operación de cada etiqueta lingüística.

1. Etiqueta lingüística Negativo Grande (NG): [-27.5 -16.7 -4.086 -1.93]
2. Etiqueta lingüística Negativo Mediano (NM): [-3.185 -2.185 -0.4855]

3. Etiqueta lingüística Negativo Pequeño (NP): [-1.5 -1.13 -0.05]
4. Etiqueta lingüística Cero (Z): [-0.05 0 0.05]
5. Etiqueta lingüística Positivo Pequeño (PP): [0.05 1.13 1.5]
6. Etiqueta lingüística Positivo Mediano (PM): [0.4329 2.133 3.133]
7. Etiqueta lingüística Positivo Grande (PG): [1.96 3.56 17.2 30.8]

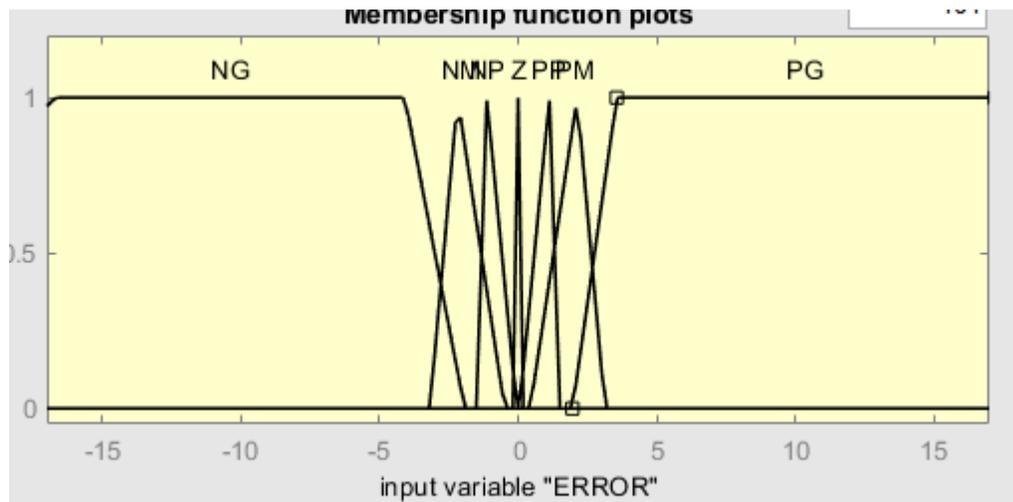


Figura 98 Funciones de membresía del error

2. **Derivada del error:** Se declara el siguiente rango del universo de discurso de la variable D_error

Current Variable	
Name	D_ERROR
Type	input
Range	<input type="text" value="[-0.8 0.8]"/>
Display Range	<input type="text" value="[-0.8 0.8]"/>

Figura 99 Rango del universo de discurso de la variación del error

1. Etiqueta lingüística Negativo Grande (DNG): [-2.24 -0.96 -0.3579 - 0.3125]

2. Etiqueta lingüística Negativo Mediano (DNM): [-0.3884 -0.2037 - 0.03735]
3. Etiqueta lingüística Negativo Pequeño (DNP): [-0.07255 -0.03573 - 0.002667]
4. Etiqueta lingüística Cero (DZ): [-0.01691 0 0.0203]
5. Etiqueta lingüística Positivo Pequeño (DPP): [-0.000716 0.0323 0.0505]
6. Etiqueta lingüística Positivo Mediano (DPM): [0.0144 0.2176 0.388]
7. Etiqueta lingüística Positivo Grande (DPG): [0.3226 0.4058 1 2.28]

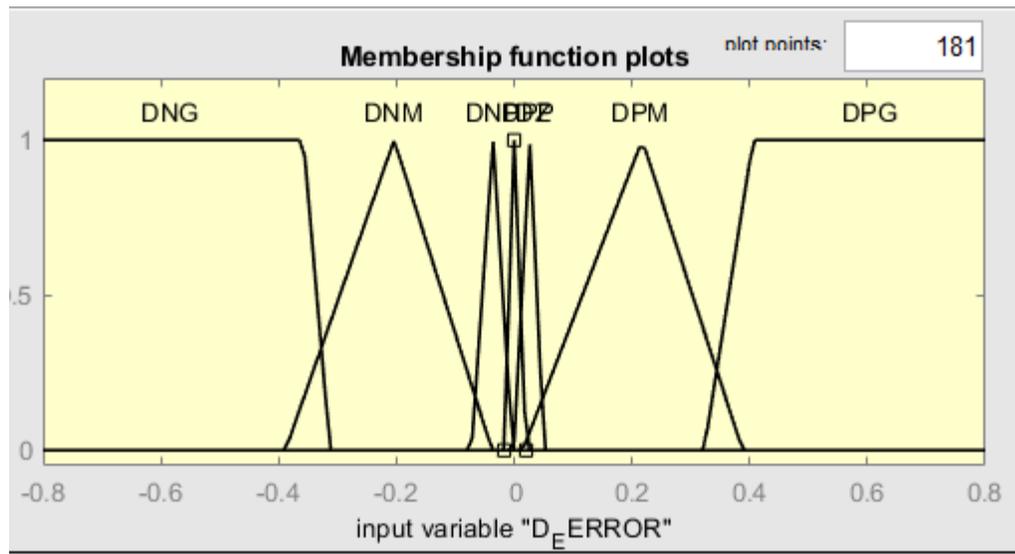


Figura 100 Funciones de membresía de la variación del error

3. **Acción de control (MANDO):** La acción mínima de control en cantidad de PWM es 70, como un bias del controlador, para mejorar la respuesta en descenso se establece que el universo de discurso de mando va de desde [-70 255].

Current Variable	
Name	MANDO
Type	output
Range	<input type="text" value="[-70 255]"/>
Display Range	<input type="text" value="[-70 255]"/>

Figura 101. Asignación del universo de discurso de salida

El siguiente paso es definir los rangos de cada etiqueta lingüística establecida (7), por lo que para cada una de ellas hay una función de pertenencia, para ello se ha usado el sentido común y la heurística que se tiene del proceso para establecer dichos rangos de operación de cada etiqueta lingüística.

1. Etiqueta lingüística Muy Muy Alto (MMA): [109.7 157.8 286.9 549.9]
2. Etiqueta lingüística Muy Alto (MA): [82.24 112.9 147.9]
3. Etiqueta lingüística Alto (A): [70.09 85.62 97.99]
4. Etiqueta lingüística Cero (Z): [66.49 67.09 71.49]
5. Etiqueta lingüística Muy Muy Bajo (MMB): [46.11 57.58 65.09]
6. Etiqueta lingüística Muy Bajo (MB): [19.57 39.27 55.06]
7. Etiqueta lingüística Bajo (B): [-330 -114 20.35 34.8]

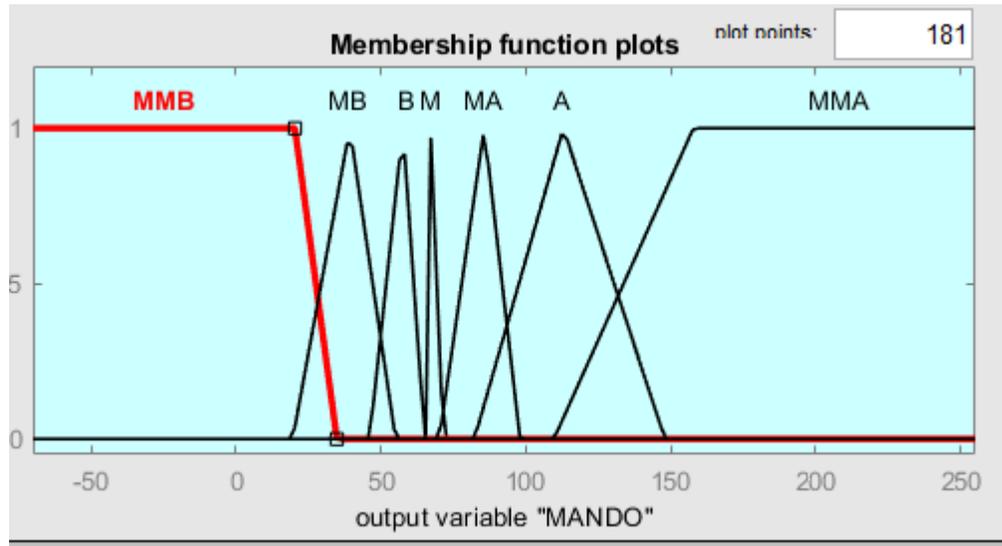


Figura 102 Funciones de membresía del mando

IMPLEMENTACION DE LAS REGLAS

Como se mencionó anteriormente con la estructura y la técnica a implementar, haciendo uso de la interpretabilidad se hace la implementación de 13 reglas, asegurando que de dicha forma las reglas se disparen en el orden y sentido correcto y hagan converger el sistema. Dichas reglas están basadas en la tabla 16 con su respectivo resultado de salida.

Tabla 16 reglas del FIS

N°	REGLA	SALIDA
1	Si $e \rightarrow NG$ y $\Delta e \rightarrow Z$	MMG
2	Si $e \rightarrow NM$ y $\Delta e \rightarrow Z$	MB
3	Si $e \rightarrow NP$ y $\Delta e \rightarrow Z$	B
4	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow Z$	M
5	Si $e \rightarrow PP$ y $\Delta e \rightarrow Z$	A
6	Si $e \rightarrow PM$ y $\Delta e \rightarrow Z$	MA
7	Si $e \rightarrow PG$ y $\Delta e \rightarrow Z$	MMA
8	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow NG$	MMB
9	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow NM$	MB

10	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow NP$	B
11	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow PP$	A
12	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow PM$	MA
13	Si $e \rightarrow Z$ y $\Delta e \rightarrow PG$	MMA

Implementación de dichas en Matlab

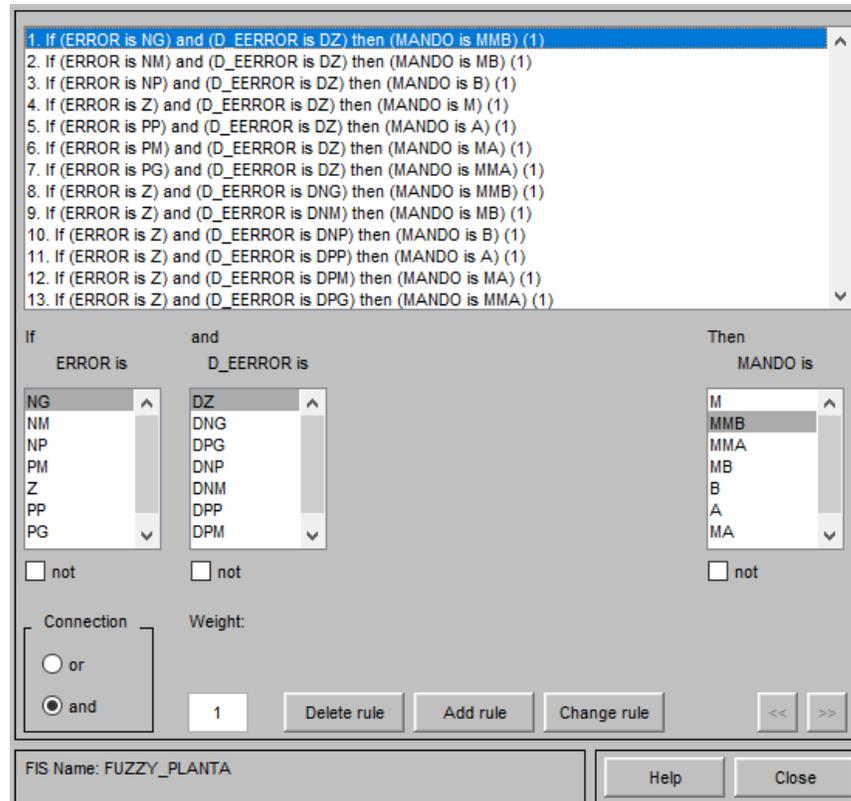


Figura 103. Implementación de las reglas en el software de simulación

Hasta este punto del documento se han definido todos los parámetros en cuento a conjuntos, rangos, reglas y demás para la implementación del controlador en el lazo.

SIMULACION DEL CONTROLADOR

En el siguiente diagrama en bloques se puede apreciar la implementación del bloque fuzzy en el cual se encuentran los conjuntos y las reglas, además puede observarse que el diseño quedó con dos entradas (Error y delta de error) y una salida (MANDO).

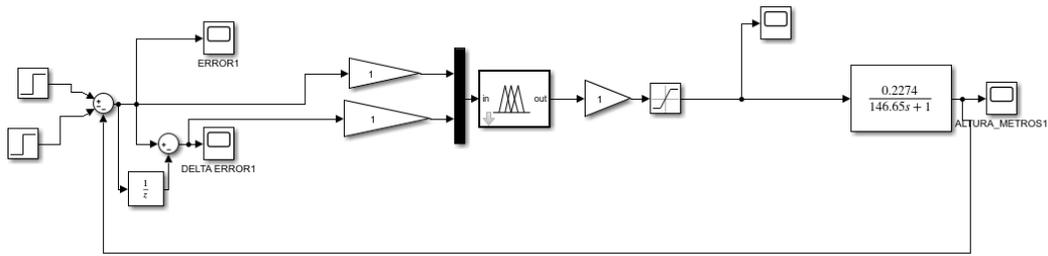


Figura 104. Diagrama en bloques lazo cerrado controlador fuzzy

Luego de llevar a cabo la simulación y al asignar un valor de referencia de la respuesta del sistema y la salida del controlador fueron los siguientes:

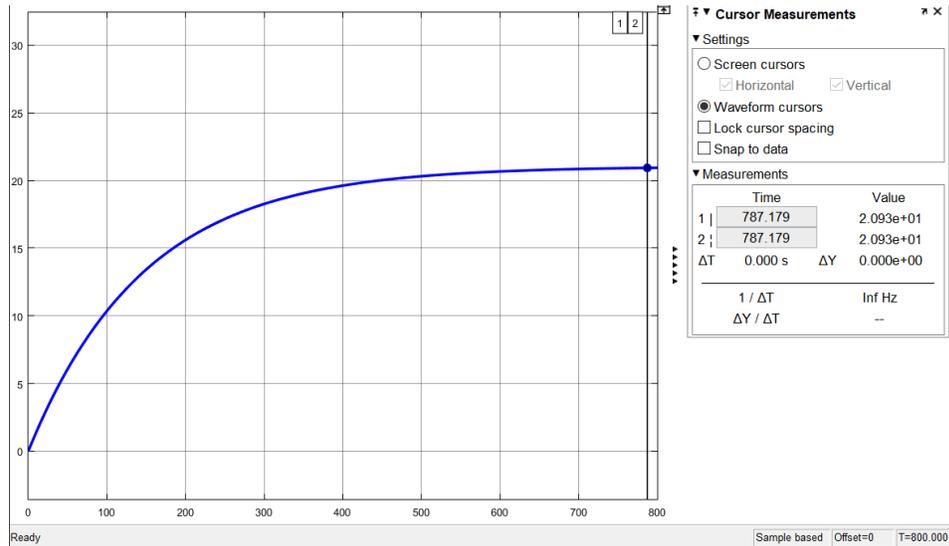


Figura 105 Respuesta del sistema en lazo cerrado

Como se puede observar las reglas se disparan en el sentido correcto, pero no se estabiliza en el valor esperado y con un tiempo de crecimiento y tiempo de establecimiento muy elevado, lo cual puede ser justificado al analizar la salida del controlador, donde el mando máximo es un valor muy bajo de excitación para la bomba, lo que explica el lento comportamiento de la estabilización del sistema, por lo cual se debe a realizar un ajuste por medio del método de las ganancias.

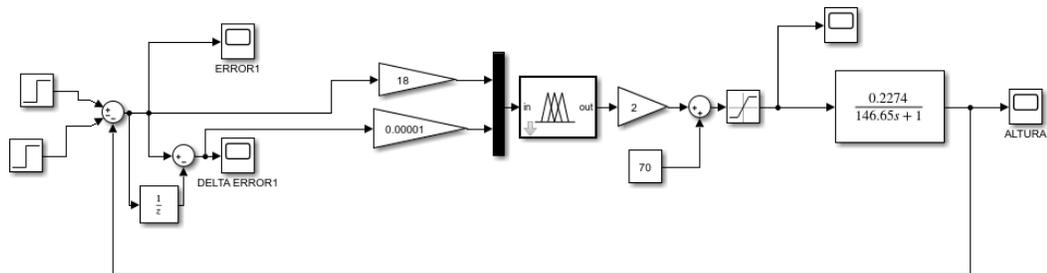


Figura 106. Diagrama en bloques del lazo de control con ajuste de las ganancias

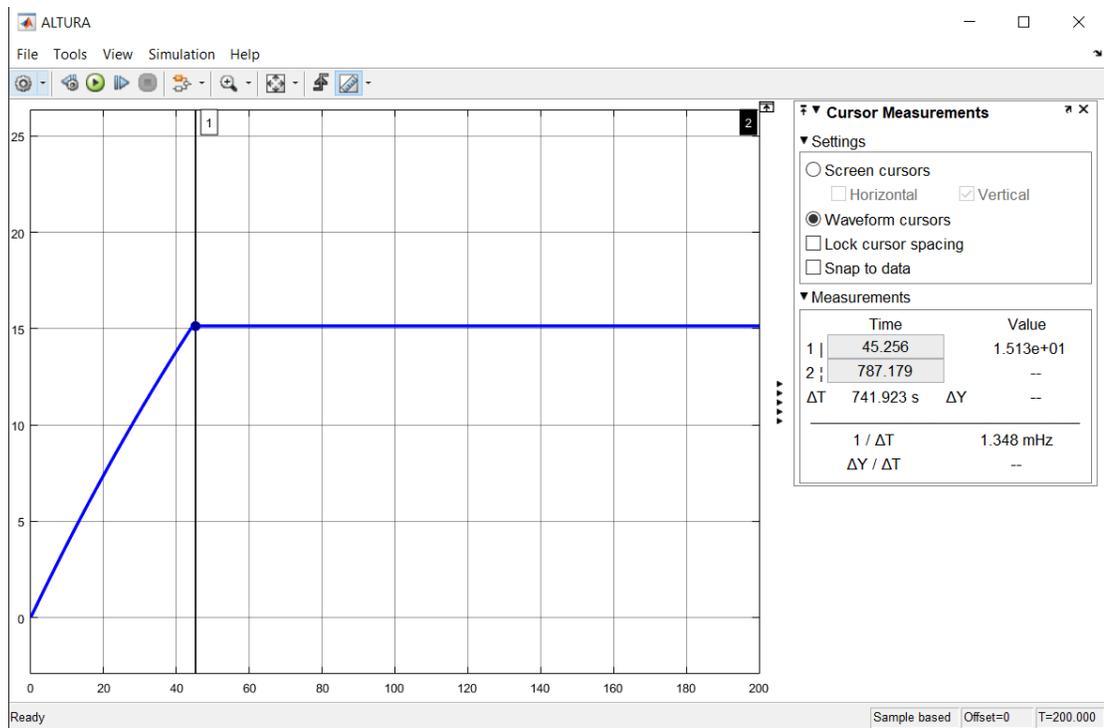


Figura 107 Respuesta en lazo cerrado con los ajustes de las ganancias.

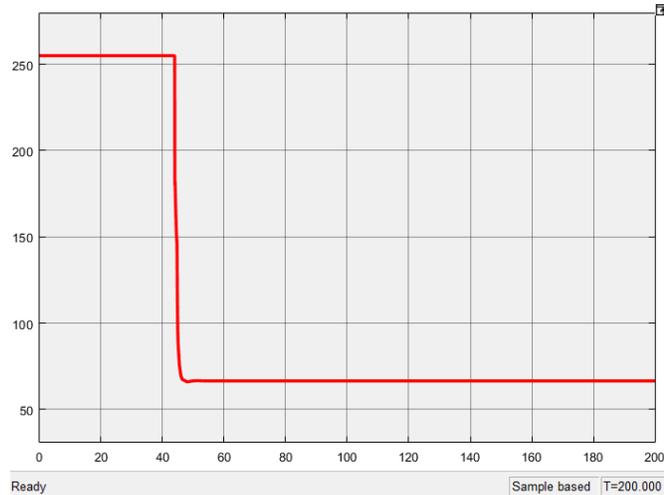


Figura 108 Salida del controlador con el ajuste de las ganancias y adición de la constante

DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA AMPLIO RANGO

Para hacer que el controlador cubra la mayor parte del rango de trabajo se hará la parametrización de la salida para obtener una función, con toma de datos para cada setpoint de 0.5 cm en 0.5 cm. Tal cual como se muestra a continuación para un Sp de 15cm.

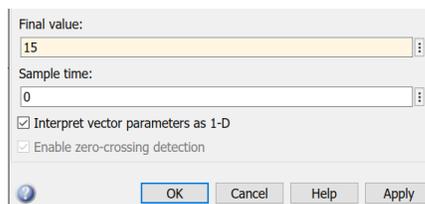


Figura 109. Setpoint 15 cm para hallar la ganancia necesaria

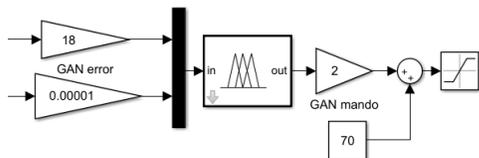


Figura 110. Ganancia encontrada para dicho setpoint de 15 cm

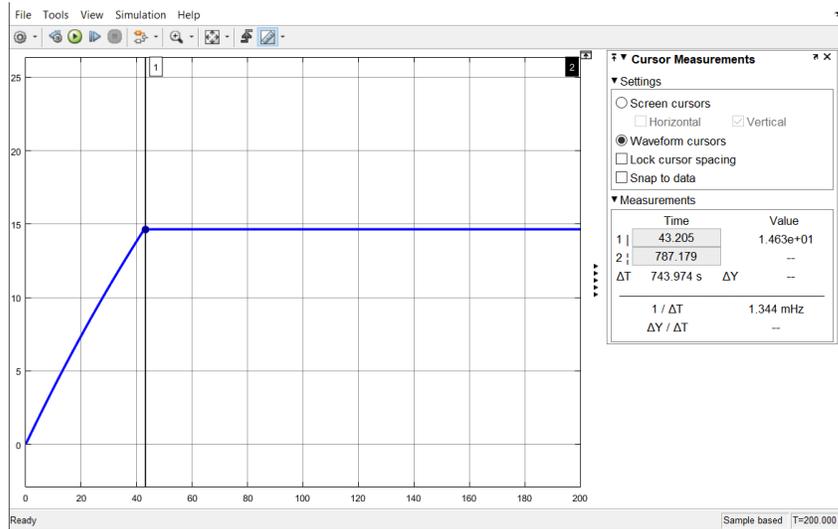


Figura 111 Respuesta en lazo cerrado para 15cm

Una vez obtenidos todos los valores de ganancia para los diversos puntos de setpoint se procede a llevar cabo la caracterización de dichas ecuaciones, mediante una herramienta de regresión.

1. Curva de la ganancia del mando

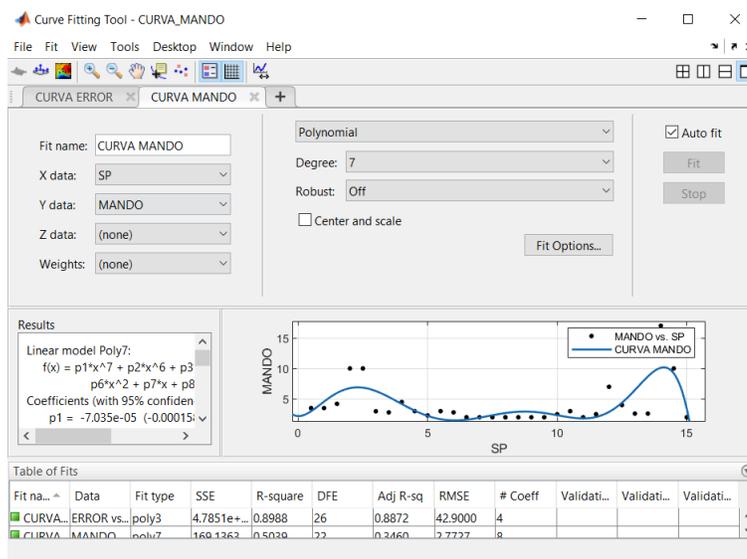


Figura 112. Caracterización para la curva de ganancia de mando.

Linear model Poly7:

$$f(x) = P_1x^7 + P_2x^6 + P_3x^5 + P_4x^4 + P_5x^3 + P_6x^2 + P_7x^1 + P_8$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -7.035e-05 \quad (-0.0001588, 1.806e-05)$$

$$p2 = 0.003466 \quad (-0.001341, 0.008273)$$

$$p3 = -0.06622 \quad (-0.1709, 0.03848)$$

$$p4 = 0.612 \quad (-0.5539, 1.778)$$

$$p5 = -2.731 \quad (-9.747, 4.285)$$

$$p6 = 4.721 \quad (-17.39, 26.83)$$

$$p7 = -0.1672 \quad (-32.37, 32.03)$$

$$p8 = 2.191 \quad (-13.4, 17.79)$$

2. Curva de la ganancia del error

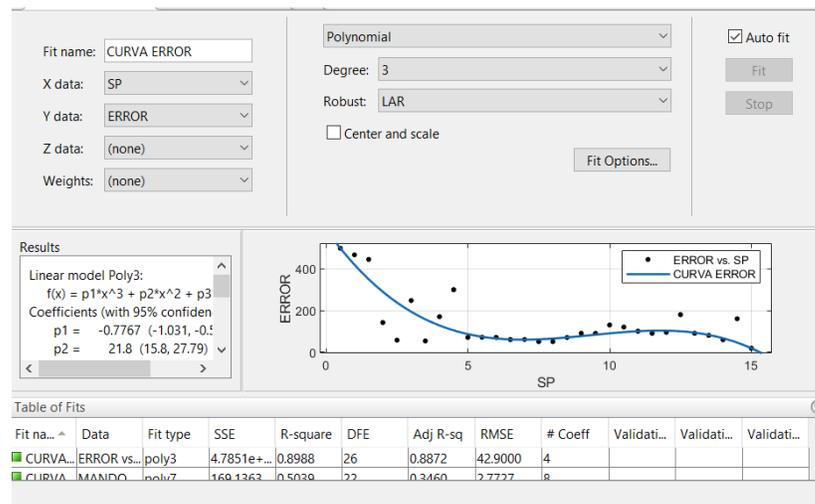


Figura 113. Caracterización para la curva de ganancia del error.

Linear model Poly3:

$$f(x) = P_1x^3 + P_2x^2 + P_3x + P_4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -0.7767 \quad (-1.031, -0.5223)$$

$$p2 = 21.8 \quad (15.8, 27.79)$$

$$p3 = -190.3 \quad (-230.6, -150)$$

$$p4 = 589.8 \quad (516.4, 663.2)$$

Validación del amplio rango en una misma simulación

Se llevó a cabo con un setpoint de 5cm y a los 100 segundos posteriores se aplicó otro de 10 cm.

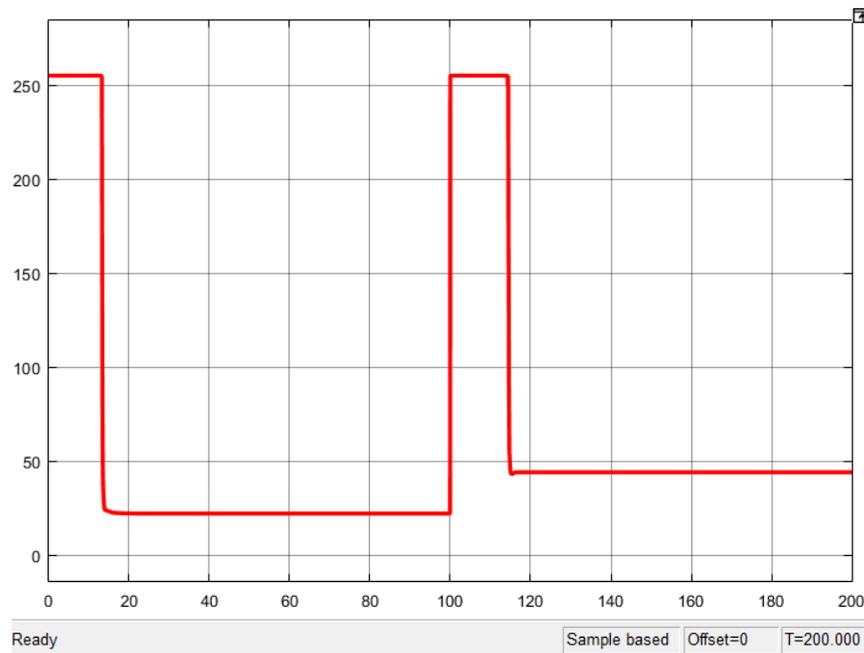


Figura 114 Salida del controlador para los setpoints establecidos

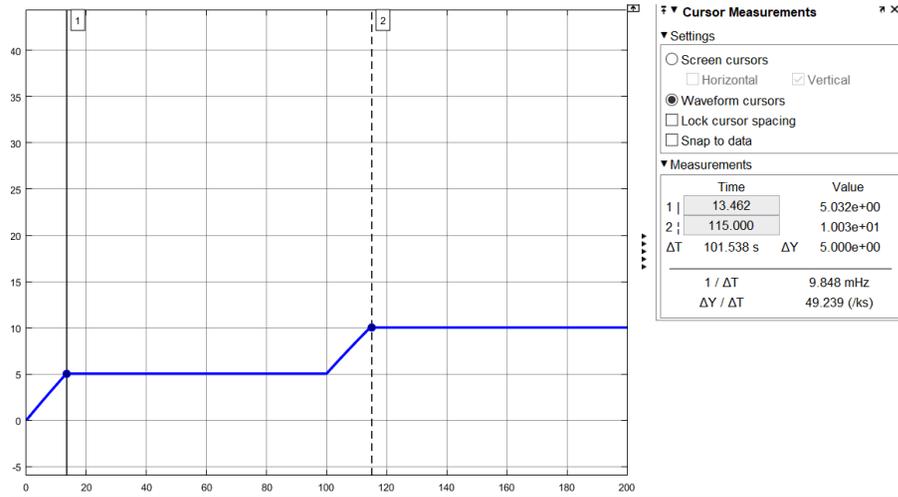


Figura 115 Respuesta en lazo cerrado del sistema ante la entrada de dos setpoints

ANEXO H: CÓDIGO ARDUINO PARA EL FUNCIONAMIENTO REAL DEL CONTROLADOR DIFUSO TIPO 2

```
int IN3 = 8; //PIN 1 PARA EL PUENTE H
int IN4 = 9; //PIN 2 PARA EL PUENTE H
int IN5 = 11; //PIN 3 PARA EL PUENTE H
int ENB = 10; //PIN DE CONTROL PARA EL PUENTE H

double LECTURA=0; //CAPTURA EL VALOR DEL PUERTO SERIAL
int TARA=0;
int DATO=0;

void setup () {
  pinMode (ENB, OUTPUT);
  pinMode (IN3, OUTPUT);
  pinMode (IN4, OUTPUT);
  pinMode (IN5, OUTPUT);

  //BOMBA
  digitalWrite (IN3, HIGH);
  digitalWrite (IN4, HIGH);
  digitalWrite (IN5,LOW);
  //***

  Serial.begin(9600);
  for (int i=0; i<10; i++) {
    TARA=TARA + analogRead (1);
  }

  TARA=TARA/10;

  Serial.println(0); // VALOR DE INICIACION DE COMUNICACION
}

void loop(){
  if(Serial.available() >0) { //LECTURA DEL PUERTO SERIAL
    LECTURA=Serial.parseFloat(); // LEER UN FLOTANTE POR SERIAL
  }
  DATO=analogRead (1)-TARA;
  Serial.println(DATO); //ENVIAR ALTURA MEDIDA
  analogWrite(ENB, LECTURA); //CARGAR A LA BOMBA LA ORDEN
  delay(100);
}
```