

Facultad de
Ingenierías
Físico
Mecánicas



Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones



Trabajo de Grado

**DISEÑO Y VALIDACIÓN NUMÉRICA DE UN MECANISMO DE ADPTACIÓN
DIFUSO PARA UN CONTROL ADAPTATIVO BASADO EN MODELO DE
REFERENCIA, PARA SINTONIZAR EL CONTROLADOR DE UN PROCESO
REMOTO.**

Autor:

JUAN GABRIEL ARAQUE MORA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009**

Facultad de
Ingenierías
Físico
Mecánicas



Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones



Trabajo de Grado

**DISEÑO Y VALIDACIÓN NUMÉRICA DE UN MECANISMO DE ADPTACIÓN
DIFUSO PARA UN CONTROL ADAPTATIVO BASADO EN MODELO DE
REFERENCIA, PARA SINTONIZAR EL CONTROLADOR DE UN PROCESO
REMOTO.**

**Autor:
JUAN GABRIEL ARAQUE MORA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

**Director:
RODOLFO VILLAMIZAR, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENÍERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009**

DEDICATORIA

Este título se lo dedico a mis padres, Misael Araque Solano y Matilde Mora Gómez, por ser esa fuente inagotable de amor comprensión y fortaleza, vital durante todos estos años, para enfrentar los diferentes retos de mi vida.

A mis hermanos Julian Enrique y Cristian Leonel Araque Mora, por su confianza, su amor y por ser en esencia incondicionales y leales.

A todas la personas allegadas que de incontables formas contribuyeron con sus aportes a forjar esta nueva etapa de mi vida; gracias por sus enseñanzas y espero algún día retribuir todo este legado.

JUAN GABRIEL

AGRADECIMIENTOS

A **Rodolfo Villamizar Mejía**, Doctor en Tecnologías de la Información, director de este proyecto de grado, gracias a su orientación, sus conocimientos, su calidez humana e interés en el trabajo, fue posible culminar de forma satisfactoria esta etapa de mi educación.

A todos los **profesores** de la escuela y de la Universidad que contribuyeron durante todos estos años con mi formación profesional.

A todos mis amigos de la escuela, con los que durante la carrera compartí tristezas y alegrías; a Milena Suárez, Esther García, Yolandita Garcés, Laidy Galvis, Carlos Nieto, Josué Rincón, Oscar Jaimes, Edgar Corzo, Juan Carlos Niño, Yesid Suárez, Juan Manuel Franco, Sergio Merchán, Arbey Páez, Cesar Bravo, Andrés Quiroga, José Cardoso, David Torres, Marcelo Rueda, Elkin Peña, Jorge Bautista, Carlos Jerez, Eusebio Delgado, Álvaro Reslen, Juan Manuel Becaria, Juan pablo Valencia, Fredy Esteves, Jhon Blanco, Germán Güisa, Oswaldo Mancilla, Edwin Lamus, Gerson Ramírez, Alonso castellanos, Sergio Chaparro, Oscar Gómez, Carlos Sierra, Felipe Hoyos, Oscar Rangel, a la selección de fútbol de la escuela 2008-2009 y a muchos más que en este momento “se me pasan”, gracias por su sinceridad, su respeto y apoyo incondicional durante este proceso de formación.

A la **Universidad Industrial de Santander** por brindarme el privilegio de ser parte Suya e enriquecer mi desarrollo personal.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. DESCRIPCIÓN GENERAL	3
3. MARCO TEÓRICO.....	5
3.1. Control PID.....	5
3.2. Control adaptativo	5
3.2.1. Control adaptativo basado en modelo de referencia con mecanismo de adaptación difuso.	6
3.3. Lógica difusa	7
3.3.1. Sistemas difusos.	8
3.3.2. Clasificación difusa (fuzzifier)	8
3.3.3. Bloque de inferencia (inference engine)	9
3.3.4. Procesamiento de salida (defuzzifier)	10
4. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA.....	12
5. PROPUESTA DE DISEÑO.....	13
5.1. Definición del modelo de referencia.	13
5.2. Caracterización de un proceso en lazo cerrado con un controlador de la familia PID.	14
5.3. Diseño del adaptador difuso	16
5.3.1. Construcción de los conjuntos difusos de entrada.	17
5.3.2. Diseño de los conjuntos difusos de salida	20
5.2.3. Diseño de la base de reglas	21
6. VALIDACIÓN NUMÉRICA DEL ESQUEMA DE CONTROL FMRAC.....	23
6.1. Definición del modelo de referencia para el sistema de nivel	25
6.2. Caracterización del sistema de control de nivel.....	28
6.2.1. Variación de las condiciones de operación del sistema de nivel.	28

6.2.2.	Variación de los parámetros del PID alrededor de sus valores nominales en el sistema de nivel.....	29
6.3.	Diseño el adaptador Difuso para el sistema FMRAC.....	31
6.3.1	Construcción de las entradas difusas del adaptador.....	31
6.3.2.	Construcción de las salidas difusas del adaptador.	36
6.3.3.	Diseño de las proposiciones de la base de reglas.	38
6.4.	Análisis del desempeño del sistema de adaptación FMRAC.....	40
6.4.1.	caso 1.....	41
6.4.2.	caso 2.....	42
6.4.3.	caso 3.....	43
6.5.	Análisis de estabilidad	45
7.	CONCLUSIONES.....	49
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	52
9.	ANEXOS	55
Anexo A: Ejemplo de aplicación de la metodología de diseño de un esquema FMRAC.		55
A.1.	Modelo de referencia para el sistema LTI SISO	55
A.2.	Caracterización del sistema de lazo cerrado	56
A.3.	Diseño del adaptador difuso	58
A.3.1.	Diseño de los conjunto de entrada y salida	66
A.4.	Validación numérica del esquema FMRAC	64
A.4.1.	caso 1.....	65
A.4.2.	caso 2.....	66
Anexo B: Modelo lineal de la planta del sistema de nivel.		67
Anexo C: Resultados adicionales de validación		70
C.1.	Caso 1.....	71
C.2.	Caso 2.....	73

Anexo D: Simulación en tiempo real del esquema de control FMRAC	76
D.1. Caso 1.....	79
D.2. Caso 2.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1. Diagrama de bloques desarrollo del proyecto	4
Figura 3.1. Esquema representativo del MRAC y FMRAC.....	7
Figura 3.2. Sistema lógica difusa.....	8
Figura 3.3. Conjuntos difusos entrada.....	9
Figura 5.1. Respuesta al escalón de segundo orden sub-amortiguada.....	13
Figura 5.2. Sistemas deseado y real sometido a variaciones en el punto de operación	15
Figura 5.3. Características de la Respuesta al escalón y su derivada en un sistema de segundo orden sub-amortiguada	18
Figura 5.4. Clasificación difusa de la derivada de la respuesta al escalón	18
Figura 5.5. Conjunto difuso de entrada $ \Delta y_d/\Delta t $	19
Figura 6.1. Control difuso o PID en un sistema de nivel	23
Figura 6.2. Esquema del sistema de nivel	24
Figura 6.3. Esquema representativo del flujo del tanque	25
Figura 6.4. Respuesta al escalón del sistema de lazo cerrado	26
Figura 6.5. Respuesta al escalón para el modelo de referencia	26
Figura 6.6. Respuesta al escalón deseada y real en el punto de operación nominal	27
Figura 6.7. Respuesta al escalón deseada y real variando el punto de operación	28
Figura 6.8. Respuesta al escalón deseada y real con una perturbación entre el controlador y la planta	29
Figura 6.9. Respuesta al escalón con K_d variando y K_p constante	30
Figura 6.10. Respuesta al escalón con K_p variando y K_d constante	31

Figura 6.11. Clasificación difusa de la derivada de la respuesta deseada $\Delta y_d/\Delta t$ 	32
Figura 6.12. Conjunto difuso de entrada $\Delta y_d/\Delta t$ 	32
Figura 6.13. Clasificación difusa de la derivada de la respuesta real $\Delta y_r/\Delta t$ 	33
Figura 6.14. Conjunto difuso de entrada $\Delta y_r/\Delta t$ 	34
Figura 6.15. Clasificación difusa del error de adaptación e_a	35
Figura 6.16. Conjunto difuso de entrada e_a	35
Figura 6.17. Conjunto difuso de salida ΔK_D	36
Figura 6.18. Conjunto difuso de salida ΔK_P	37
Figura 6.19. Conjunto difuso de salida ΔG	38
Figura 6.20. Esquema representativo del adaptador difuso	39
Figura 6.21. Esquema de pruebas para validar el adaptador difuso	40
Figura 6.22. Respuesta de los sistemas variando el punto de operación.....	41
Figura 6.23. Respuestas de los sistemas adaptado y sin adaptar ante una perturbación	42
Figura 6.24. Respuesta de los sistemas adaptado y sin adaptar en las condiciones de operación más críticas	44
Figura 6.25. Combinación 1, para delimitar la región de operación FMRAC	47
Figura 6.26. Combinación 2, para delimitar la región de operación FMRAC	48
Figura 6.27. Región de operación del FMRAC en el lugar de las raíces	48
Figura A.1. Respuestas al escalón deseado	56
Figura A.2. Respuestas al escalón y su derivada ante la variación de K	57
Figura A.3. Respuestas al escalón y su derivada variando Z_{g1}	57
Figura A.4. Respuesta al escalón y su derivada variando P_{g1}	58
Figura A.5. Clasificación difusa de la derivada de la respuesta deseada	59
Figura A.6. Conjunto difuso de entrada $\Delta y_d/\Delta t$ 	59
Figura A.7. Clasificación difusa de la derivada de la salida real	60

Figura A.8. Conjunto difuso de entrada $\Delta y_r/\Delta t$	60
Figura A.9. Clasificación difusa del error de adaptación	61
Figura A.10. Conjunto difuso de entrada e_a	61
Figura A.11. Conjunto difuso de salida ΔK_c	62
Figura A.12. Conjunto difuso de salida ΔZ_1	63
Figura A.13. Conjunto difuso de salida ΔZ_2	63
Figura A.14. Implementación en Simulink de FMRAC	65
Figura A.15. Respuesta al adaptador	65
Figura A.16. Respuesta sin adaptar y adaptada ante variación del punto de operación	66
Figura B.1. Representación del punto de operación nominal	68
Figura C.1. Respuesta al escalón variando parámetros de la planta	70
Figura C.2. Respuesta al escalón con sistemas sometidos a perturbaciones	71
Figura C.3. Sistemas sometidos a variaciones en el punto de operación y los parámetros de la planta	72
Figura C.4. Salidas del sistema difuso de adaptación	72
Figura C.5. Variación de los parámetros del PID	73
Figura C.6. Variación del punto de operación	73
Figura C.7. Salidas del sistema difuso de adaptación	74
Figura C.8. Variación de los parámetros del PID	74
Figura D.1. Diagrama representativo del proceso de comunicación	76
Figura D.2. Diagrama de bloques del sistema implementado en el PC1	77
Figura D.3. Diagrama de bloques del sistema implementado en el PC2	77
Figura D.4. Señales de perturbación para el PID nominal y FMRAC	78
Figura D.5. Emulación del sistema deseado adaptado y sin adaptar	79
Figura D.6. Respuesta en el tiempo de KD	80
Figura D.7. Respuesta en el tiempo de KP	80

Figura D.8. Emulación del sistema deseado adaptado y sin adaptar	81
Figura D.9. Respuesta en el tiempo de KD	82
Figura D.10. Respuesta en el tiempo de KP	82

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 6.1 Parámetros nominales de PID	27
Tabla 6.2 Índices de desempeño etapa de validación	45
Tabla A.1 Parámetros de la planta y el controlador	55
Tabla B.1 Parámetros del tanque	69
Tabla C.1 Índices de desempeño etapa de validación adicional	75
Tabla D.1 Índices de desempeño etapa de emulación	78

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y VALIDACIÓN NUMÉRICA DE UN MECANISMO DE ADPTACIÓN DIFUSO PARA UN CONTROL ADAPTATIVO BASADO EN MODELO DE REFERENCIA, PARA SINTONIZAR EL CONTROLADOR DE UN PROCESO REMOTO.

AUTOR:

JUAN GABRIEL ARAQUE MORA

PALABRAS CLAVES:

Control adaptativo basado en modelo de referencia con mecanismo de adaptación difuso FMRAC, Controladores de estructura fija, Lógica difusa FL, Sintonización automática de parámetros.

DESCRIPCIÓN:

Actualmente en la literatura existen un número importante de técnicas que permiten Sintonizar automáticamente los parámetros de controladores de estructura fija [4], [13], [14] y [23], permitiendo que sus parámetros se adapten y se ajusten para tolerar robustamente las incertidumbres, perturbaciones y variaciones en los parámetros del sistema.

Este trabajo de grado tiene como objetivo contribuir al desarrollo e investigación de la adaptación de parámetros en controladores de la familia PID, utilizando en este caso un algoritmo de adaptación difuso aplicado a un esquema de control adaptativo basado en modelo de referencia FMRAC. Dentro de los principales fundamentos para la aplicación de esta técnica, se encuentra la recolección de conocimiento experimental y heurístico sobre las características del proceso. El uso de la lógica difusa permite una reducción en el grado de complejidad de esquema de adaptación y demanda bajos requerimiento de cómputo para su implementación en comparación con otras técnicas de inteligencia artificial como las redes neuronales y los algoritmos genéticos.

Se plantea diseñar y validar numéricamente un control adaptativo basado en modelo de referencia con mecanismo de adaptación difusa (FMRAC), de manera que éste sintonice el controlador de un proceso clásico, ajustando sus parámetros en línea. El sistema se emula implementando el lazo interno del FMRAC en un PC mientras que el lazo externo o de adaptación se implementa en otro, la consigna, la señal de salida y los parámetros ajustados del controlador se comunican mediante el protocolo TCP/IP.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Director: Dr. Rodolfo Villamizar Mejía.

SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND NUMERIC VALIDATION OF A FUZZY MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL, FOR TUNING THE CONTROLLER OF A REMOTE PROCESS.

AUTHOR:

JUAN GABRIEL ARAQUE MORA

KEYWORDS:

Auto-tuning parameters, Fixed structure controller, Fuzzy logic, Fuzzy model reference adaptive control FMRAC.

ABSTRACT:

Currently in literature several adaptive control techniques are used to automatically tune the parameters in controllers with fixed structure are referenced [4], [13], [14] and [23]. Such techniques allow controllers to be adapted in order to robustly tolerate parametric uncertainties, noisy, disturbances and parameter variation of the system.

The aim of this work is to contribute in the development of techniques and methodologies to adjust parameters in classic controllers, using in this specific approach fuzzy adaptation algorithms applied on an adaptive control scheme based on reference model FMRAC. The main reason by using this technique is that experimental and heuristic knowledge over dynamic behaviour of the process can be collected. The fuzzy logic allows a reduction in the grade of complexity of FMRAC and demand low computation requirement for its implementation in comparison with other artificial intelligence techniques like the IA and the genetic algorithms.

The present approach consists into design fuzzy model reference adaptive controllers (FMRAC), such that, the classic controller can be tuned by adjusting its parameters on line. Numerical validation of the approach is obtained by simulating typical control processes on Simulink software, while experimental verification is obtained by implementing the FMRAC internal loop on a PC and the external loop or adaptation on the other one. Setpoint, output signals and adjusted controller parameters are communicated by using TCP / IP protocol.

* Final Graduation work.

** Physical Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School. Industrial University of Santander. Director: Dr. Rodolfo Villamizar Mejía.

1. INTRODUCCIÓN

El creciente interés de la industria local por aumentar el desempeño de sus procesos, sumado a la necesidad de ser más competitivos, ha permitido identificar una serie de falencias y necesidades en los sistemas de control actualmente implementados. Dentro de las restricciones más comunes se encuentran las limitaciones en los controladores de parámetros fijos, ocasionadas por la presencia de perturbaciones desconocidas, incertidumbre de los parámetros de la planta, ruido y variación del punto de trabajo u operación.

Actualmente, en la literatura existen un número importante de mecanismos de adaptación que permiten a los sistemas de estructura fija sintonizar los parámetros de sus controladores de manera que estos adquieran la capacidad de adaptarse para tolerar de forma robusta, perturbaciones, incertidumbres paramétricas y cambios del punto de operación [13], [16] y [18]. Dentro de los retos que se plantean actualmente para algunas de estas estrategias de adaptación, se encuentra la disminución de costo de implementación y una reducción en el grado de complejidad para su comprensión.

Los sistemas difusos presentan un buen desempeño en la adaptación de parámetros, gracias a la forma natural como éstos combinan la lógica (conocimiento objetivo) y la experiencia (conocimiento subjetivo), característica que permite una reducción en los requerimientos de cómputo y el grado de complejidad del sistema, en comparación con otras metodologías de adaptación y técnicas de inteligencia artificial [1] y [2].

En este trabajo se pretende contribuir con el desarrollo de un esquema de control FMRAC, que permita sintonizar automáticamente y en línea los parámetros de un controlador de la familia PID, de manera que el sistema adquiera la capacidad de adaptarse y seguir el desempeño de un modelo de referencia deseado.

En el contenido de este libro se presenta la información pertinente para que los lectores se familiaricen con el trabajo realizado y los resultados obtenidos. De esta

manera el texto cuenta con una breve descripción de los conceptos más importantes, una metodología de diseño para el mecanismo de adaptación de parámetros, un análisis numérico del FMRAC implementado en Simulink, una emulación en tiempo real del esquema control adaptativo y una presentación de resultados y conclusiones.

2. DESCRIPCION GENERAL

Para este trabajo se selecciona un proceso que haga uso de un regulador con estructura fija y presente problemas de desempeño y robustez. Adicionalmente se realiza una descripción heurística con información del comportamiento dinámico del sistema de lazo cerrado y las principales causas que hacen necesaria una adaptación de parámetros en el controlador, información que es fundamental para el análisis y selección de la base de reglas del mecanismo de adaptación difuso. El sistema se simula posteriormente mediante la herramienta Simulink – Matlab.

Se realiza un análisis y estudio del estado del arte de los sistemas difusos utilizados en la estimación y sintonización automática de parámetros. Posteriormente se plantea una metodología que permita definir los criterios de diseño y las primeras hipótesis de trabajo para la construcción del adaptador difuso del FMRAC. El adaptador difuso y los demás elementos del esquema de control adaptativo se implementan y se evalúan mediante la herramienta Simulink – Matlab (fuzzy logic toolbox).

Dado que en la actualidad las técnicas clásicas de control siguen siendo ampliamente utilizadas a nivel industrial, este trabajo pretende sumarse al interés de nuestra facultad y otras universidades para motivar e impulsar el estudio de técnicas de inteligencia artificial y de soft computing encaminadas a aumentar el desempeño de los sistemas de control clásico con estructura fija [7], [8], [9] y [10].

En la Figura 2.1, se muestra el diagrama de flujo del desarrollo del proyecto.

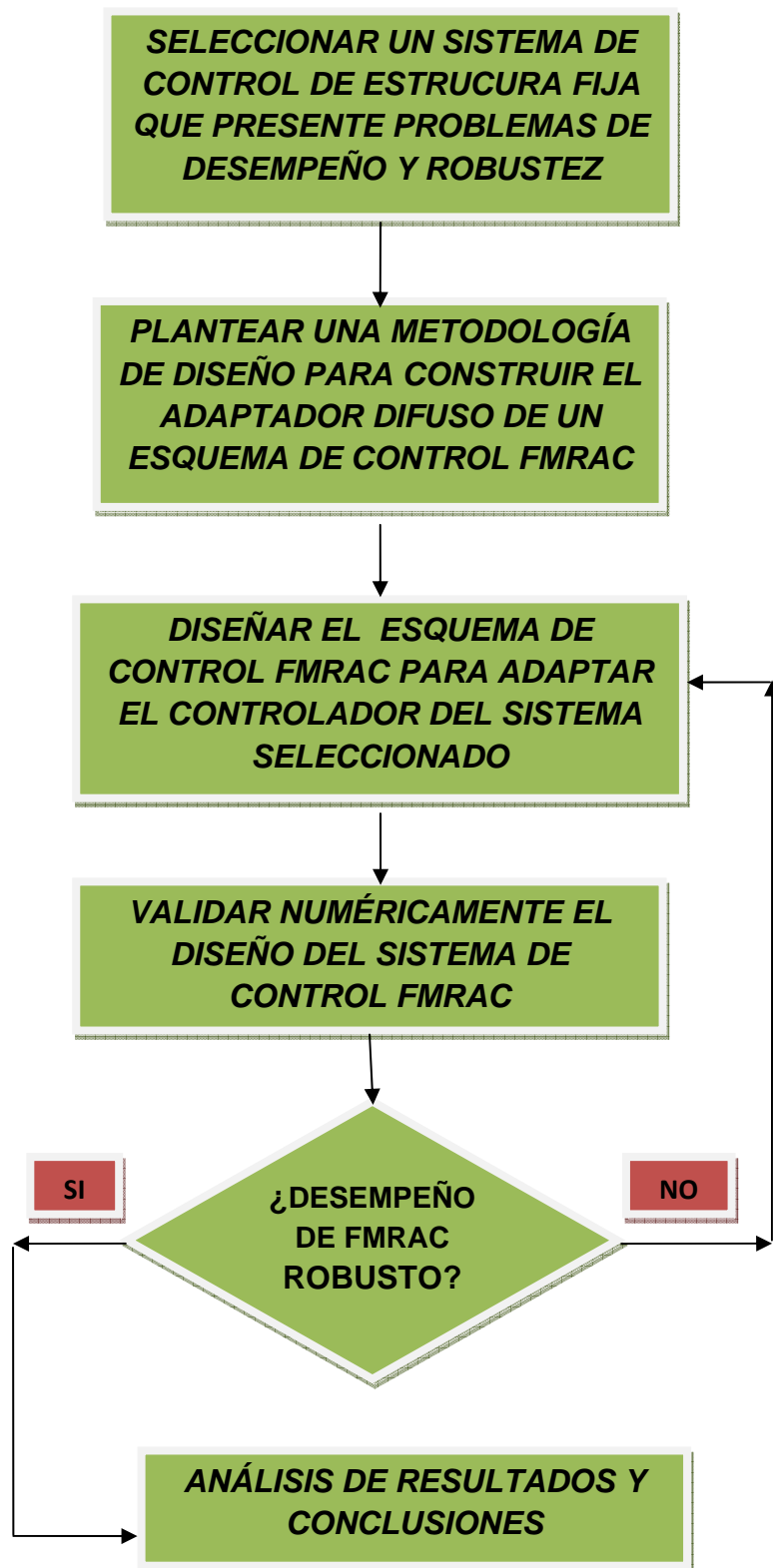


Figura 2.1 Diagrama de bloques desarrollo del proyecto

(Fuente: Autor)

3. MARCO TEORICO

3.1. Control PID

El controlador PID (proporcional-integral-derivativo) puede considerarse un caso particular del controlador adelanto-atraso con un polo en el origen y el otro en el infinito, de igual forma los reguladores PD y PI son casos particulares de un regulador en adelanto y en atraso respectivamente. Este controlador básicamente actúa sobre el proceso mediante una señal de control que se caracteriza por tener tres componentes. La primera es una acción proporcional al error en cada instante de tiempo, la segunda componente es proporcional a la derivada del error y busca anticipar su dinámica y la tercera componente es una acción proporcional a la integral del error que busca evitar la permanencia de este en estado estable.

Los controladores clásicos de parámetros fijos se caracterizan por ser ampliamente utilizados tanto a nivel académico e industrial por su simplicidad al momento de estudiarlos, comprenderlos, diseñarlos e implementarlos. De igual forma su efectividad y excelente desempeño en sistemas lineales o procesos de poca variación alrededor de un punto de operación, sumado a sus bajos costos de implementación, convierten al PID en una opción viable frente a otras técnicas de control [12] y [16].

La pérdida de desempeño y robustez de estos reguladores aumenta conforme se hacen significativas las incertidumbres paramétricas, las perturbaciones, el ruido y variación del punto de trabajo u operación. Éstas se presentan como sus principales desventajas debido a su nula capacidad de adaptación [13], [15], [16] y [17].

3.2. Control adaptativo

La técnica del Control Adaptativo surge a partir de 1950. Esta estrategia no lineal permite controlar los sistemas cuyos controladores tienen parámetros constantes o variables. La idea básica del control adaptativo es estimar en línea (on-line) las

variaciones de los parámetros de la planta, basándose en la medida de las señales de entrada – salida de la planta y en el uso de los parámetros estimados [4]. En la literatura los controladores adaptativos se clasifican en dos categorías: los controladores adaptativos directos e indirectos [1] y [4].

En el control adaptativo directo los parámetros del controlador están directamente ajustados para reducir el error entre la salida de la planta y el modelo de referencia (error de adaptación). En el control adaptativo indirecto, los parámetros de la planta son estimados y el controlador escoge la acción de control suponiendo que los valores estimados son los correctos según los parámetros de la planta, si el error persiste, el controlador modifica su estimación [4].

3.2.1. Control adaptativo basado en modelo de referencia con mecanismo de adaptación difuso (FMRAC).

El control adaptativo basado en modelo de referencia y representado en la figura 3.1 pertenece al control adaptativo directo y se caracteriza por implementar en su lazo externo o de adaptación un modelo de referencia y un mecanismo de ajuste de parámetros (mecanismo de adaptación) [2], [6] y [15]. En el modelo de referencia se encuentra la función de transferencia de lazo cerrado que describe el desempeño deseado del proceso; de esta manera el mecanismo de adaptación, mediante el ajuste de los parámetros del controlador, busca que el comportamiento del sistema de lazo cerrado del proceso real siga el comportamiento del bloque de referencia con el mínimo error de adaptación [4].

Como se puede observar en la Figura 3.1, se debe implementar un bloque de ajuste de parámetros o mecanismo de adaptación, para lo cual se pueden utilizar herramientas de estimación como por ejemplo la lógica difusa, las redes neuronales, la teoría de estabilidad de Lyapunov, la regla MIT entre otras. Este mecanismo se encarga de recalcular los parámetros del controlador en línea conforme las condiciones del proceso varíen.

Aunque el FMRAC es un control adaptativo directo, se utiliza el término adicional “fuzzy” para resaltar la diferencia existente con el MRAC que normalmente fundamenta la ley de adaptación de los parámetros del controlador en la teoría de

estabilidad lyapunov, mientras que el FMRAC lo fundamenta en el conocimiento heurístico de un experto procesado mediante el uso de lógica difusa [2].

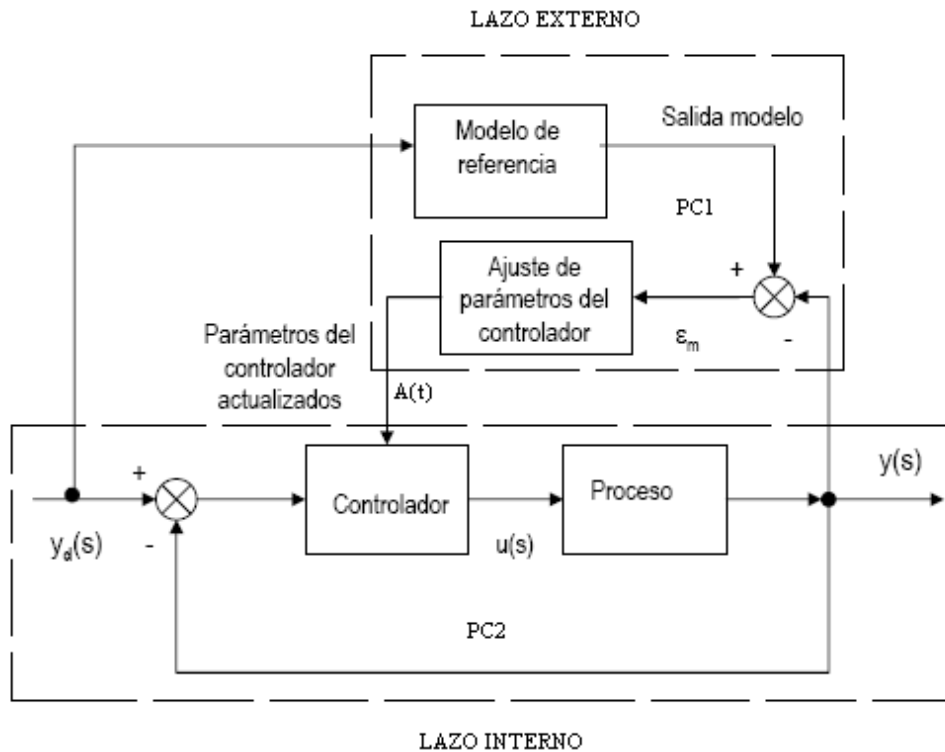


Figura 3.1 Esquema representativo del MRAC y FMRAC.
(Fuente: Autor)

3.3. LÓGICA DIFUSA

Para abordar la mayoría de los problemas existen dos formas fundamentales de conocimiento: el conocimiento objetivo, que es usado todo el tiempo en ingeniería en la formulación de problemas (ej: modelos matemáticos) y el conocimiento subjetivo, el cual se representa mediante información lingüística (ej: reglas, información experta, requerimientos de diseño). Este conocimiento es usualmente incuantificable mediante el uso de la matemática tradicional y se aplica frecuentemente en la evaluación de diseños [1]. La combinación de estas dos formas de conocimiento se puede llevar a cabo de una manera lógica mediante lo que se conoce en la literatura como Lógica Difusa (FL), la cual consiste básicamente en una representación del conocimiento mediante la combinación de una serie de modelos matemáticos (conocimiento objetivo) con declaraciones lingüísticas (conocimiento subjetivo) que son un conjunto de proposiciones convertidas en reglas. De esta forma la lógica

difusa permite abordar la incertidumbre en el conocimiento de una forma natural e intuitiva [1].

3.3.1. Sistemas difusos

La lógica difusa como herramienta fundamental en un sistema ha dado pie a lo que se conoce en múltiples campos como sistemas de lógica difusa (FLS). Los FLS consisten en un mapeo no lineal de un vector de datos de entrada hacia una salida escalar, la fortaleza de la LF es que se generan múltiples posibilidades para realizar diferentes representaciones ante un vector de entradas [1]. Esta variedad sin embargo requiere de un conocimiento cuidadoso de la FL y los elementos que comprenden al FLS.

Un sistema de lógica difusa comprende básicamente cuatro bloques o elementos fundamentales como lo son: la base de reglas, clasificación difusa (fuzzifier), la máquina de inferencia (inference engine) y procesador de salida (defuzzifier) [1] y [2].

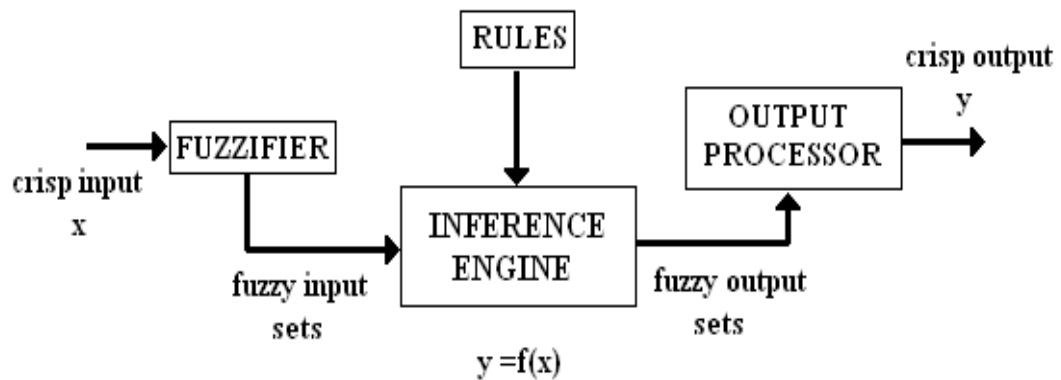


Figura 3.2 Sistema lógica difusa
(Fuente: Uncertain Rule-Base Fuzzy logic system)

3.3.2. Clasificación Difusa (fuzzifier)

Si una variable puede tomar palabras en lenguajes naturales como sus valores, se le llama variable lingüística. Las palabras son caracterizadas como conjuntos difusos definidos en el universo de discurso en el que la variable es definida.

En esta etapa se toma un dato del espacio de entrada X (crisp input) y se clasifica mediante el respectivo conjunto difuso del espacio difuso de entrada. El espacio de entrada X puede ser representado como un vector x de n entradas.

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

Donde x_i puede ser cualquier variable, por ejemplo temperatura, tensión etc.

Por correspondencia debe haber n conjuntos difusos de entrada de manera que cada valor de la variable $x_i \in X$ se le asocia un grado de pertenencia entre cero y uno mediante las funciones de membresía del i ésimo conjunto difuso.

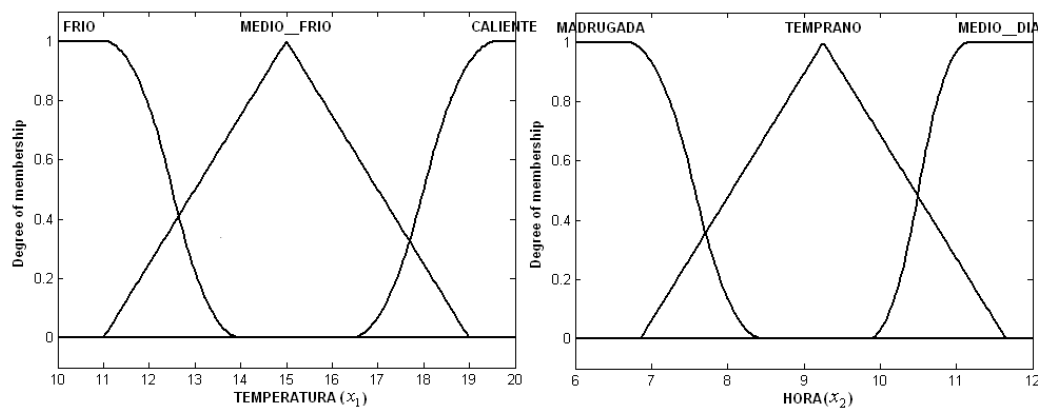


Figura 3.3 Conjuntos difusos entrada
(Fuente: Autor)

En la figura 3.3, hay dos conjuntos difusos de entrada con sus respectivas funciones de pertenencia; cada conjunto difuso es la clasificación en el espacio difuso de la variables de entrada x_1 y x_2 respectivamente.

3.3.3. Bloque de inferencia (inference engine)

La base de reglas de un sistema difuso es un conjunto de proposiciones con la estructura **IF-THEN**. Estas sentencias relacionan las entradas y las salidas difusas del mecanismo de inferencia difuso para caracterizar su comportamiento dinámico [11].

Ejemplo

IF la temperatura(x_1) es alta **AND** la hora(x_2) es medio día **THEN** la humedad es alta

Donde la parte subrayada de la regla se conocen como los antecedentes de la reglas y son definidos mediante las entradas difusas. La parte sin subrayar de la reglas se conoce como las consecuencias y son definidas mediante las salidas difusas.

“Se denomina dispositivos de inferencia difusa a los sistemas que interpretan la reglas de tipo IF-THEN de una base de reglas, con el fin de obtener los valores de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema” [10].

Con una base de reglas difusas, el mecanismo de inferencia es capaz de derivar por ejemplo, una acción de adaptación en un controlador ajustable para un conjunto de valores de entrada. La acción de adaptación puede ser determinada por las entradas observadas por el adaptador difuso, la cuales representan el estado dinámico del proceso a ser adaptado [11].

La activación de una regla en un instante de tiempo depende de los valores que tomen las variables de entrada, de esta manera el mecanismo de inferencia opera sólo con las reglas activas aplicando un operador difuso que permite relacionar los diferentes antecedentes de cada regla (Normalmente se utilizan como operadores OR o AND), posteriormente se aplica el método de implicación que es el que cuantifica el grado de activación de las reglas, luego se procede con el método de agregación que básicamente es una unión lógica de todos los resultados individuales obtenidos de cada una de la reglas activas generando de esta manera una salida difusa.

3.3.4. Procesamiento de salida (defuzzifier)

El objetivo de esta etapa es decodificar las salidas difusas del mecanismo de inferencia, de manera que de estas se obtengan valores concretos que pertenezcan

al espacio de salida y (crisp output), el cual se puede definir como un vector de m salidas donde.

$$y = (y_1, y_2, y_3 \dots, y_i \dots y_m) \quad (3.2)$$

Donde y_i puede ser cualquier variable, por ejemplo temperatura, tensión etc.

4. PLANTEAMIENTO GENERAL DE PROBLEMA

La versatilidad y simplicidad de los reguladores de parámetros fijos para resolver muchos de los problemas de control del mundo real, les ha permitido situarse de manera tal que en la industria más del 90% de los lazos de control poseen uno de estos reguladores [12] y [16]. Este auge igualmente ha incentivado se les siga estudiando con rigor teniendo en cuenta que poseen grandes dificultades de adaptación frente a variaciones en los parámetros de la planta, variaciones en el punto de operación e incidencias externas como perturbaciones y ruido.

El desempeño de estos controladores fundamentalmente es determinado por la escogencia de sus parámetros [16]. Luego, aunque es común encontrar en la literatura un número importante de técnicas para su sintonización y adaptación, por cuestiones prácticas son muy pocas las que finalmente se aplican. Por lo tanto es importante desarrollar proyectos que permitan continuar con la reducción en el grado de complejidad y el costo de implementación de los adaptadores para controladores clásicos.

La falta de sistemas de cómputo centralizados que se empleen para sintonizar sistemas de control dedicados o distribuidos y los elevados costos que implica la adquisición de nuevos dispositivos electrónicos que mejoren los sistemas, son también problemas frecuentes en la industria local.

Teniendo en cuenta lo anterior este trabajo plantea una metodología de diseño para construir el mecanismo de adaptación difuso de un esquema de control adaptativo basado en el modelo de referencia que sintonice de manera automática y en línea los parámetros del controlador de un sistema de estructura fija, el cual se evalúa de manera numérica mediante la herramienta Matlab – Simulink.

5. PROPUESTA DE DISEÑO

En este capítulo se plantea una metodología de diseño para determinar los criterios necesarios para definir las entradas, las salidas y la base de reglas del sistema difuso de adaptación de parámetros. Estos criterios de diseño son definidos mediante un análisis del comportamiento dinámico de las diferentes etapas del esquema de control FMRAC, que está formado por tres partes: Un sistema de control clásico (lazo interno), un modelo de referencia y un mecanismo de adaptación de parámetros [4],

5.1. Definición del Modelo de referencia.

El comportamiento dinámico del bloque de referencia del esquema FMRAC se modela en Simulink mediante un sistema de segundo orden sub-amortiguado y sus parámetros característicos (ver figura 5.1) se determinan teniendo en cuenta la respuesta que se desea en el sistema de control de lazo cerrado. El primer paso de la metodología consiste entonces en definir el sobrepaso máximo, el tiempo de asentamiento y el tiempo de levantamiento de la respuesta al escalón deseada,

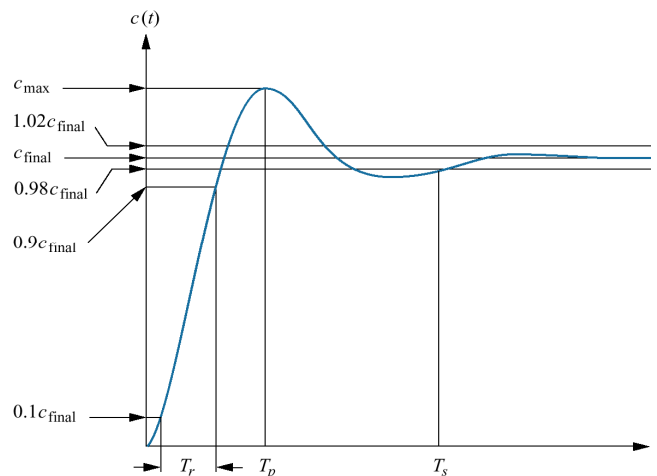


Figura 5.1 Respuesta al escalón de segundo orden sub-amortiguada
(Fuente: E3T – UIS)

Luego de definir las características de la respuesta deseada para el proceso, se diseña un PID nominal para el lazo interno o sistema de control de lazo cerrado del esquema FMRAC (ver figura 3.1). Idealmente, en condiciones nominales de

operación, las repuestas al escalón de sistema de lazo cerrado y el modelo de referencia, deberán ser iguales o muy similares.

Es importante resaltar que las variaciones en los parámetros del controlador se deben realizar alrededor de sus valores nominales. Este planteamiento pretende evitar los problemas de algunos sistemas de control centralizado, los cuales pierden autonomía sobre el proceso, cuando se presentan fallas de comunicación en el sistema. Si el esquema FMRAC presenta fallos de comunicación entre el lazo de adaptación y el sistema de lazo cerrado. Este último continuará controlando el proceso mediante la acción de los parámetros nominales del controlador.

5.2. Caracterización de un proceso en lazo cerrado con un controlador de la familia PID.

Otra etapa importante que permite definir criterios de diseño para construir el adaptador difuso es el análisis del comportamiento dinámico del lazo interno del esquema del control FMRAC. Para desarrollar la respectiva caracterización de este sistema es necesario implementarlo en Matlab-Simulink. El sistema de lazo cerrado debe contener un controlador de la familia PID con sus parámetros nominales y un modelo de la planta que simule el comportamiento real del proceso.

El sistema implementado en Matlab-Simulink debe someterse a variaciones del punto de operación, perturbaciones y todos los efectos que ocasionen que el sistema presente problemas de desempeño y robustez. Estas condiciones de operación deben ser caracterizadas gráficamente mediante la respuesta al escalón del sistema. En la figura 5.2, se observan las características dinámicas del modelo de referencia (Y_D) y el sistema de control de lazo cerrado (Y_R), cuando son sometidos a variaciones del punto de operación (para mayor información ver anexo A).

Es importante someter el sistema a todas las acciones que implique problemas considerables de robustez puesto que como se verá más adelante, que el adaptador mejore las condiciones de operación para un problema específico no implica que adapte bien otras situaciones.

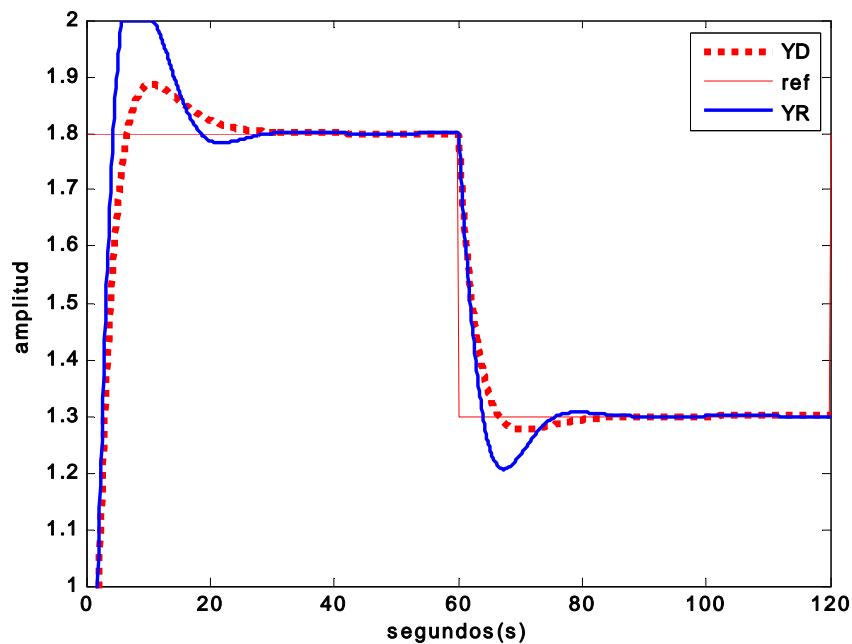


Figura 5.2 Sistemas deseado y real sometidos a variaciones en el punto de operación.
(Fuente: Autor)

Para mejorar el desempeño en un sistema de control de lazo cerrado que presenta problemas de robustez, se puede partir de la hipótesis de que es posible encontrar un controlador PID específico para cada una de las diferentes condiciones de operación a las que puede ser sometido un proceso real. Bajo estas consideraciones, en esta etapa también se realiza un análisis en el tiempo de los efectos causados en la respuesta al escalón del sistema, al variar los parámetros del PID alrededor de sus valores nominales. El análisis de estos comportamientos también se realizan de forma gráfica como se presenta en la figuras 6.9 y 6.10 en el capítulo de validación numérica. Este análisis sirve para establecer los criterios que ayudarán a definir las entradas y las salidas del adaptador difuso.

Para establecer los parámetros de simulación del proceso real, el diseñador debe establecer los límites y las características de las diferentes condiciones de operación que espera adaptar con el esquema FMRAC. Esta caracterización es muy importante puesto que es uno de los criterios que permite establecer la robustez y el rango de acción que se requieren del adaptador difuso.

5.3. Diseño del adaptador difuso

Teniendo en cuenta que el objetivo del adaptador difuso es hacer que la planta real siga lo más fiel posible la respuesta deseada, es muy importante empezar por definir adecuadamente las diferentes etapas del sistema difuso. En este trabajo se estableció que los conjuntos difusos de entrada y salida del sistema deben construirse en función de la dinámica del error de adaptación e_a y las variaciones necesarias para modificar los parámetros del PID.

$$e_a = y_D - y_R \quad (5.1)$$

Donde: y_D y y_R son la salidas deseada y real respectivamente.

La base de reglas queda expresada en función de los conjuntos difusos de entrada, los conjuntos difusos de salida, las características dinámicas del error de adaptación y el conocimiento heurístico y empírico que se tenga del sistema. El objetivo fundamental de la base de reglas del adaptador difuso es formular un mínimo de proposiciones que aumenten la robustez del sistema de control, generándole la capacidad de adaptarse y seguir el comportamiento dinámico deseado, teniendo en cuenta que el principal problema de los controladores de ganancias constantes es su nula capacidad de adaptación.

En la mayoría de esquemas de adaptación basados en el modelo de referencia y mecanismo de adaptación difusa existentes en la literatura [2], [13] y [19], se definen como entradas al adaptador, el error de adaptación y su derivada. Para la presente propuesta se toma este criterio pero con una minúscula variación al expresar la derivada del error de adaptación.

En un sistema de control con tiempo de muestreo $T=Ts$ se tiene:

$$\begin{aligned} e_a(0) &= y_D(0) - y_R(0) \\ e_a(1) &= y_D(1) - y_R(1) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Desarrollando la aproximación de la derivada

$$de_a/dt \cong \Delta e_a(1)/\Delta t \cong 1/Ts (e_a(1) - e_a(0)) \quad (5.3)$$

Reemplazando 5.2 en 5.3

$$\Delta e_a(1)/\Delta t \cong 1/Ts ((Y_D(1)-Y_R(1))-(Y_D(0)-Y_R(0))) \quad (5.4)$$

Finalmente reagrupando las respuestas deseadas y reales se tiene:

$$\begin{aligned} \Delta e_a(1)/\Delta t &\cong 1/Ts ((y_D(1)-y_D(0))-(y_R(1)-y_R(0))) \\ \Delta e_a(1)/\Delta t &\cong 1/Ts(\Delta y_D(1)-\Delta y_R(1)) \end{aligned} \quad (5.5)$$

De la ecuación 5.5 se deduce que la derivada del error de adaptación es una comparación implícita de la derivada de la respuesta deseada y la respuesta real. La razón por la cual se hace esta distinción radica en que si Y_D es una referencia, su derivada $\Delta Y_D/\Delta t$ también lo es, permitiendo extraer información más precisa que para el caso en el que se utilizan dos entradas (e_a y de_a/dt). El aumento en una entrada al sistema de adaptación facilitará además la caracterización del sistema y por tanto la construcción de la base de reglas del adaptador.

5.3.1. Construcción de los conjuntos difusos de entrada

Los límites del universo de discurso de los conjuntos de entrada y salida del adaptador se deben determinar, caracterizando las diferentes condiciones de operación del proceso real. Estos intervalos o rangos de acción delimitan las características dinámicas del adaptador difuso y por lo tanto influyen de manera significativa en las características de desempeño del esquema FMRAC.

La propuesta de diseño para el adaptador se fundamenta en un análisis gráfico que permite delimitar y caracterizar por regiones la respuesta deseada al escalón Y_D (sistema de segundo orden sub-amortiguados) y la salida real Y_R al igual que el valor absoluto de sus respectivas derivadas aproximadas $|\Delta Y_D/\Delta t|$ y $|\Delta Y_R/\Delta t|$ y el error de adaptación e_a .

En la figura 5.3, se observa que la respuesta al escalón deseada tiene una derivada más rápida al comienzo y disminuye paulatinamente hasta cero conforme la respuesta se acerca a su valor pico. Luego desciende negativamente hasta su valor mínimo y regresa a cero conforme desaparece la respuesta transitoria. Estas

características permiten identificar ciertas regiones en la respuesta al escalón con su respectivo intervalo de tiempo con solo conocer la magnitud de su derivada.

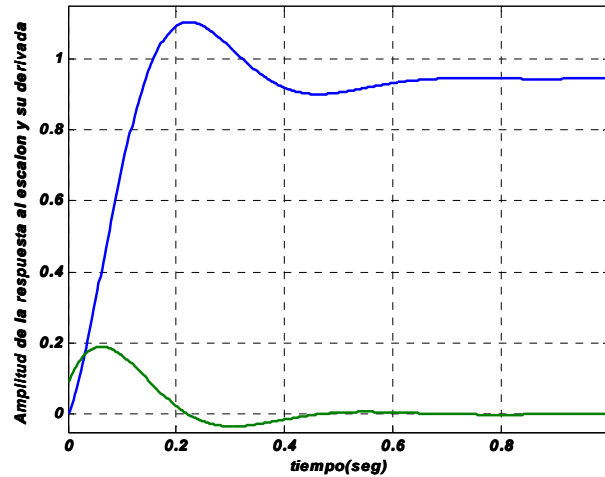


Figura 5.3 Características de la respuesta al escalón y su derivada en un sistema de segundo orden sub-amortiguado (Fuente: Autor)

Para una mejor interpretación de la anterior descripción se toma la respuesta al escalón y el valor absoluto de su derivada y se divide en tres regiones como se muestra en la figura 5.4. Las líneas horizontales y verticales delimitan las regiones de la respuesta al escalón y su derivada respectivamente.

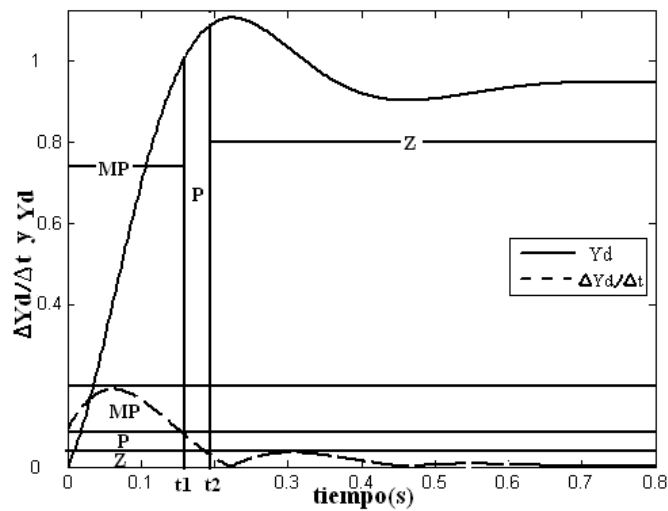


Figura 5.4 Clasificación difusa de la derivada de la respuesta al escalón. (Fuente: Autor)

Es importante resaltar que esta caracterización se realiza con la respuesta al escalón del modelo de referencia bajo condiciones nominales puesto que para otros puntos de operación las magnitudes en las respuestas varían. De esta manera si se somete al modelo deseado del sistema a una entrada escalón que tiene el doble de magnitud que el escalón de las condiciones nominales se tendrán respuesta con magnitudes para las derivadas que son el doble de la magnitud de respuesta para las condiciones nominales en cualquier instante de tiempo. Este comportamiento obedece a que la caracterización se realiza con el modelo de referencia que se representa a través de un modelo de segundo orden lineal.

El conjunto difuso que representa el valor absoluto de la derivada de la respuesta al escalón $|\Delta Y_D/\Delta t|$ queda determinado por las funciones de membresía etiquetadas con los siguientes nombres **zero[Z]**; **positivo[P]** y **muy positivo[MP]**. La correspondencia temporal se puede observar en la figura 5.4, donde **MP** se delimita por el intervalo $0 < t < t_1$, **P** en el intervalo $t_1 < t < t_2$ y **Z** en $t > t_2$. El conjunto difuso de entrada $|\Delta Y_D/\Delta t|$ se presenta en la figura 5.5.

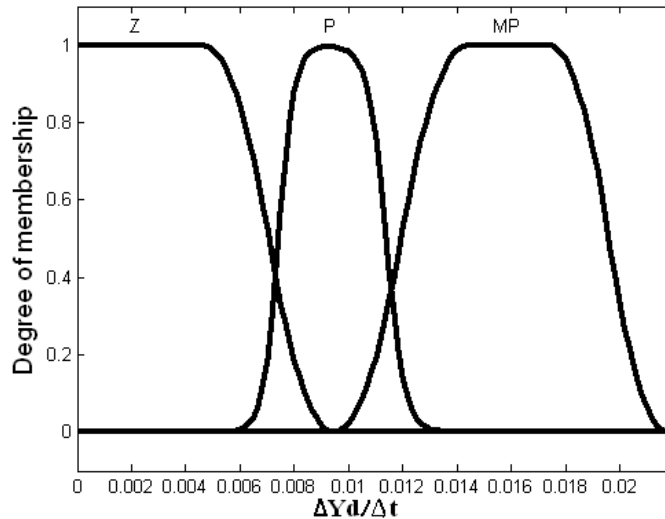


Figura 5.5 Conjunto difuso de entrada $|\Delta Y_D/\Delta t|$
(Fuente: Autor)

Para la construcción de las funciones de membresía de los conjuntos difusos de entrada $|\Delta y_R/\Delta t|$ y e_a , se toma la información obtenida de la etapa de caracterización del proceso donde se sometió el sistema a diferentes condiciones de

operación y se selecciona las respuestas que presentan la máxima variación en las derivadas de la respuesta al escalón y el error de adaptación. Posteriormente se toman estas gráficas y se delimita por regiones de manera similar a lo realizado anteriormente en la figura 5.4; salvo que para el error de adaptación no se toma su valor absoluto. Para una mayor compresión visualizar el ejemplo de aplicación de esta metodología en el anexo A.

5.3.2. Diseño de los conjuntos difusos de salida

Para establecer el dominio o universo de discurso de los conjuntos difusos de salida se deben tener en cuenta los resultados de la variación de los parámetros del PID alrededor de diferentes puntos de operación realizados en la etapa de caracterización. El rango de variación para cada parámetro del controlador se estima analizando los valores máximos y mínimos necesarios, para reducir el error de adaptación en las condiciones de operación que ocasionan los peores índices de desempeño en el sistema.

La cantidad de conjunto de salidas del adaptador queda determinada por el número de parámetros del controlador. Esta característica se puede ilustrar tomando el PID descrito en el anexo A, el cual es representado por una función de transferencia que tiene dos ceros y una ganancia Z_1 , Z_2 y K_c . Estos parámetros se adaptan de forma directa de manera que los parámetros K_P , K_I y K_D quedan relacionados mediante la ecuación (5.6) (ver anexo A). Para este ejemplo se escogió adaptar directamente (Z_1 , Z_2 y K_c), puesto que permite una mejor compresión entre el evento en el tiempo y su representación en el lugar de las raíces.

$$\begin{aligned}K_d &= K_c \\K_p &= (Z_1 + Z_2) \cdot K_c \\K_i &= (Z_1 \cdot Z_2) \cdot K_c\end{aligned}\tag{5.6}$$

Para limitar y definir las características en las funciones de membresía es necesario recurrir nuevamente a la información recopilada y analizada en la etapa de caracterización del sistema. Luego se encuentra mediante la representación en el tiempo y el lugar geométrico de las raíces los valores más adecuados para las salidas del sistema difuso (ΔZ_1 , ΔZ_2 y ΔK_c). Los valores instantáneos de los

parámetros del controlador de la planta real se calculan mediante las expresiones descritas en la ecuación (5.7).

$$\begin{aligned} K_{cn} &= K_c \cdot \Delta K_c \\ Z_{1n} &= Z_1 + \Delta Z_1 \\ Z_{2n} &= Z_2 + \Delta Z_2 \end{aligned} \quad (5.7)$$

Donde Z_{1n} , Z_{2n} y K_{cn} representan los valores adaptados y K_c , Z_1 y Z_2 Los valores nominales del controlador PID.

5.3.3. Diseño de la base de reglas

Para la construcción del sistema difuso y en especial la base de reglas es necesario implementar todo el sistema FMRAC, teniendo en cuenta que se requiere realizar pruebas para evaluar la efectividad de las proposiciones que se van implementando.

Para el diseño de la base de reglas es aconsejable empezar por implementar del total de reglas disponibles, sólo las proposiciones suficientes para adaptar pequeñas variaciones alrededor del punto de operación nominal del sistema. Esto tiene como objetivo minimizar el número de reglas e ir evaluando de forma más eficaz la efectividad de estas sobre el sistema, para que en caso de presentar problemas, realizar el reajuste inmediato de las funciones de membresía, los conjuntos de entrada y salida ó el mecanismo de inferencia si es necesario. De esta forma se continúan agregando y evaluando reglas conforme se aumenten los rangos de variación en las condiciones de operación del sistema hasta abarcar los límites propuestos. Del ejemplo presentado en el anexo A se pueden resaltar algunas reglas tales como:

1. ***If (Δy_r is Z) or (Δy_m is Z) or (e_a is Z) then (K_d is =)(Z_1 is =)(Z_2 is =) (1)***
2. ***If (Δy_r is MP) or (Δy_m is MP) or (e_a is Z) then (K_d is =)(Z_1 is =)(Z_2 is =) (1)***
3. ***If (Δy_r is MP) or (Δy_m is SP) or (e_a is Z) then (K_d is BR)(Z_1 is =)(Z_2 is =) (1)***
4. ***If (Δy_r is P) or (Δy_m is MP) or (e_a is MP) then (K_d is BL)(Z_1 is =)(Z_2 is =) (1)***

5. If (Δy_r is P) or (Δy_m is MP) or (e_a is Z) then (K_d is BR)(Z_1 is BR)(Z_2 is BR) (1)

6. If (Δy_r is Z) or (Δy_m is Z) or (e_a is MP) then (K_d is BL)(Z_1 is BL)(Z_2 is BL) (1)

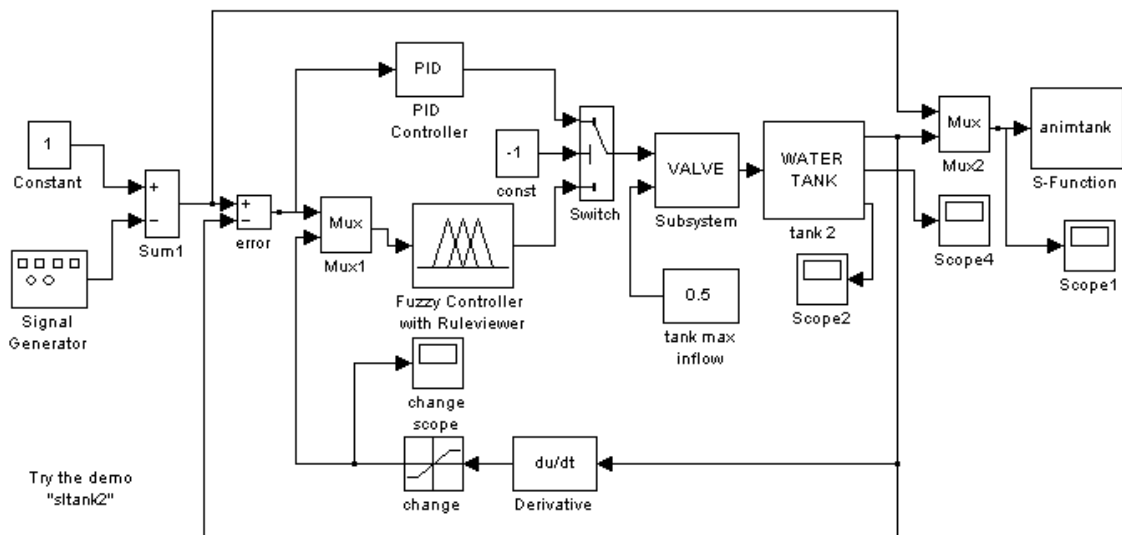
La reglas 1 y 2 sirven para mantener los parámetros nominales del controlador en caso de que el sistema no requiera adaptación puesto que el sistema real está dentro de los valores deseados. Las reglas 3 y 4 básicamente se activan cuando se detectan grandes variaciones en la derivada de la respuesta real. Las reglas 5 y 6 se activan ante variaciones significativas en el cero de la planta.

6. VALIDACIÓN NUMÉRICA DEL ESQUEMA DE CONTROL FMRAC

Para construir y evaluar el desempeño del esquema del control FMRAC de acuerdo a la propuesta metodológica, se parte seleccionando de la Toolbox de lógica difusa de Matlab el ejemplo del modelo de un sistema de control de nivel, el cual es controlado a través de un regulador difuso o un regulador PID de manera que es posible visualizar la diferencia entre las dos acciones de control sobre el sistema. El modelo en Simulink que emula el sistema de control de nivel (lazo interno) consta básicamente de los siguientes componentes.

- Controlador (PID o difuso)
- Planta (tanque)
- Actuador (válvula)

En la figura 6.1, se presenta esquemáticamente el sistema de control de nivel, donde el switch permite seleccionar, el tipo de control que deseamos sobre el proceso.



**Figura 6.1 Control difuso o PID en un sistema de nivel
(Fuente: Toolbox fuzzy logic - Matlab)**

A continuación se describe brevemente el modelo matemático de la planta (wáter tank) donde.

- **A** representa el área de la sección transversal del tanque
- **a** representa el área del orificio de salida.
- **C_d** y **g** coeficiente de descarga y la constante gravitacional respectivamente.

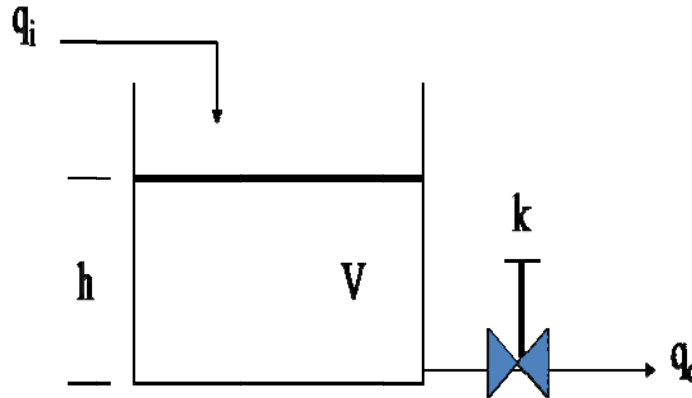


Figura 6.2 Esquema del sistema de nivel
(Fuente: Rodrigo Correa, E3T – UIS)

Planteando la ecuación de equilibrio para el flujo dentro del tanque de la figura 6.2, se tiene:

$$q_i - q_o = A \cdot \frac{dh}{dt} \quad (6.1)$$

Donde la válvula de salida es diseñada para comportarse como un orificio. El flujo de salida del tanque queda determinado mediante la ecuación (6.2).

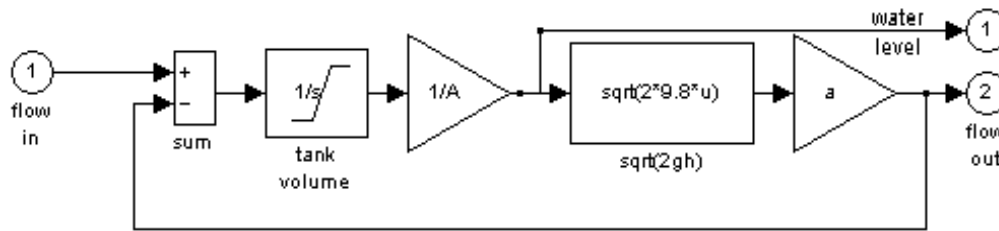
$$q_o = c_d \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (6.2)$$

Reemplazando la ecuación (6.2) en (6.1) se tiene

$$q_i = (c_d \cdot a) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} + A \cdot \frac{dh}{dt}; \quad (6.3)$$

$$h \in (0, 1.8)[m] \wedge a \in (0.03, 0.05)[m^2]$$

De esta manera la dinámica del tanque queda determinada por una ecuación diferencial no lineal implementada en Simulink en el bloque water tank, como se muestra en la figura 6.3.



**Figura 6.3 Esquema representativo del flujo en el tanque
(Fuente: Toolbox fuzzy logic - Matlab)**

A continuación se presenta la aplicación de la metodología de diseño del esquema FMRAC para el sistema de nivel anteriormente descrito.

6.1. Definición del modelo de referencia para el sistema de nivel.

Se linealiza la ecuación 6.3 (anexo B), alrededor del punto operación nominal $H_{op}=1m$, que junto al modelo lineal de la válvula establecen la función de transferencia de la ecuación 6.4.

$$G_s(s) = \frac{0.5}{s(s + 0.111)}$$

$$G_c(s) = 1 \tag{6.4}$$

Si se calcula la respuesta de lazo cerrado con las funciones de transferencia de la planta y el controlador descritas en la ecuación 6.4, se obtiene la función de transferencia para el sistema de nivel presentada en la ecuación 6.5.

$$G_{CL}(s) = \frac{0.5}{s^2 + 0.111s + 0.5} \tag{6.5}$$

La respuesta al escalón del sistema nivel descrito en la ecuación 6.5 se presentada en la figura 6.4. Esta respuesta ratifica la necesidad de un control PID para el sistema.

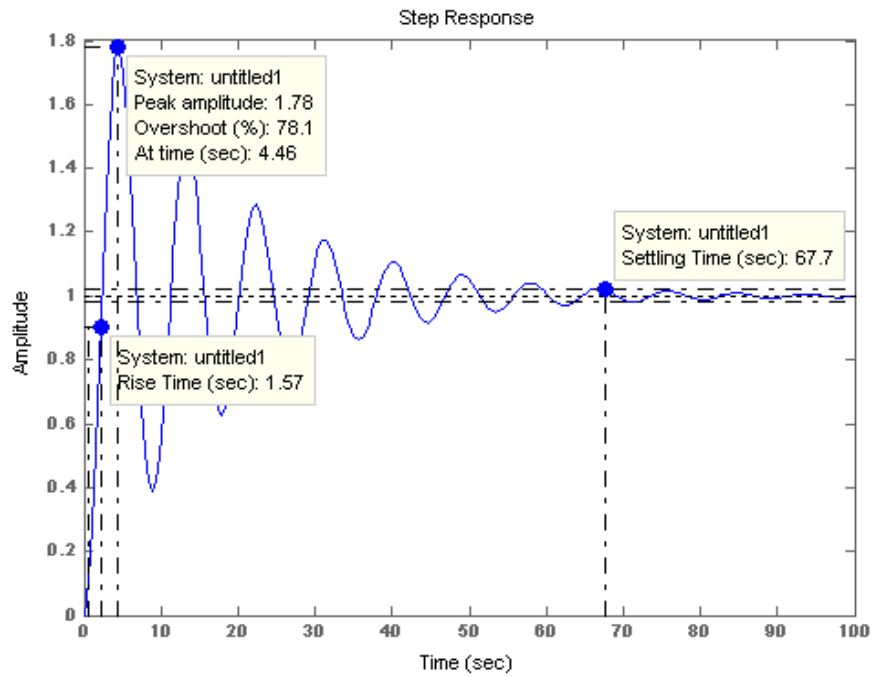


Figura 6.4 Respuesta al escalón del sistema de lazo cerrado
(Fuente: Autor)

Las características de la respuesta al escalón del modelo de referencia se muestran en la figura 6.5.

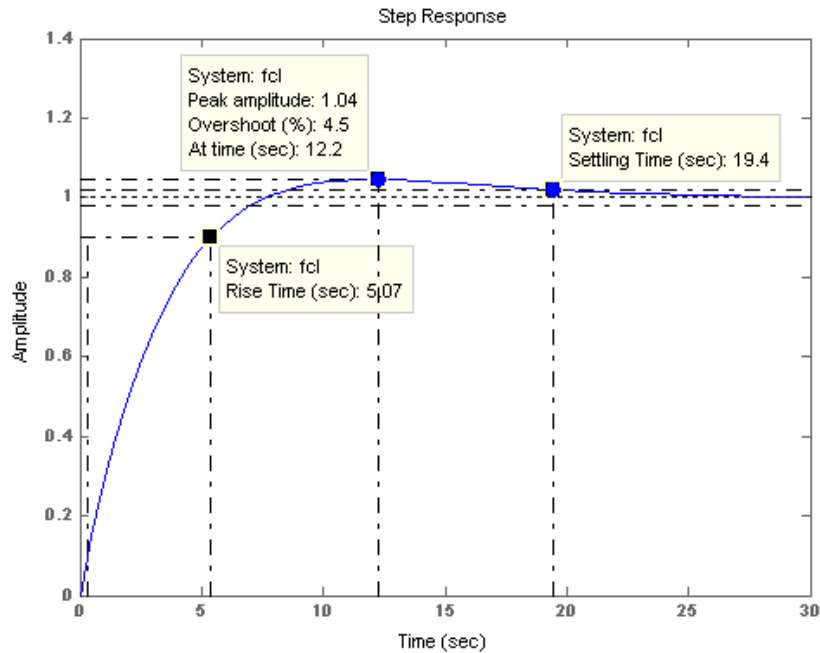


Figura 6.5 Respuesta al escalón del modelo de referencia
(Fuente: Autor)

En la ecuación 6.6, se representa el modelo matemático que describe el comportamiento del modelo de referencia.

$$G_{icl}(s) = \frac{0.322s + 0.05635}{s^2 + 0.433s + 0.05635} \quad (6.6)$$

Se utilizan los parámetros de la respuesta al escalón del modelo de referencia y el modelo lineal de la planta del sistema de nivel estimado en el anexo B, para encontrar los parámetros nominales del controlador PID. Los parámetros estimados para el controlador se presentan en la tabla 1.

Constante proporcional	$K_P = 0.22$
Constante derivativa	$K_D = 0.725$
Constante integral	$K_I = 0$

Tabla 6.1 Parámetros nominales del PID.

En la figura 6.6, se observa que las respuestas al escalón real y deseada alrededor del punto de operación se asemejan, por lo tanto se asume que los valores nominales para el controlador PID son satisfactorios.

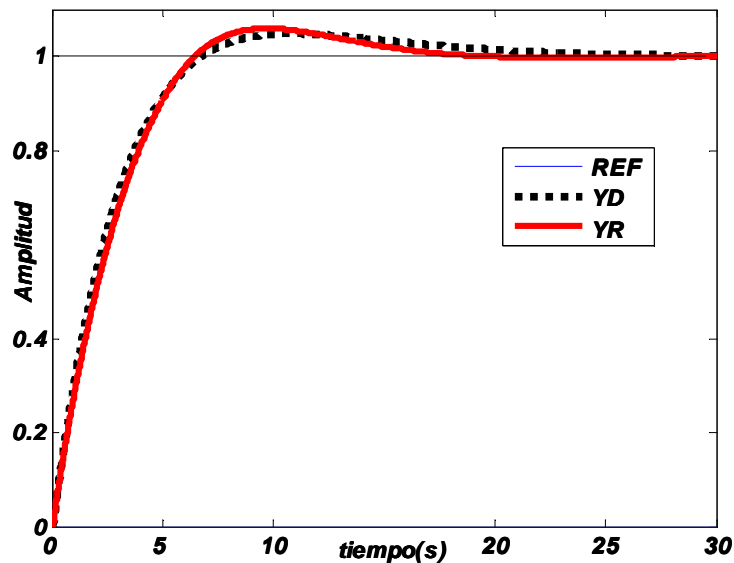


Figura 6.6 Respuestas al escalón deseada y real en el punto de operación nominal (Fuente: Autor)

6.2. Caracterización del sistema de control de nivel.

En esta etapa se trabaja con el sistema de nivel esquematizado en la figura 6.1, que contiene un bloque no lineal que simula el comportamiento del flujo en el tanque (water tank). La información recopilada en la caracterización del sistema se presenta de forma gráfica en la secciones 6.2.1, 6.2.2. y en el anexo C.

6.2.1. Variación de las condiciones de operación del sistema de nivel

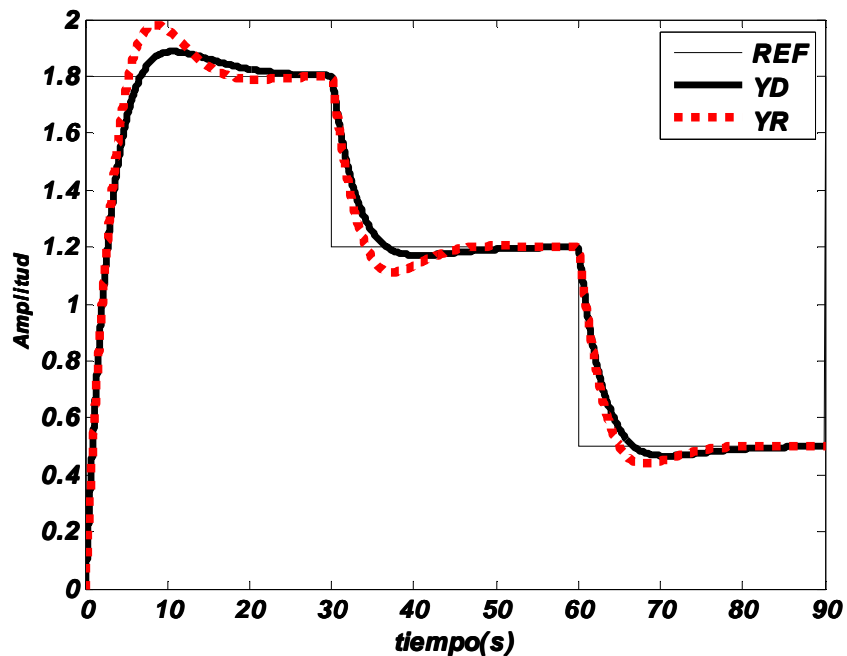


Figura 6.7 Respuestas al escalón deseada y real variando el punto de operación
(Fuente: Autor)

Las variaciones en el punto de operación del sistema se realizan teniendo en cuenta los intervalos definidos para los parámetros del tanque en la ecuación 6.3.

La figura 6.7, permite observar como la no linealidad de la planta ocasiona que el PID nominal pierda desempeño sobre el proceso cuando se realizan variaciones en el punto de operación del sistema. Esta característica no lineal es más notoria conforme se seleccionan puntos de operación más alejados de las condiciones nominales.

En la figura 6.8, se puede observar como una perturbación, por ejemplo, generada por turbulencia entre el controlador y la planta, puede ocasionar serios problemas de seguimiento, que en un esquema de control FMRAC se cuantificaría como un gran error de adaptación, ocasionando incluso que el nivel del fluido rebose el tanque.

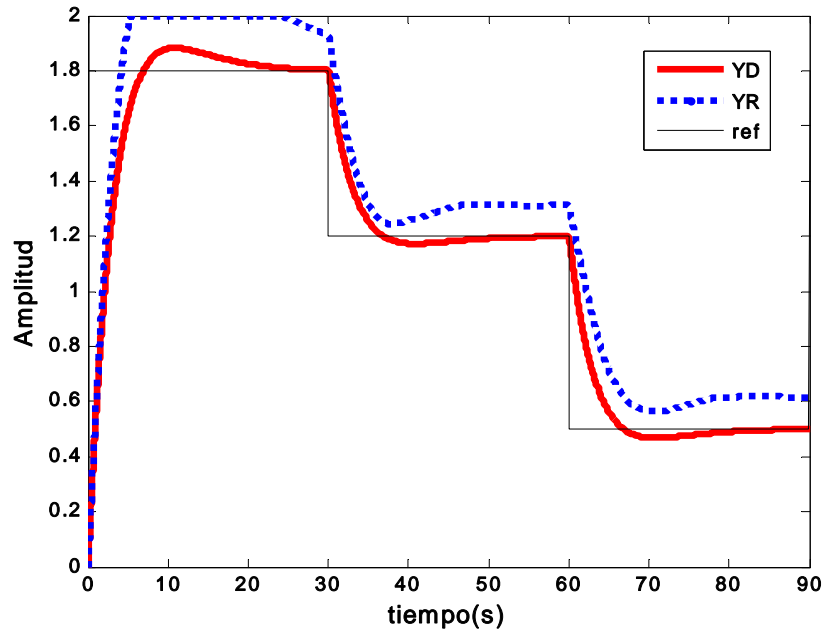


Figura 6.8 Respuestas al escalón deseada y real con perturbación entre el controlador y la planta (Fuente: Autor)

6.2.2. Variación de los parámetros de PID alrededor de sus valores nominales en el sistema de nivel.

Se realiza un análisis en el tiempo y en el lugar de las raíces de los efectos causados en la respuesta del sistema al variar los parámetros del PID alrededor de sus valores nominales ($K_D=0,725$ y $K_P=0,222$). La función de transferencia para el controlador PID se describe en las ecuaciones 6.7 y 6.8.

$$G_c(s)=K_D s+ K_P \quad (6.7)$$

$$G_c(s)=K_D \left(s+ \frac{K_P}{K_D} \right) \quad (6.8)$$

A continuación se presentan dos figuras donde cada una contiene tres gráficas con la respuesta al escalón del sistema de lazo cerrado. La Figura 6.9, muestra las

respuestas al escalón del sistema para tres valores diferentes de K_D y K_P constantes, mientras que en la figura 6.10, se mantiene constante K_D y se varía K_P .

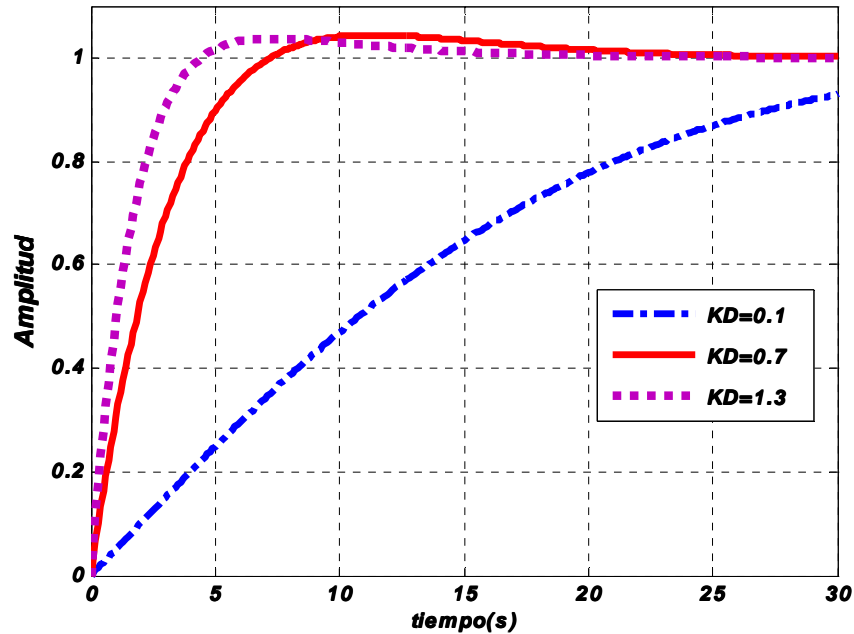


Figura 6.9 Respuesta al escalón (K_D variando y K_P constante)
(Fuente: Autor)

En la figura 6.9, se puede apreciar cómo la variación de K_D afecta significativamente el tiempo de levantamiento T_r y el tiempo de establecimiento T_s , de manera que mediante la variación de K_D se puede influir considerablemente en la rapidez de la respuesta al escalón del sistema de nivel. La ecuación 6.8 permite analizar, cómo se modifica el lugar geométrico de las raíces del sistema puesto que un aumento en K_D implica un aumento en la ganancia de lazo y una reducción o un acercamiento al origen del cero del controlador. Si se necesita aumentar la velocidad de la respuesta del sistema se aumenta K_D y viceversa si se desea disminuir su rapidez.

En la figura 6.10, se puede observar cómo la variación en K_P afecta de manera más uniforme las características de la respuesta en el tiempo. La relación de variación entre K_P y las características de la respuesta en el tiempo es de forma directa; si se aumenta K_P aumentan las características de la respuesta y si se disminuye ocurre lo contrario. De forma distinta sucede en el lugar de las raíces puesto que un aumento

de K_P implicará sólo una modificación del cero en el controlador. Es de esta forma como se empiezan a establecer los primeros rangos donde posiblemente van a variar K_D y K_P teniendo en cuenta adicionalmente las necesidades presentes en las diferentes condiciones de operación a las que debe ser sometido el sistema.

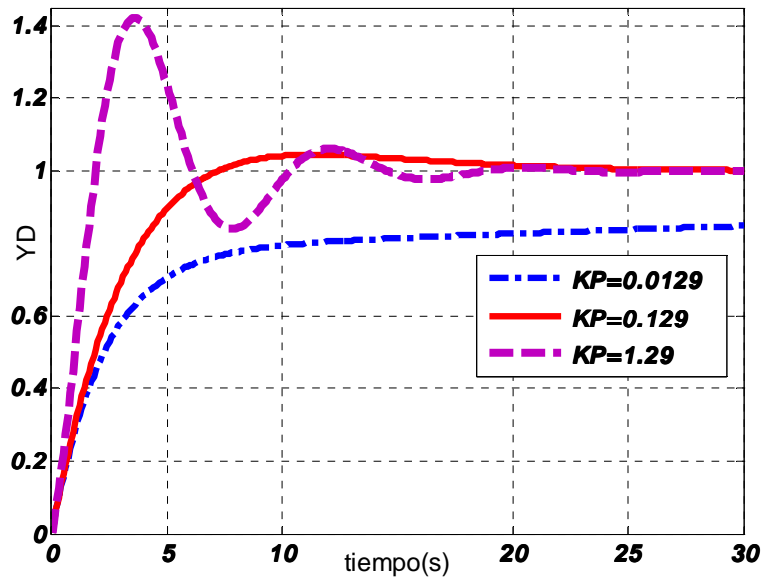


Figura 6.10 Respuesta al escalón K_P variando y K_D constante (Fuente: Autor)

6.3. Diseño del adaptador difuso para el sistema FMRAC.

La adecuada construcción de las dos etapas, previas al diseño del adaptador, es fundamental para establecer las condiciones y necesidades del proceso a adaptar. De ahí deriva la mayor parte de la información para construir los diferentes bloques del sistema difuso.

6.3.1. Construcción de las entradas difusas del adaptador.

Mediante un análisis gráfico (ver figura 6.11) se presentan la respuesta deseada y su derivada, alrededor del punto nominal de operación, delimitadas por las líneas horizontales y verticales respectivamente.

El conjunto difuso de entrada $\Delta Y_D/\Delta t$ se clasifican en la figura 6.12, donde se seleccionaron tres funciones de membresía que corresponden a cada una las

regiones delimitadas gráficamente en la derivada de la repuesta al escalón. Las funciones de membresía se definieron teniendo en cuenta la gran sensibilidad que se requiere en los conjuntos difusos de entrada para clasificar la información que constantemente llega al esquema de adaptación de las otras etapas del esquema FMRAC.

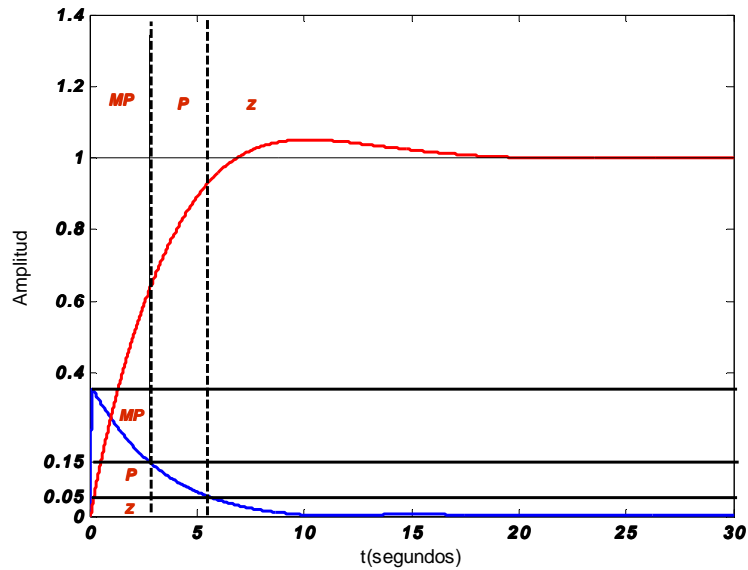


Figura 6.11 Clasificación difusa de la derivada de la respuesta deseada $|\Delta Y_D/\Delta t|$
(Fuente: Autor)

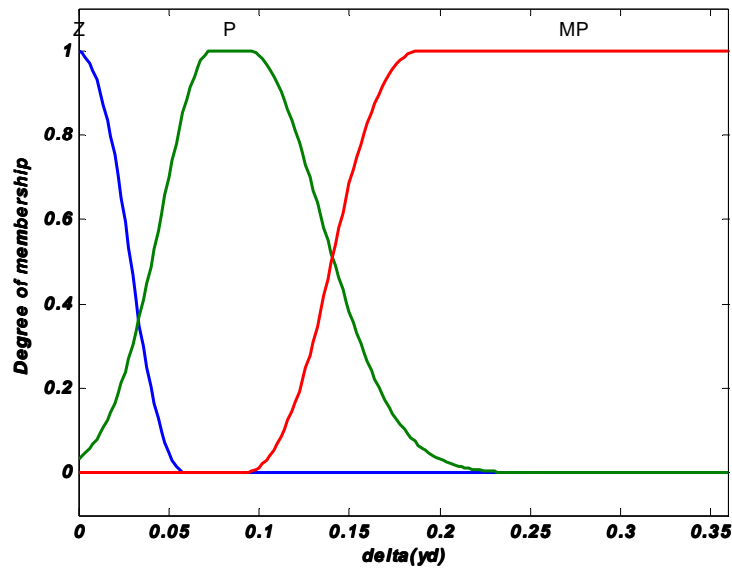


Figura 6.12 Conjunto difuso de entrada $|\Delta Y_D/\Delta t|$
(Fuente: Autor)

Del análisis realizado en la sección 6.2 se toman los peores casos de desempeño del proceso, para construir y definir los conjuntos difusos que clasificarán el valor absoluto de la derivada de la respuesta real $|\Delta Y_R/\Delta t|$ y el error de adaptación e_a . Estas condiciones de operación delimitan el rango de acción del adaptador, por lo tanto es necesario que las características de las respuestas del sistema para estos casos queden dentro del universo de discurso del respectivo conjunto de clasificación difusa.

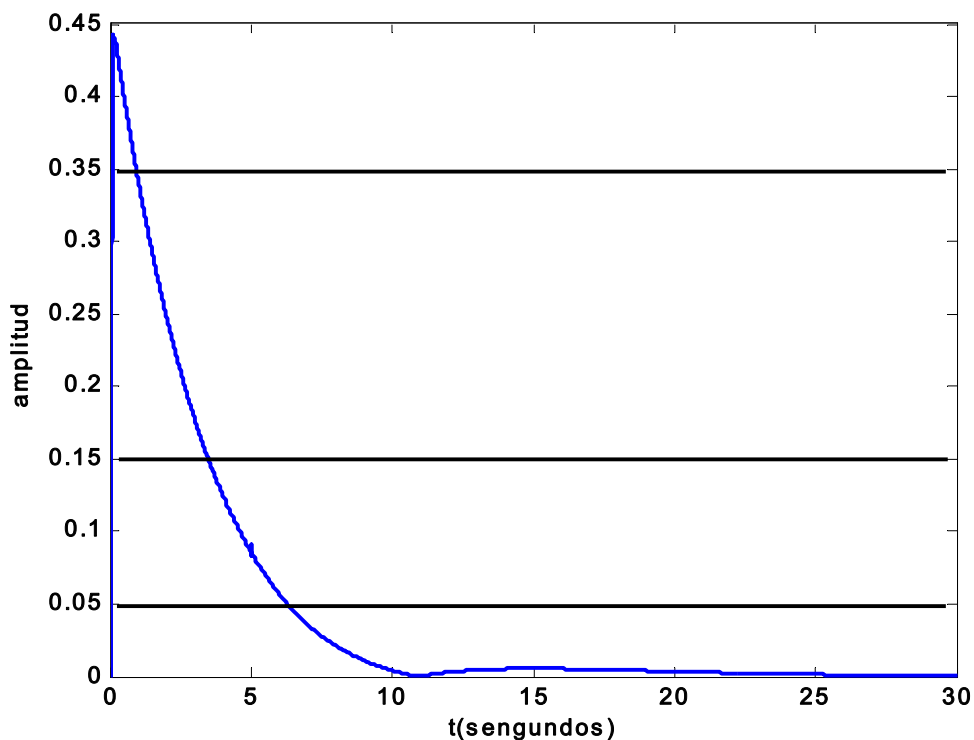


Figura 6.13 Clasificación difusa de la derivada de la respuesta real $|\Delta y_R/\Delta t|$ (Fuente: Autor)

Para clasificar la derivada real se toma la condición de operación, donde ésta presenta la magnitud más grande y luego se caracteriza gráficamente como se muestra en la figura 6.13. Dependiendo de las características del proceso es necesario trazar 4 o 5 regiones que delimiten la respuesta gráficamente. Para el sistema de nivel fueron suficientes 4 regiones, mientras que para el ejemplo del anexo A, fue necesario utilizar 5 dado que la derivada presentó un rango considerable de variación.

El conjunto difuso de entrada que clasifica la derivada real, se define mediante las funciones de pertenencia etiquetada con los Nombres **Zero[Z]**; **positivo[P]**; **muy positivo[MP]** y **bastante positivo[BP]** como se representa en la figura 6.14.

Para clasificar el tercer conjunto difuso de entrada se seleccionan de todas las condiciones de operación consideradas, las que presentan el máximo y mínimo error de adaptación. Luego se grafican estos errores y se delimitan por regiones como se observa en La figura 6.15.

Las funciones de pertenencia del conjunto difuso de entrada que clasifican el error de adaptación se etiquetan con valores lingüísticos: **zero[Z]**; **positivo[P]**; **muy positivo[MP]**; **negativo[N]** y **muy negativo [MN]** y se presentan en la figura 6.16. La selección del dominio para cada función de membresía depende de las consideraciones del diseñador, por ejemplo la función **zero[Z]**, determina que magnitudes en el error de adaptación no ameritan una adaptación de parámetros.

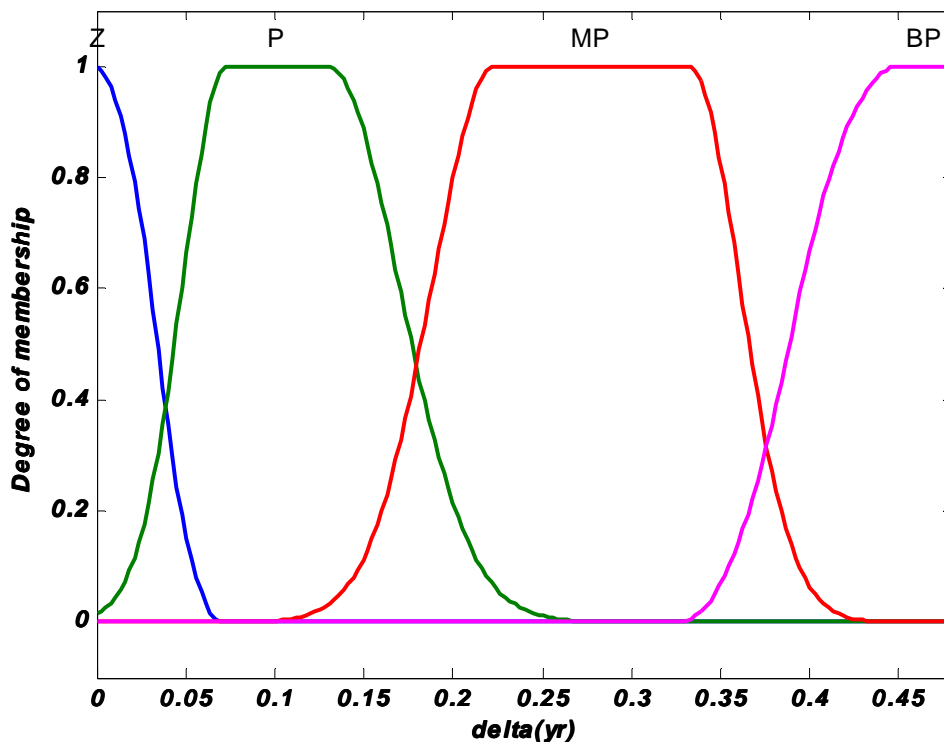


Figura 6.14 Conjunto difuso de entrada $|\Delta y_r / \Delta t|$
(Fuente: Autor)

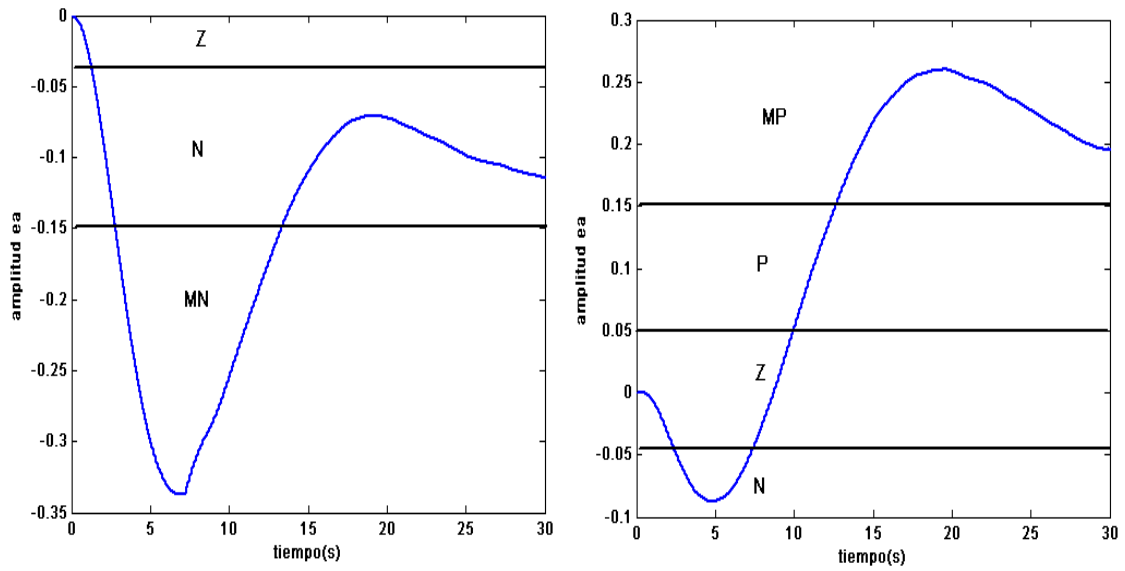


Figura 6.15 Clasificación difusa del error de adaptación e_a
(Fuente: Autor)

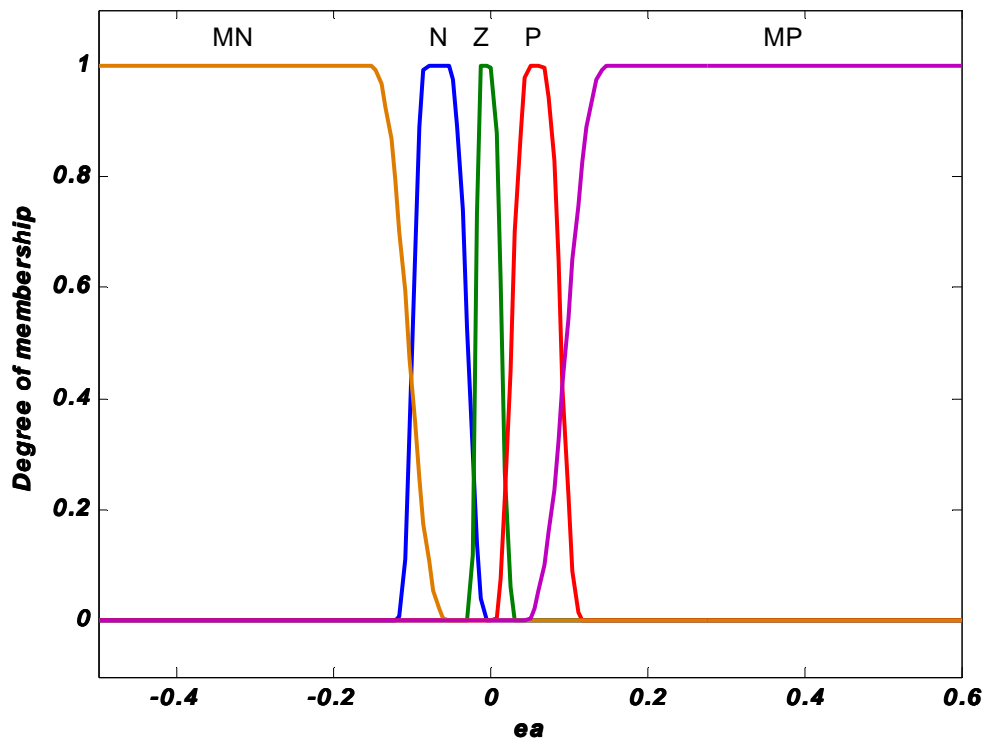


Figura 6.16 Conjunto difuso de entrada e_a
(Fuente: Autor)

6.3.2. Construcción de las salidas difusas del adaptador.

Para el sistema de nivel analizado en este trabajo se estableció un controlador PD, pero fue necesario de tres salidas o parámetros de ajuste para el regulador del sistema (ΔK_D , ΔK_P y ΔG). De esta manera los parámetros del controlador en cada instante de tiempo se determinan bajo las siguientes ecuaciones.

$$K_{Dn} = K_D + \Delta K_D \cdot \Delta G; \quad K_{Dn} \in [0.3, 2.5] \quad (6.9)$$

$$K_{Pn} = K_P + \Delta K_P \cdot \Delta G; \quad K_{Pn} \in [0.1, 1.6] \quad (6.10)$$

Donde K_{Dn} y K_{Pn} representan los valores adaptados, que son definidos para variar en los intervalos descritos en las ecuaciones 6.9 y 6.10.

La ganancia ΔG tiene como objetivo producir cambios más significativos en los parámetros del controlador cuando el sistema es sometido a determinadas condiciones de operación, de esta manera ΔG solo actúa en algunas reglas o proposiciones tomando valores diferentes de uno. Los conjuntos difusos de salida se presentan en la figuras 6.17, 6.18 y 6.19.

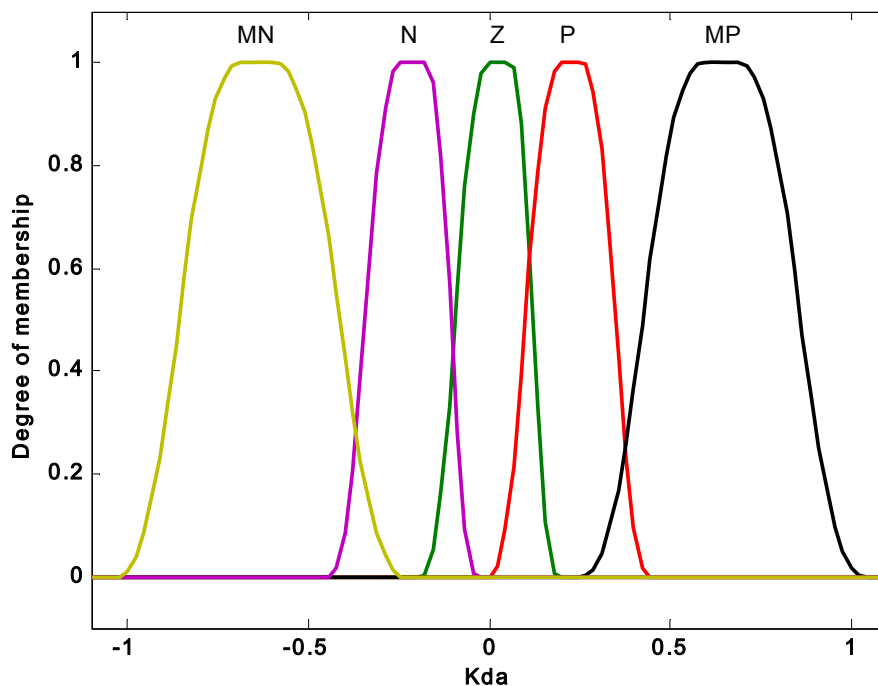


Figura 6.17 Conjuntos difuso de salida ΔK_D
(Fuente: Autor)

Las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de salida de las figuras 6.17, 6.18 y 6.19 son etiquetadas mediante los valores lingüísticos: **Igual[=]**, **zero[Z]**, **positivo[P]**, **muy positivo[MP]**, **bastante positivo [MP]**, **negativo[N]**, **muy negativo [MN]** y **bastante negativo[BN]**. Los dominios para las funciones de pertenencia de estos conjuntos se seleccionan inicialmente utilizando los resultados de la etapa de caracterización del sistema. Posteriormente estos rangos se optimizan conforme se van definiendo y evaluando las proposiciones de la base de reglas en diferentes condiciones de operación del esquema FMRAC.

Para el caso del conjunto difuso que clasifica la salida ΔK_D , se definieron los valores positivos de adaptación, con el objetivo de adaptar especialmente aquellas condiciones de operación donde el sistema real presente tiempos de levantamiento y asentamiento en su respuesta menores a los de la respuesta del sistema deseado. Los valores negativos en el conjunto difuso ΔK_D tendrán la función opuesta a la descrita para los valores positivos. La función de pertenencia etiquetada con el valor lingüístico **Zero[Z]** deberá mantener el valor del parámetro K_D mientras el sistema de lazo cerrado no necesite de una variación de este parámetro en el controlador.

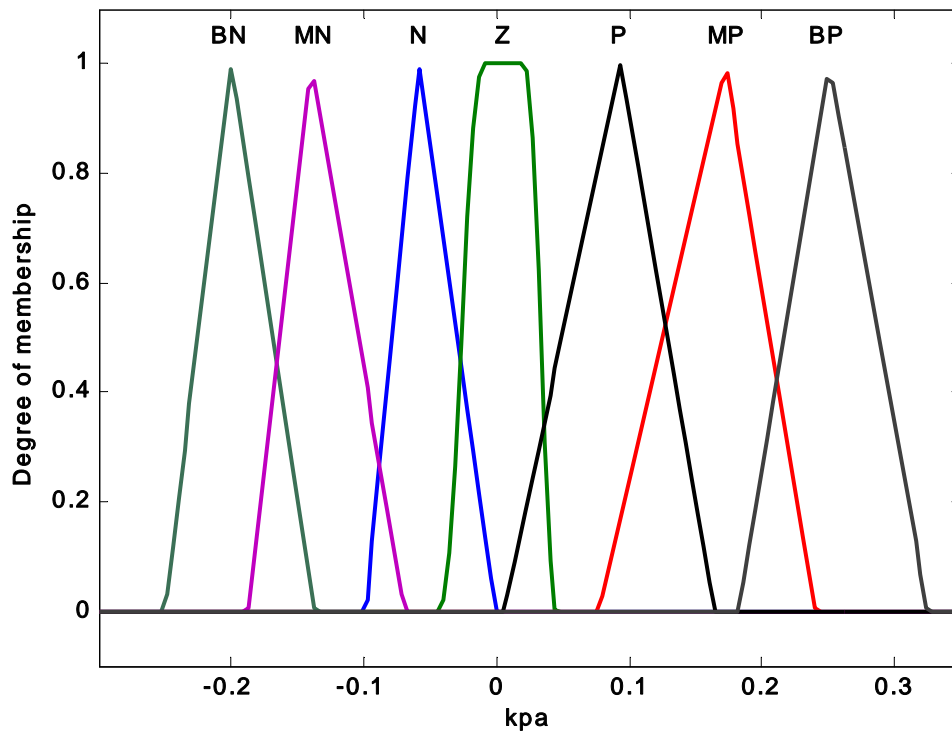


Figura 6.18 Conjuntos difuso de salida ΔK_p
(Fuente: Autor)

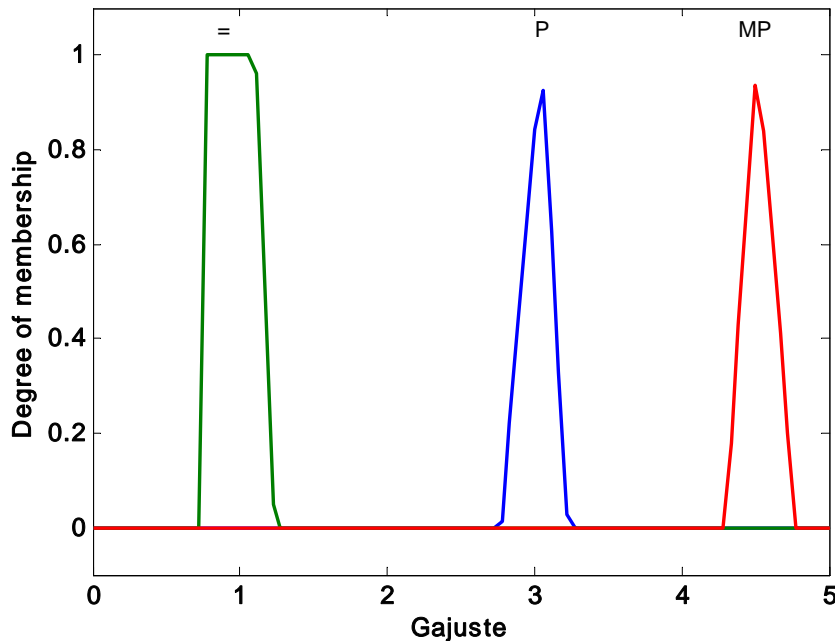


Figura 6.19 Conjuntos difuso de salida ΔG
(Fuente: Autor)

El conjunto difuso de salida ΔK_P es construido con el objetivo de clasificar los valores que permitan adaptar aquellas respuestas del sistema real que presentan valores en su overshoot o error en estado estable menores o mayores que los de la respuesta deseada. Para disminuir el sobrepaso máximo del sistema real será necesario entonces disminuir la magnitud del parámetro K_P que se logra utilizando las funciones de pertenencia que clasifican la salida ΔK_P como negativa. Las clasificaciones positivas se utilizan junto con la salida ΔG en caso que se necesite disminuir el error en estado estable.

6.3.3. Diseño de las proposiciones de la base de reglas.

Como mecanismo de inferencia en el sistema difuso se escogió el sistema Mamdani-Type [1] y [2]. Esquematizado en la figura 6.20.

El sistema difuso de adaptación consta de las siguientes características.

- Operador difuso de la reglas activas, ‘promedio’ (or method [pro1]).
- Método para cuantificar el área activa de la función de membresía (implication method [min]).

- Método de combinación de las funciones de membresía activas (aggregation [max])
- Método para convertir los valores difusos al espacio de salida (defuzzification [centroid]).

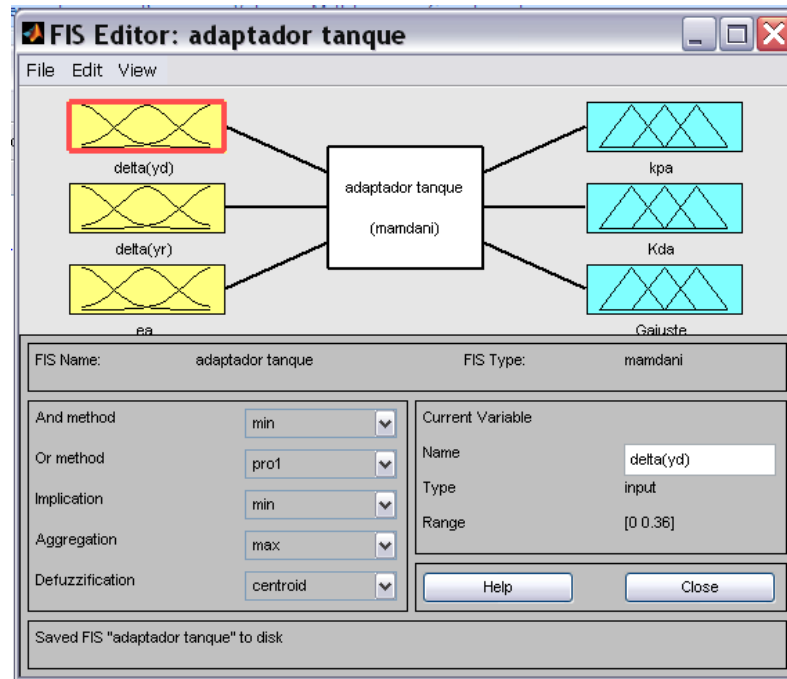


Figura 6.20 Esquema representativo del adaptador difuso (Fuente: Toolbox fuzzy logic - Matlab)

Estas características en el sistema difuso son definidas por el diseñador y por lo tanto son una forma particular de interpretar y dar solución al problema.

Aunque es posible determinar la base de reglas con solo usar la herramienta gráfica de la toolbox fuzzy logic, no es recomendable hacerlo, porque de esta manera no es posible establecer de forma inmediata el desempeño de cada proposición sobre el sistema. Se recomienda implementar todo el esquema FMRAC en Simulink e ir evaluando el desempeño de cada proposición considerada.

En el sistema de pruebas (ver figura 6.21) se destacan los siguientes bloques:

- Un bloque donde se implementa la función de transferencia deseada (modelo de referencia).

- Dos bloques para simular el comportamiento real del proceso, con la diferencia que en uno se hace adaptación mientras que en el otro no, obteniendo así una respuesta adaptada y no adaptada para establecer una diferencia gráfica y numérica.
- Un bloque que calcula el error de adaptación, el valor absoluto de la derivada deseada y el valor absoluto la derivada real del sistema. Información que se utiliza como entrada al sistema difuso de adaptación.
- Un bloque donde se implementa el sistema difuso que adapta los parámetros.
- Un bloque que evalúa capacidad de seguimiento del sistema real adaptado y sin adaptar a través de los índices de desempeño ITAE e IAE.

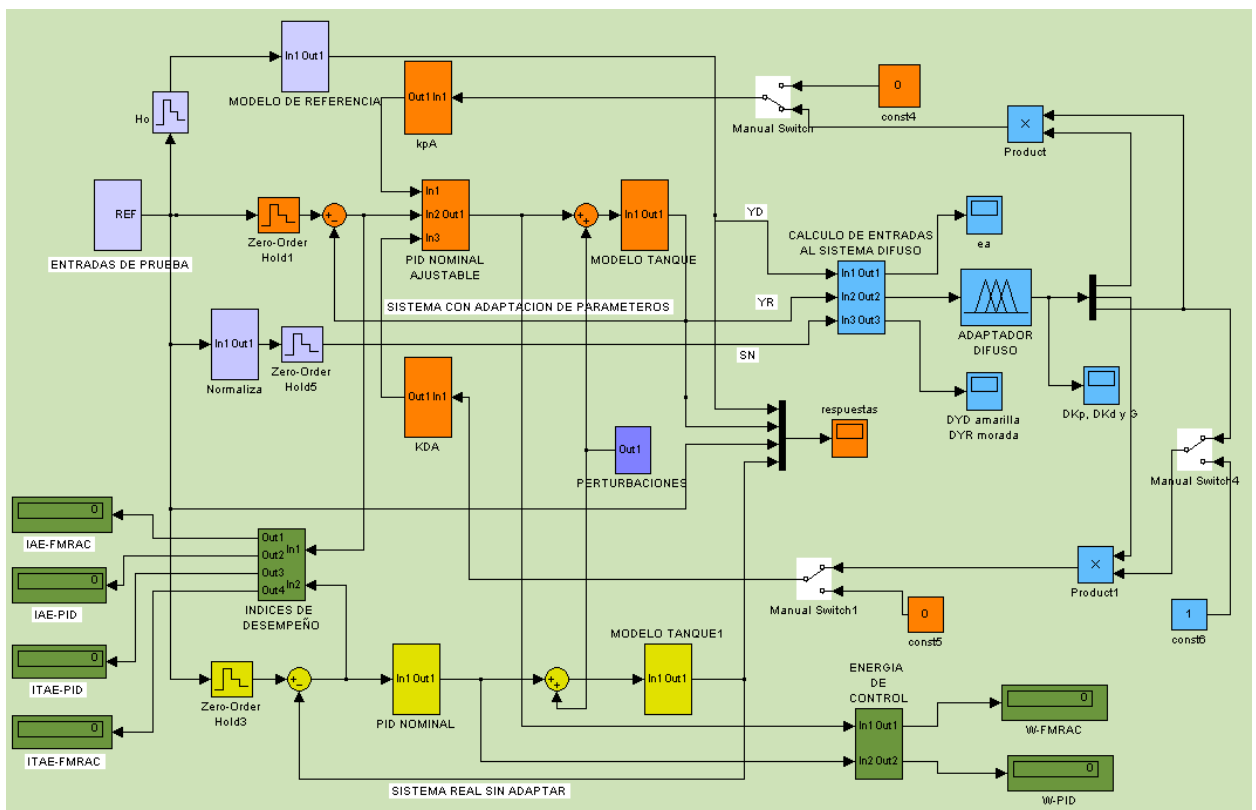


Figura 6.21 Esquema de pruebas para validar el adaptador difuso (Fuente: Autor)

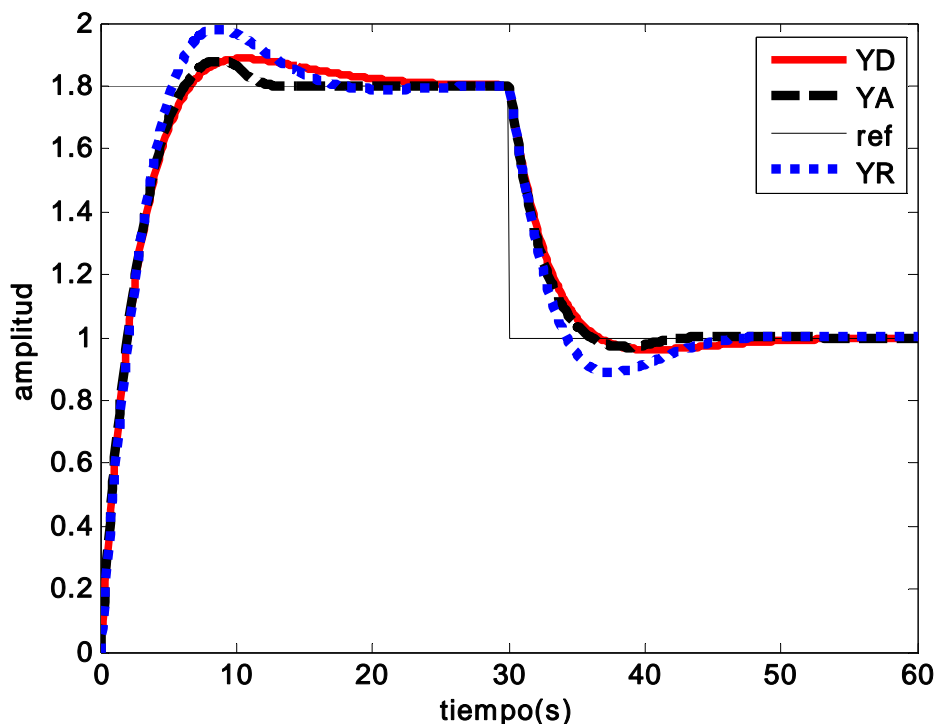
6.6. Análisis del desempeño del sistema de adaptación FMRAC.

A continuación se presentan tres condiciones de operación en las que se destacan:

- Las proposiciones más importantes de la base de reglas
- Los gráficos de las respuestas de los sistemas deseado (YD), con adaptador difuso (YA) y sin adaptador (YR).
- Los índices de desempeño IAE e ITAE y la energía de control en los sistemas adaptados y sin adaptar.

6.6.1. Caso 1.

Teniendo en cuenta las características no lineales del sistema de nivel, expuestas en la sección 6.2, se realizó una adaptación que proporcionó los resultados presentados en la figura 6.22, donde se observa gráficamente el desempeño de los tres sistemas sometidos a variaciones del punto de operación.



**Figura 6.22 Respuestas de los sistemas variando el punto de operación.
(Fuente: Autor)**

Bajo estas características el sistema sin adaptar tiende a responder con un sobrepaso mayor al deseado. Retomando el análisis previo sobre el efecto de variar los parámetros del controlador sobre el sistema (figuras 6.9 y 6.10) se decide adaptar sólo K_P como se muestra en las reglas 4 y 5, teniendo en cuenta que sólo se

modifica considerablemente el sobre paso máximo respecto de la respuesta deseada.

4. If (Δy_d is MP) or (Δy_r is MP) or (ea is N) then (kpa is N)(Kda is =)(Gajuste is =) (1)

5. If (Δy_d is P) or (Δy_r is P) or (ea is N) then (kpa is N)(Kda is =)(Gajuste is =) (1)

Las reglas 1,2 y 3 se utilizan para mantener en el controlador un conjunto de parámetros, que se caracterizaran por su capacidad para clasificar dentro de la función de pertenencia **Zero[Z]**, en un instante o intervalo de tiempo, al error de adaptación. Las respectivas reglas se presentan a continuación.

1. If (Δy_d is Z) or (Δy_r is Z) or (ea is Z) then (kpa is =)(Kda is =)(Gajuste is =) (1)

2. If (Δy_d is P) or (Δy_r is P) or (ea is Z) then (kpa is =)(Kda is =)(Gajuste is =) (1)

3. If (Δy_d is MP) or (Δy_r is MP) or (ea is Z) then (kpa is =)(Kda is =)(Gajuste is =) (1)

6.4.2. Caso 2.

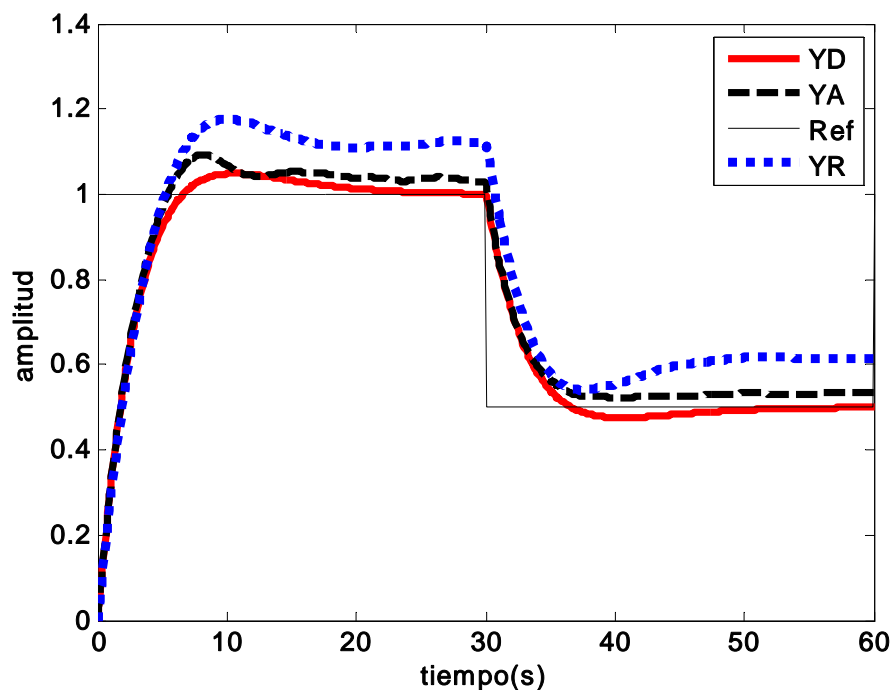


Figura 6.23 Respuestas de los sistemas adaptado y sin adaptar ante una perturbación
(Fuente: Autor)

Los sistemas adaptados y sin adaptar se sometieron a una perturbación de tipo ruido gaussiano, donde es posible visualizar una diferencia más notoria entre las respuesta de los dos sistemas. En la figura 6.23, se observa que la adaptación de parámetros permite una mejora significativa en las prestaciones del sistema. Para este caso el sistema presenta problemas de error en estado estable, razón por la que se estableció actuar sobre el controlador, aumentando el valor de los parámetros k_D y k_P , haciendo mayor énfasis en este último como se establece en las siguientes reglas.

10. If (delta(yd) is Z) or (delta(yr) is Z) or (ea is N) then (kpa is BP)(Kda is =)(Gajuste is MP) (1)

11. If (delta(yd) is Z) or (delta(yr) is Z) or (ea is MN) then (kpa is BP)(Kda is =)(Gajuste is MP) (1)

12. If (delta(yd) is Z) or (delta(yr) is Z) or (ea is P) then (kpa is BP)(Kda is R)(Gajuste is MP) (1)

13. If (delta(yd) is Z) or (delta(yr) is Z) or (ea is MP) then (kpa is BP)(Kda is R)(Gajuste is MP) (1)

Las reglas muestran como estas condiciones de operación demanda del mecanismo de adaptación una acción fuerte sobre los parámetros del controlador, utilizando para este fin la ganancia de ajuste ΔG definida en las ecuaciones 6.8 y 6.9.

6.4.3. Caso 3.

En el tercer caso se simulan los sistemas, adaptado y sin adaptar bajo la peor condición de operación considerada, que consiste en producir de forma simultánea una variación de parámetros, una perturbación y un cambio en el punto de operación del sistema tal como se muestra en la figura 6.24.

Como se observa en la figura 6.24, queda ratificado que de los tres casos estudiados en este capítulo, este último presenta las peores condiciones de seguimiento o los mayores errores de adaptación. Para abordar este problema fue necesario agregar un par de reglas (proposiciones 7 y 8) para contrarrestar la

variación de parámetros en la planta. Efecto que fue simulado en el esquema de pruebas del FMRAC y específicamente en el modelo de la planta mediante una reducción en el orificio de salida del tanque, para simular una obstrucción al flujo de salida de sistema.

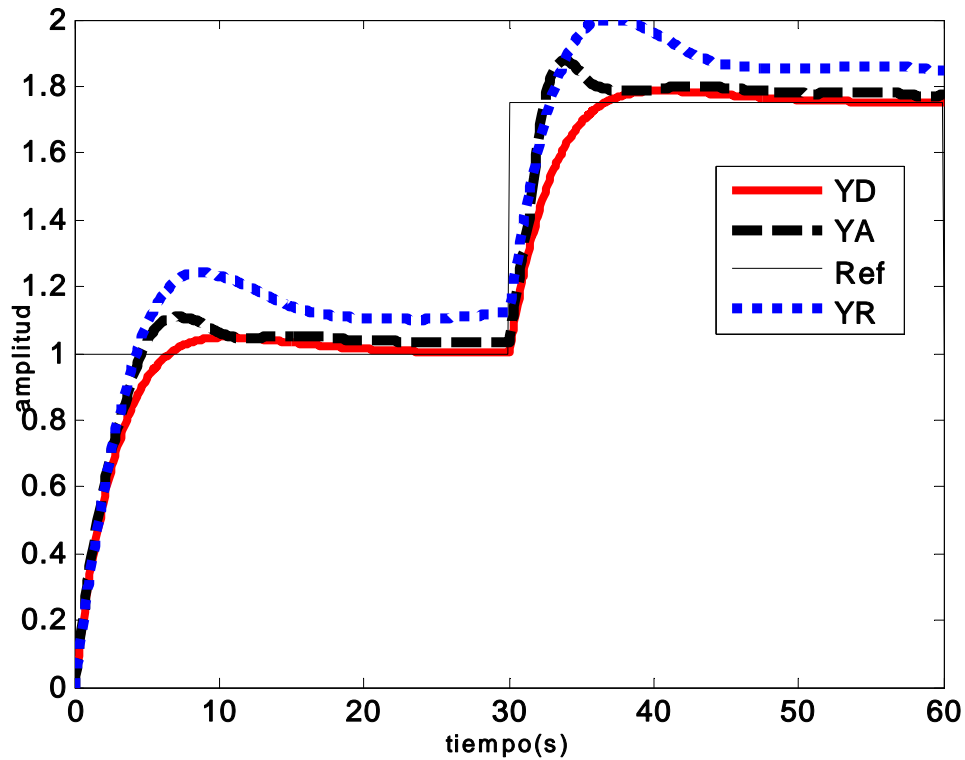


Figura 6.24 Respuesta de los sistemas adaptado y sin adaptar en las condiciones de operación más críticas (Fuente: Autor)

7. If (delta(yd) is P) or (delta(yr) is P) or (ea is MP) then (kpa is BP)(Kda is MR)(Gajuste is =) (1)
8. If (delta(yd) is P) or (delta(yr) is MP) or (ea is P) then (kpa is BP)(Kda is MR)(Gajuste is =) (1)

Finalmente se presenta en la tabla 6.2, los índices de desempeño de los sistemas, adaptado y sin adaptar luego de ser simuladas las tres condiciones de operación presentadas en los casos anteriores.

Los índices de desempeño presentados en la tabla 6.2, ratifican numéricamente los resultados gráficos analizados en los tres casos. De manera concreta se puede deducir que el adaptador mejora considerable las prestaciones del sistema de

control clásico aumentado su capacidad de seguimiento, su rango de operación y manejando de manera eficaz la no linealidad del sistema.

Condiciones de operación	Control FMRAC			Control PID nominal		
	IAE	ITAE	Energía de control	IAE	ITAE	Energía de control
Caso 1.	5.63	59.29	27.36	7.16	93.64	21.76
Caso 2.	5.21	99.22	8.7	9.17	224.4	7.1
Caso 3.	5.13	102.3	11.4	10.22	259.7	8.4

Tabla 6.2 Índices de desempeño etapa de validación

6.5. Análisis de estabilidad

En las secciones 6.2, 6.3 y 6.4 se analizan las respuestas de los sistemas, adaptado y sin adaptar, para diferentes condiciones de operación. Estas caracterizaciones permiten definir el rango de operación del sistema de adaptación FMRAC.

El análisis de estabilidad del esquema FMRAC validado en este trabajo se realiza bajo la premisa de que el rango de operación del sistema estará representado en el plano complejo S por un área que pertenece al semiplano izquierdo. Esta área de operación se describe en la figura 6.26, y se gráfica utilizando los valores extremos de los intervalos de variación definidos para los parámetros del controlador y la planta en la etapa de caracterización del sistema. Con los valores extremos se construyen las funciones de transferencia de lazo abierto y se grafica el lugar geométrico de las raíces de las respectivas regiones.

Para las características del controlador se utilizaron los rangos definidos en las ecuaciones 6.9 y 6.10, obteniéndose la ecuación intervalar 6.11.

$$\left[\underline{G_c(s)}, \overline{G_c(s)} \right] = \left[\underline{K_D}, \overline{K_D} \right] \cdot \left(s + \frac{\left[\underline{K_P}, \overline{K_P} \right]}{\left[\underline{K_D}, \overline{K_D} \right]} \right) \quad (6.11)$$

De la anterior ecuación intervalar se obtienen las funciones de transferencia límites del controlador

$$G_{c1}(s) = K_{DMax} \left(s + \frac{K_{Pmin}}{K_{DMax}} \right) \quad (6.12)$$

$$G_{c2}(s) = K_{Dmin} \left(s + \frac{K_{PMax}}{K_{Dmin}} \right) \quad (6.13)$$

Reemplazando los valores máximos y mínimos en las ecuaciones 6.11 y 6.12

Se obtienen las funciones de transferencia de las ecuaciones 6.14 y 6.15.

$$G_{c1}(s) = 2.5 \cdot (s + 0.04) \quad (6.14)$$

$$G_{c2}(s) = 0.3 \cdot (s + 5.3) \quad (6.15)$$

Para establecer la función de transferencia límite de la planta se utilizaron los intervalos de variación definidos para los parámetros del tanque en la ecuación B.1, del anexo B. El comportamiento más crítico se presenta cuando $a=0.03$ [m²] y $h=1.8$ [m]. Se utiliza la ecuación B.10, del anexo B para expresar la ecuación intervalar de la planta en la ecuación 6.16.

$$G_s(s) = \frac{0.5}{s \cdot (s + [\underline{m}, \overline{m}])} \quad (6.16)$$

De la anterior ecuación intervalar se obtienen las funciones de transferencia límites de la planta descritas en las ecuaciones 6.17 y 6.18.

$$G_{s1}(s) = \frac{0.5}{s \cdot (s + 0.049)} \quad (6.17)$$

$$G_{s1}(s) = \frac{0.5}{s \cdot (s + 0.35)} \quad (6.18)$$

Combinando la ecuación de la planta 6.17 con las ecuaciones 6.14 y 6.15 se obtienen Las graficas a y b de la figura 6.25, que corresponden a los lugares geométricos de las raíces de la funciones de transferencia de lazo abierto del sistema de nivel. La graficas a y b de la figura 6.26, corresponden a los lugares geométricos de la raíces, obtenidos de la combinación de la ecuación 6.18 con las ecuaciones 6.14 y 6.15.

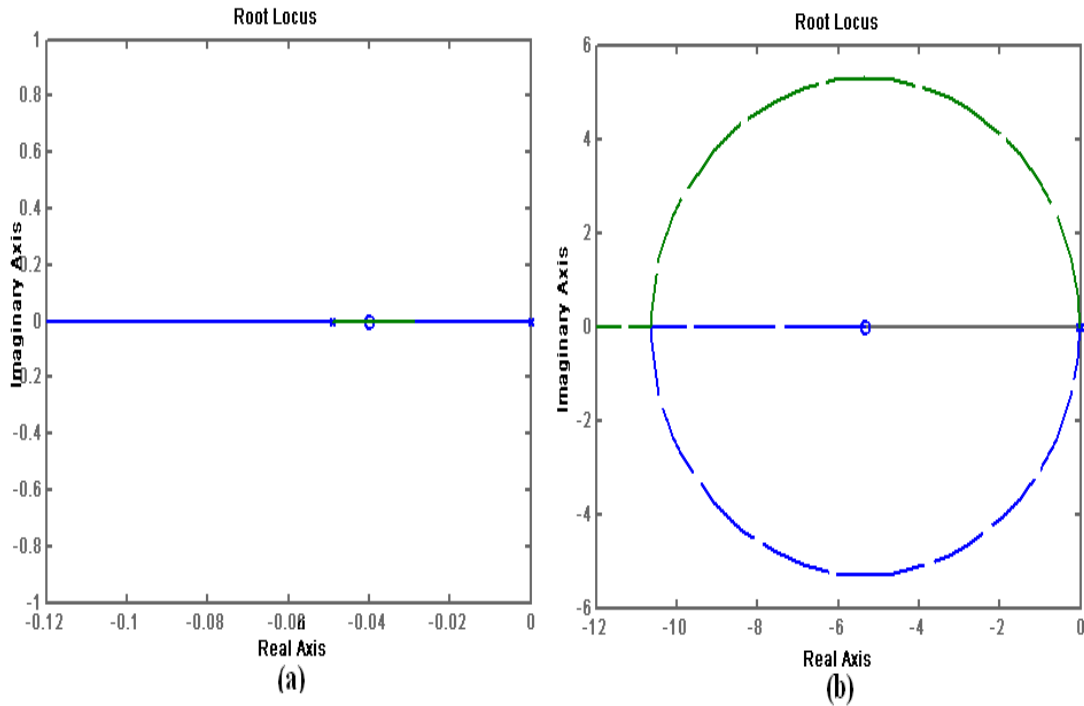


Figura 6.25 combinación 1, para delimitar la región de operación del FMRAC (Fuente: Autor)

En la grafica 6.25 y 6.26 se observa que el área de operación del sistema FMRAC, delimitada por los lugares de las raíces punteado y continuo, pertenecen al semiplano izquierdo del plano complejo s garantizándose de esta manera la estabilidad del sistema FMRAC. El área de operación del esquema FMRAC en el plano complejo s, queda limitada por la graficas, (b) de 6.25 y (a) de 6.26. Esta región se grafica en la figura 6.27, junto con el lugar geométrico de la raíces del sistema operando en condiciones nominales (línea continua).

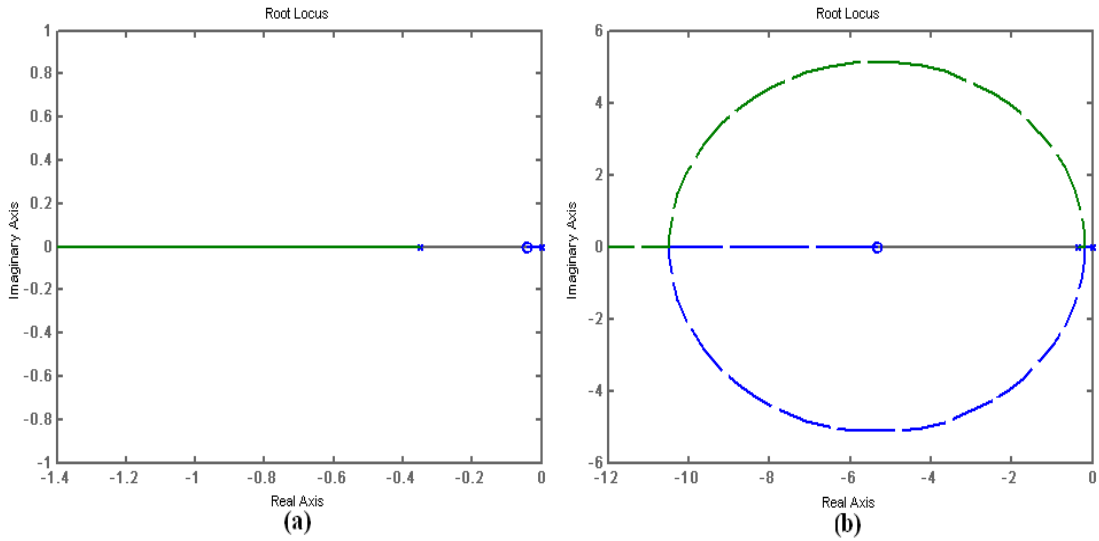


Figura 6.26 Combinación 2, para delimitar la región de operación del FMRAC
(Fuente: Autor)

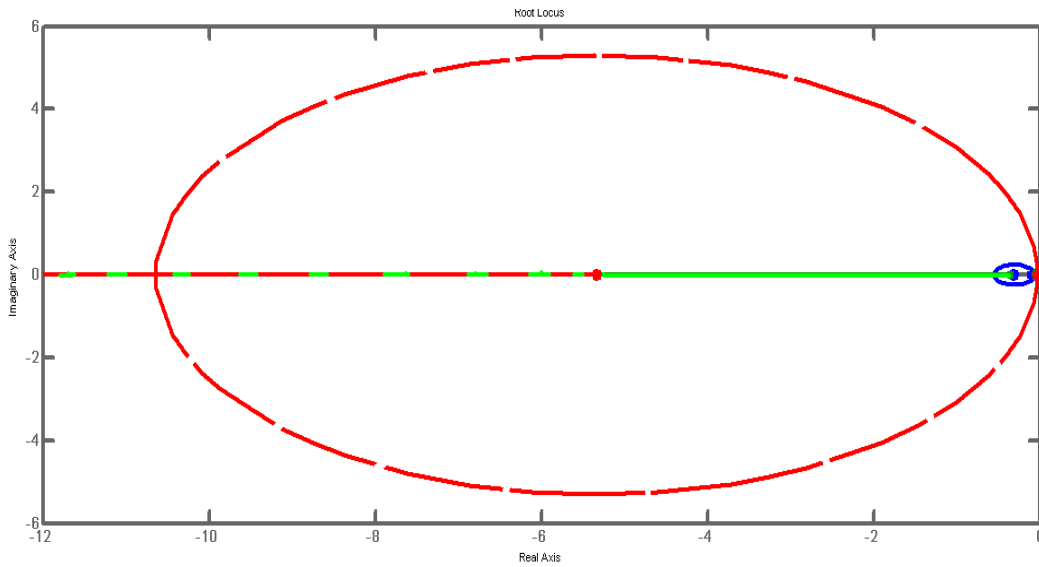


Figura 6.27 región de operación del FMRAC en el lugar de la raíces
(Fuente: Autor)

7. CONCLUSIONES

Los buenos índices de desempeño que se alcanzaron con el esquema de control adaptativo FMRAC aplicado en un proceso que además de presentar características no lineales, es evaluado con variaciones considerables del punto de operación y los parámetros de la planta, permiten establecer que la metodología de diseño planteada como aporte académico en este trabajo presenta un potencial importante en la búsqueda de soluciones para mejorar las características de desempeño y robustez de los sistemas de control de estructura fija. (Metodología desconocida por lo autores en la literatura).

La evaluación de cada proposición de la base de reglas con todo el esquema FMRAC implementado en Simulink conforme se construye el sistema difuso, facilita de forma considerable la comprensión y el diseño del adaptador, teniendo en cuenta que el diseñador enfrenta un grado de incertidumbre considerable para determinar inicialmente los efectos de las proposiciones de la base de reglas sobre el sistema de nivel. Esto se debe a que para la definición de la base de reglas es necesario manejar una cantidad considerable de información heurística además de que el desempeño de estas proposiciones dependa de la forma como se definan la demás etapas del sistema difuso.

Que el adaptador responda eficientemente al solucionar determinados problemas en el sistema no implica que esta solución sea extensiva a todas las demás condiciones de operación, al punto que para ciertas condiciones de operación una base de reglas particular puede carecer de capacidad para adaptar los parámetros del controlador, siendo necesario adicionar nuevas proposiciones o modificar algunas de la ya implementadas si se desea un rango más amplio de operación del adaptador difuso. Estas modificaciones pueden ocasionar pequeñas pérdidas de desempeño en otras condiciones de operación lo que implica que el diseñador deba seleccionar de las diferentes características del adaptador las que mejor desempeño proporcionen al adaptar todas las condiciones de operación consideradas.

El esquema de adaptación FMRAC planteado en este trabajo y aplicado al sistema de nivel presenta características de adaptación de considerable diferencia con el sistema sin adaptar, al punto que para ciertas condiciones de operación se alcanzan diferencias entre el ITAE y el IAE del sistema adaptado y sin adaptar de casi el doble, que en el contexto de la planta se traduce en que se puede evitar desbordes en el nivel de tanque, ahorro considerable de energía en todo el sistema así como un rango de operación para el sistema bastante amplio.

El rango de operación para el que fue diseñado el sistema de control adaptativo FMRAC es sometido a un análisis particular de estabilidad, mediante las representaciones en el lugar geométrico de las raíces, de las condiciones de operación más críticas del rango de operación del FMRAC. Para un análisis general de estabilidad el diseñador debe utilizar un modelo matemático que le permita describir y analizar el comportamiento no lineal de los sistemas de control adaptativo con modelo de referencia y mecanismo de adaptación difusa.

Si bien en este documento se ha venido haciendo hincapié acerca de la carencia de adaptación en el controlador PID, es importante resaltar que este trabajo permitió establecer mediante la validación numérica de diferentes condiciones de operación que el sistema de nivel con controlador PID nominal resulta ser más robusto que con el controlador difuso nominal, debido a que la base de reglas de controlador difuso nominal tiene características más particulares y específicas que limitan su capacidad para responder a rangos distantes de las condiciones nominales, ver anexo C.

Es importante resaltar que no todos los procesos con controladores de estructura fija y de ganancias constantes requieren de una adaptación de parámetros, lo que implica que previo a considerar la aplicación de la estrategia de control FMRAC es necesario realizar un estudio del comportamiento general del sistema frente a sus limitaciones, verificando si se justifica el diseño y la inversión para adicionar e implementar estas técnicas de control.

En este trabajo se contribuye al estudio del esquema de control adaptativo basado en modelo de referencia aplicado en sistemas con controladores de parámetros fijos, planteando una metodología de diseño, que permite establecer los criterios

necesarios para construir un esquema de adaptación FMRAC y en especial el sistema difuso del mecanismo de adaptación de parámetros. La metodología de diseño se caracteriza por la aplicación de fundamentos básicos de la teoría de control clásico como lo son el análisis de la respuesta al escalón en el tiempo y las representaciones del comportamiento del sistema en el lugar geométrico de las raíces.

En la validación numérica se observa que el adaptador difuso puede alcanzar correcciones importantes, haciendo que el sistema siga a la respuesta deseada con un error de adaptación reducido luego que el sistema de nivel es sometido a variaciones considerables en los parámetros de la planta, perturbaciones y cambios en el punto de operación del sistema. Queda por ratificar hacia el futuro, el potencial que puede representar la aplicación de esta técnica en procesos reales implementados en el laboratorio o a nivel industrial.

La construcción de un sistema difuso depende de muchos factores subjetivos, por lo tanto es de esperarse que existan múltiples diseños con características similares que pueden adaptar el controlador del mismo proceso, dejando el desempeño final del sistema en manos del conocimiento y las habilidades del diseñador. De esta manera un planteamiento hacia el futuro puede ser el estudio e implementación mediante algoritmos genéticos de una metodología que permita optimizar el cálculo de la base de reglas, buscando reducir esta subjetividad.

8. BIBLIOGRAFÍA

Libros y folletos

- [1] **MENDEL, Jerry M.** Uncertain Rule-Based Fuzzy logic system. Editorial Prentice Hall 2001
- [2] **PASSINO, K. M. and YURKOVICH, S.** "Fuzzy control", Addison Wesley Longman Inc., 1998.
- [3] **Katsuhiko Ogata.** Sistemas de control en tiempo discreto, Segunda edición, Editorial Pearson Education, 2003.
- [4] **RODRÍGUEZ RUBIO, Francisco y LÓPEZ SÁNCHEZ, Manuel Jesús.** Control adaptativo y robusto, Universidad de Sevilla 1996.
- [5] **KUO, Benjamin C.** Sistemas de control automático, séptima edición, Editorial Prentice hall hispanoamericana, S.A, México 1996

Trabajos de grado

- [6] **ARIAS DAVILA, José y DE ORO GENES, Michel.** *Simulación de un control adaptativo con modelo de referencia para el proceso de neutralización de Ph en un tanque reactor de mezclado continuo.* Bucaramanga Colombia, 2005. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-mecánicas.
- [7] **MARÍN, Edgar Augusto y ORTIZ, Oscar Javier.** *Control mediante Lógica fuzzy de un péndulo invertido,* Bucaramanga Colombia, 2003. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-mecánicas
- [8] **CALDERÓN NEPAMUCENO, Dora María.** *Control difuso adaptable de un servomecanismo no lineal.* Mexico D.F. Noviembre de 2003. Ph.D Tesis. Centro de investigación y estudios avanzado del IPN departamento de control automatico,
- [9] **RAMÍREZ MORENO, Gerson y CASTELLANOS LAMUS, Alonso.** *Desarrollo de una herramienta de diseño automático de reguladores LQG para turbinas eólicas de velocidad variable.* Bucaramanga Colombia, 2008. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-mecánicas.

- [10] **GRANDE MEZA, Araceli.** *Observadores difusos y control adaptable difuso basado en observadores. México D.F., octubre del 2003. Tesis de maestría. Centro de investigación y estudios avanzados del instituto politécnico nacional, departamento de control automático.*
- [11] **GÓMEZ SALAS, Fernando.** *Sistemas difusos jerárquicos para modelado y control. México D.F., octubre del 2005. Tesis de maestría. Centro de investigación y estudios avanzados del instituto politécnico nacional, departamento de control automático.*

Artículos de publicaciones seriadas

- [12] **K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li.** "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol.13, no. 4, pp. 559-576, July 2005.
- [13] **S. E. Oltean, M. Abrudean, A. Gligor.** MRAC and FMRLC for a plant with time Varying parameters, 1-4244-0361-8/06 2006- IEEE
- [14] **Mohamed Kadjoudj, Nouredine Golea, Mohamed El Hachemi Benbouzid.** Fuzzy rule – Based Model Reference Adaptive Control for PMSM Drives, *Serbian journal of electrical engineering*, Vol. 4, No. 1, June 2007, 13-22.
- [15] **ALVES DE SILVA, Maurício; A.C, Fernando y AMARAL WAGNER, C.** A rule based procedure for selftuning PID controller, proceedings of the 27th conference on decision and control Autin, texas a December IEEE 1988.
- [16] **K. Pirabakaran and V. M. Becerra.** "Automatic tuning of PID controllers using model reference adaptive control techniques," *Proceedings of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 736-740, Nov 2001.
- [17] **Ai Xiong and Yongkun Fan.** Application of a PID Controller using MRAC Techniques for Control of the DC Electromotor Drive Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 5 - 8, 2007, Harbin, China
- [18] **Takeshi Okayasu, Toshinobu Matsuoka and Yoshihisa Ishida.** Model Reference I-PD Controller Using Fuzzy Reasoning, *Department of Electronics and Communication, Meiji University I - I - I , Higashi-mita, Tam-ku, Kawasaki, 214 Japan, IEE-1994*
- [19] **Jeffery R. Layne and Kevin M. Passino.** Fuzzy model reference learning control for cargo ship steering, December IEEE 1993
- [20] **S. Bogdan¹, Z. Kovačić¹, D. Krapinec².** Sensitivity-based Self-learning Fuzzy Logic Controller as a PLC Super Block, University of Zagreb, Faculty of EE&C, Dept. of Control and Computer Engineering, Zagreb, Croatia² Končar

d.d, Zagreb, Croatia, proceeding of the 15th Mediterranean conference on control and automation, July 27 -29 2007, Athena Greece.

Documentos electrónicos

- [21] **RODRÍGUEZ HERRERO, Agustín; GROBA, Ángel M. y HERRANZ, José Ángel** Laboratorio virtual de aprendizaje de control fuzzy adaptativo, Universidad Politécnica de Madrid, Disponible en Internet www.sec.upm.es/agustin/fmrlc/LVF_adaptativo.pdf, consultado septiembre 19 de 2007.
- [22] **GUTIÉRREZ CARVAJAL, Ricardo Enrique y CASTILLO ESTEPA, Ricardo Andrés.** Control de manipuladores Teleoperador. Disponible en Internet, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol 16 , 1 agosto2006. www.umng.gov.co/www/resources/rev16.1%20art03.pdf, consultado 5 noviembre de 2007.
- [23] **ORDOÑEZ, Raúl; SPOONER, Jeffrey T y Kevin M Passino.** Experiments and comparative analyses in adaptive fuzzy control. Disponible en internet homepages.udayton.edu/~ordonere/papers/afcpaperISIC96.pdf., Consultado 5 de agosto de 2008.
- [24] **Didier Giraldo B. e Iván Tabares G.** Teoría de control. Disponible en internet. ohm.utp.edu.co/~egiraldos/Didier%20Giraldo%20%20Teoria%20Control.pdf-, Consultado 10 de agosto 2008.
- [25] **Jeffrey R, Layne, Kevin M Passino.** Fuzzy Model Reference Learning Control. Disponible en internet www.ece.osu.edu/~passino/PapersToPost/FMRLC-IFS.pdf., Consultado 10 de agosto de 2008.
- [26] **M. R. Chekkouri; J. L. Romeral.** Clasificación de los reguladores adaptativos, Departament d'Enginyeria Electrònica. Universitat Politècnica de Catalunya, <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3342324>, Consultado 20 de agosto 2008.
- [27] **Ricardo J. Alonso.** Análisis comparativo en condiciones controladas de un controlador PID adaptativo con lógica difusa y un controlador PID clásico. Universidad Tecnológica del centro. www.geocities.com/rjac_repository/Analisis_control_fuzzy.pdf, Consultado 20 de agosto de 2008
- [28] **DAGA'S, Leonardo.** Communication and strings blockset, Consultada <http://leonardodaga.insyde.it/download/COMMSTRBlockset.pdf>, Noviembre 1 del 2008.

9. ANEXOS

Anexo A: Ejemplo de aplicación de la metodología de diseño de un esquema de adaptación FMRAC.

En este ejemplo se presenta el desarrollo metodológico planteado en el capítulo 5, aplicado a la construcción de un adaptador difuso. Se selecciona el sistema descrito en la tabla A.1 para construir y validar el esquema de adaptación FMRAC.

Parámetro	Planta			Controlador	
Ceros	$Z_{g1} = -8$			$Z_1 = -0.5$	$Z_2 = -55.9$
Ganancia	$K = 1$			$K_c = 3.59$	
Polos	$P_{g1} = -3$	$P_{g2} = -6$	$P_{g3} = -10$	$P_1 = 0$	

Tabla A.1 Parámetros de la planta y el controlador

Las funciones de transferencia de la planta y el controlador se describen en las ecuaciones A.1 y A.2, respectivamente.

$$G(s) = \frac{1 \cdot (s + 8)}{(s + 3)(s + 6)(s + 10)} \quad (A.1)$$

$$G_c(s) = \frac{3,59 \cdot (s + 0.5)(s + 55.9)}{s} \quad (A.2)$$

A.1 Modelo de referencia para el sistema LTI SISO

El comportamiento dinámico deseado del bloque de referencia se modela como la respuesta de un sistema de segundo orden sub-amortiguado con las características descritas en la figura A.1

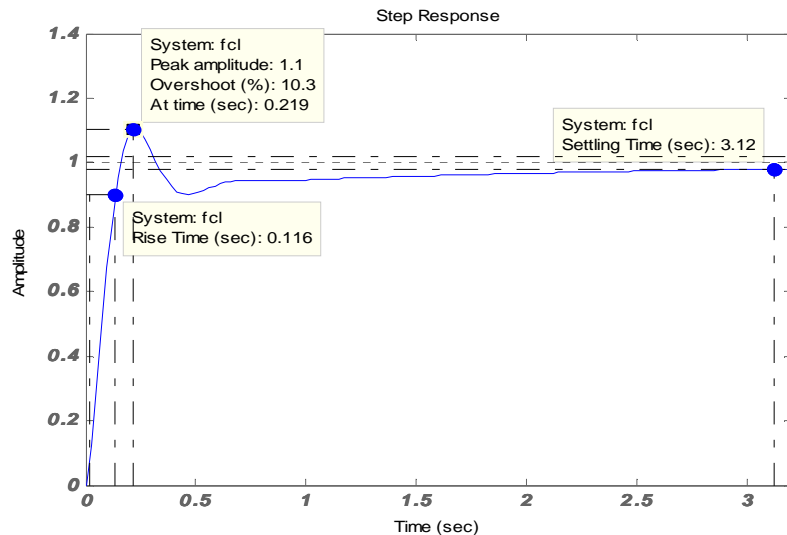


Figura A.1 Respuestas al escalón deseada

A.2 Caracterización del sistema de lazo cerrado.

Previo a la elección de las funciones de membresía y la base de reglas, se realiza una variación en los parámetros de la planta K , Z_{g1} y P_{g1} y se hace un análisis gráfico de de la respuesta al escalón y su derivada en el sistema de lazo cerrado. Esto tiene como objetivo simular el comportamiento del sistema ante una incertidumbre paramétrica en la planta del proceso. Los intervalos de variación de los parámetros presentados en la ecuación A.3, son definidos alrededor de los valores nominales de la planta, presentados en la tabla A.1.

$$\begin{aligned}
 K &\in [0.2 < K < 5] \\
 Z_{g1} &\in [2 < Z_{g1} < 24] \\
 P_{g1} &\in [1 < P_{g1} < 6]
 \end{aligned}
 \tag{A.3}$$

Como se observa en las figura A.2, la variación de la ganancia K de la planta afecta principalmente el sobrepaso de la respuesta al escalón y el tiempo de levantamiento.

Las figuras A.3, corresponden al comportamiento dinámico del proceso conforme se varía el cero de la planta y muestra como las magnitudes en las derivadas de la

respuesta al escalón para el intervalo de variación de Z_{g1} son menores que para el caso donde se varía K , aunque el comportamiento dinámico tiene una tendencia mayor a la inestabilidad conforme aumenta Z_{g1} .

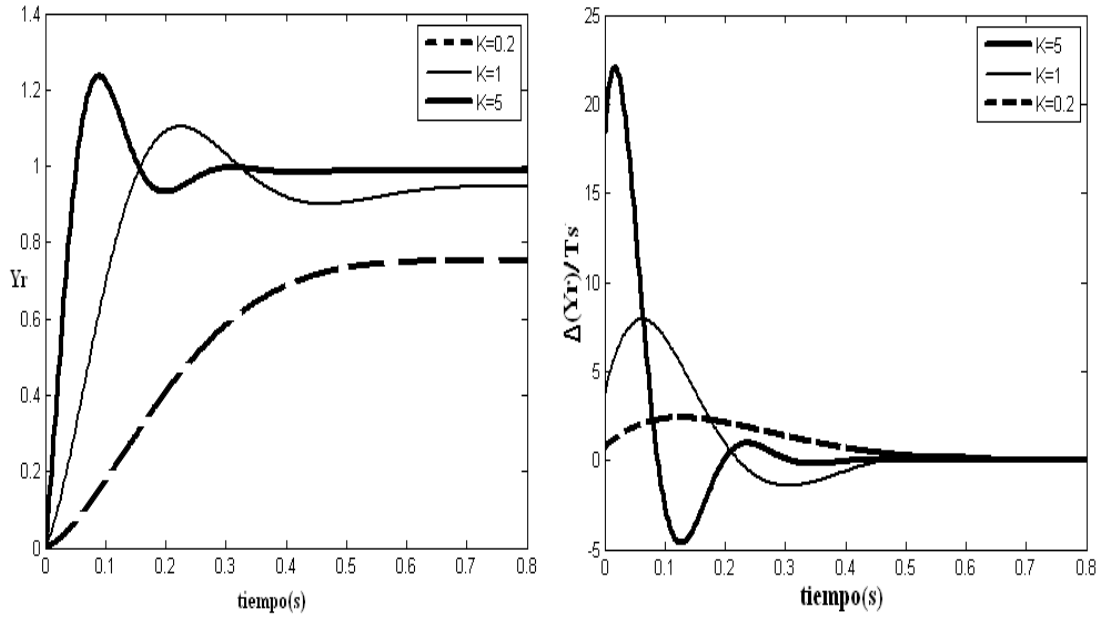


Figura A.2 Respuestas al escalón y su derivada ante la variación de K

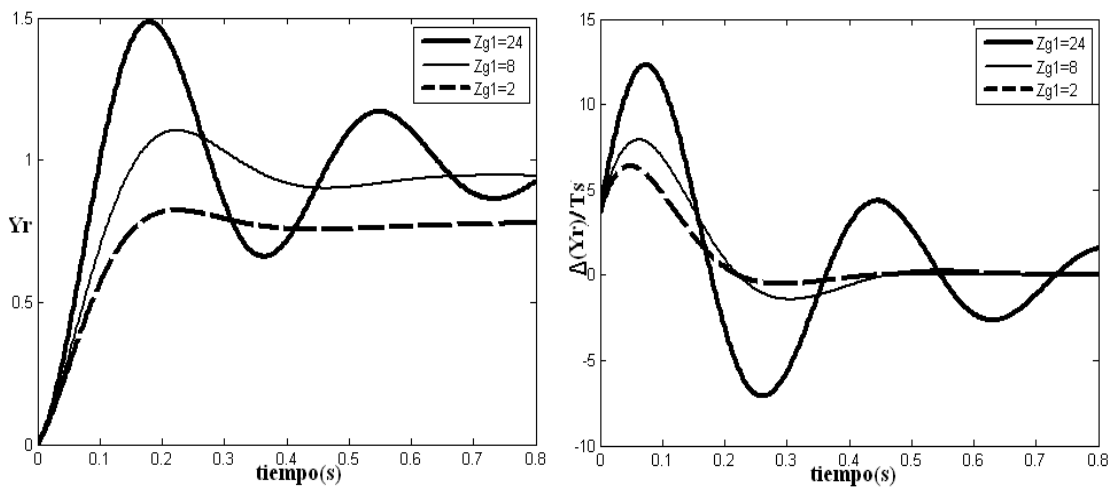


Figura A.3 Respuestas al escalón y su derivada variando Z_{g1}

La figura A.4, muestra como la variación de polo P_{g1} en el intervalo definido, es la que menos afecta la dinámica del sistema en comparación con las variaciones previas. Cabe resaltar que la relación de variación entre P_{g1} y la respuesta al escalón es inversa. De esta manera conforme aumenta el valor del polo la respuesta al escalón se hace más lenta y viceversa, contrario a lo que pasa en el caso de K y Z_{g1} donde la relación de variación es directa.

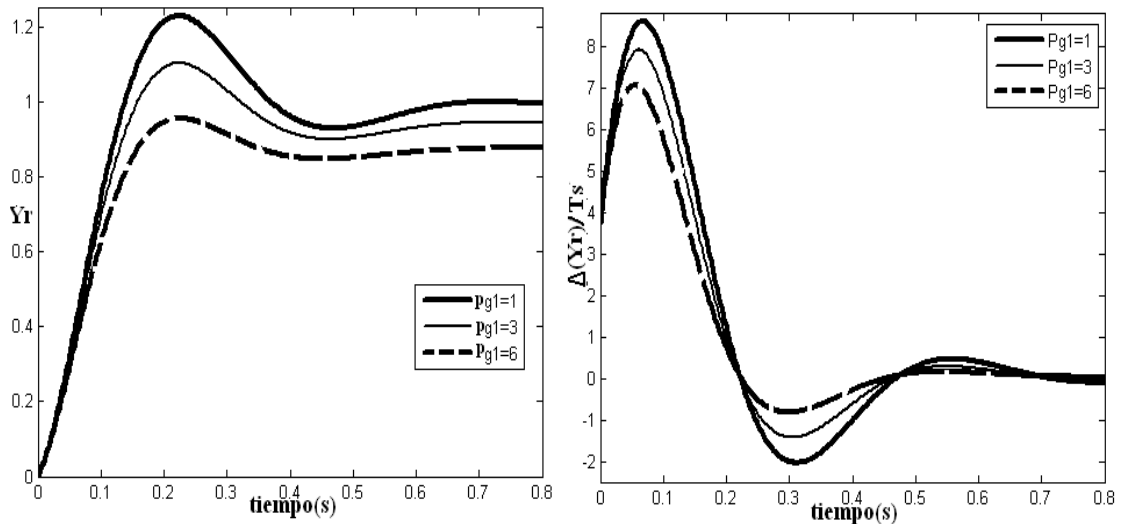


Figura A.4 Respuesta al escalón y su derivada variando P_{g1}

A.3 Diseño del adaptador difuso.

En la presente sección se determinan la característica del sistema difuso de adaptación, utilizando como mecanismo de inferencia el sistema Mamdani [1] y [2].

A.3.1 Diseño de los conjuntos difusos de entrada y salida.

Se toma la respuesta deseada y se delimita por regiones como se muestra en figura A.5, Las líneas horizontales y verticales delimitan las regiones de la respuesta al escalón y el valor absoluto de su derivada respectivamente. El conjunto difuso que representa el valor absoluto de la derivada de la respuesta al escalón $|\Delta Y_D/\Delta t|$, queda determinado por las funciones de membresía etiquetadas con los siguientes nombres: **zero[Z]**; **positivo[P]** y **muy positivo[MP]**. La correspondencia temporal se puede observar en la figura A.5, donde **MP** ocurre en el intervalo $0 < t < t_1$, **P**

ocurre en el intervalo $t_1 < t < t_2$ y **Z** en $t > t_2$. El conjunto difuso de entrada $|\Delta Y_D/\Delta t|$ se presenta en la figura A.6.

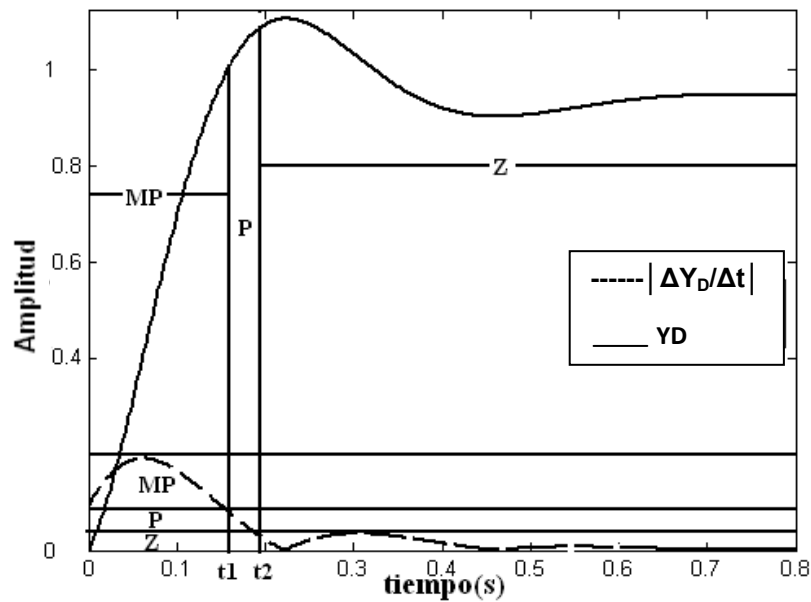


Figura A.5 Clasificación difusa de la derivada de la respuesta deseada

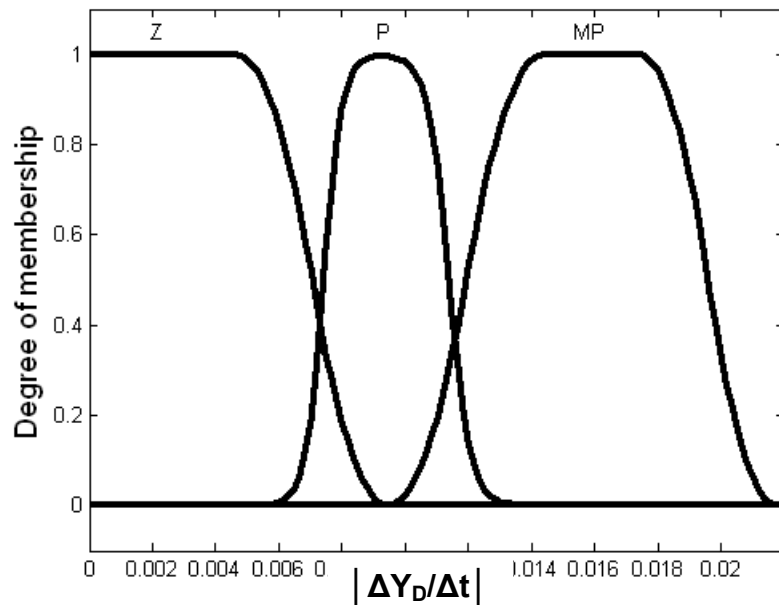


Figura A.6 Conjunto difuso de entrada $|\Delta Y_D/\Delta t|$

Para la construcción de las funciones de membresía del conjunto difuso de entrada $|\Delta Y_R/\Delta t|$ y e_a , se toma la máxima variación de las derivadas de la respuesta al escalón que se obtiene al variar la ganancia K de la planta. Específicamente en $K=5$ como se muestra a continuación en la figura A.7, donde se grafica la respuesta la

escalón real y el valor absoluto de su derivada delimitando las regiones de esta última.

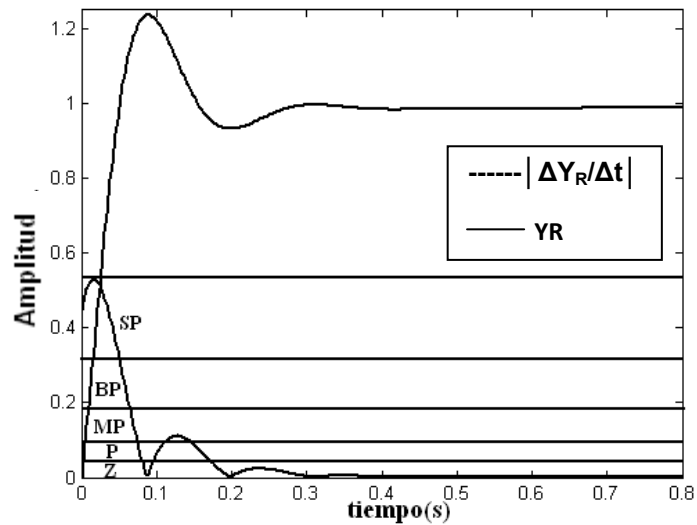


Figura A.7 Clasificación difusa de la derivada de la salida real

De esta manera se obtiene el conjunto difuso de entrada $|\Delta Y_R/\Delta t|$, con las funciones de membresía etiquetadas con los nombres **zero[Z]**, **positivo[P]**, **muy positivo[MP]**, **bastante positivo[BP]** y **súper positivo[SP]**, tal como se muestra en la figura A.8.

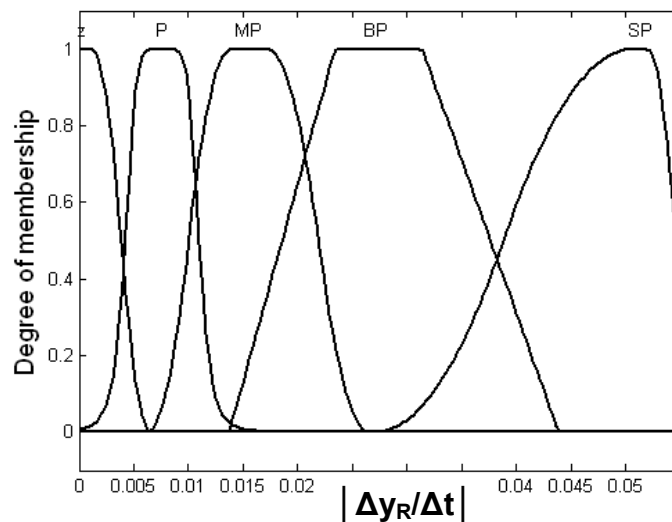


Figura A.8 Conjunto difuso de entrada $|\Delta y_R/\Delta t|$

El tercer conjunto difuso de entrada lo conforma el error de adaptación e_a , que es limitado tomando el máximo y mínimo error de adaptación, obtenidos de la diferencia existente entre las repuestas al escalón para $(K=1 \text{ y } K=5)_{MAX}$ y para $(K=0.2 \text{ y } K=1)_{min}$

respectivamente ver figura A.9 Las funciones de membresía quedan determinadas y etiquetadas con los nombres **muy negativo[MN]** **negativo[N]** **zero[Z]**, **positivo[P]**, **muy positivo[MP]** (ver figura A10).

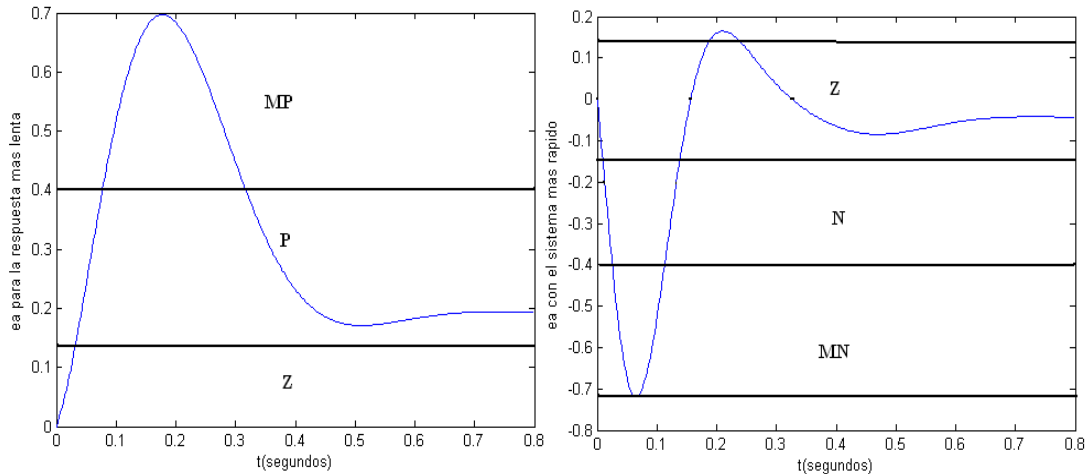


Figura A.9 Clasificación difusa del error de adaptación e_a

Tomando como referencia los parámetros del controlador PID descritos en la tabla A.1 se selecciona Z_1 , Z_2 y K_c como los parámetros a adaptar de forma directa, de manera que los parámetros k_p , k_i y K_d quedan relacionados mediante la ecuación A.4. En este ejemplo se escogió adaptar directamente (Z_1 , Z_2 y K_c), puesto que permite una mejor comprensión entre lo que pasa en el tiempo y su representación en el lugar de las raíces.

$$K_d = K_c$$

$$K_p = (Z_1 + Z_2) \cdot K_c$$

$$K_i = (Z_1 \cdot Z_2) \cdot K_c$$

(A.4)

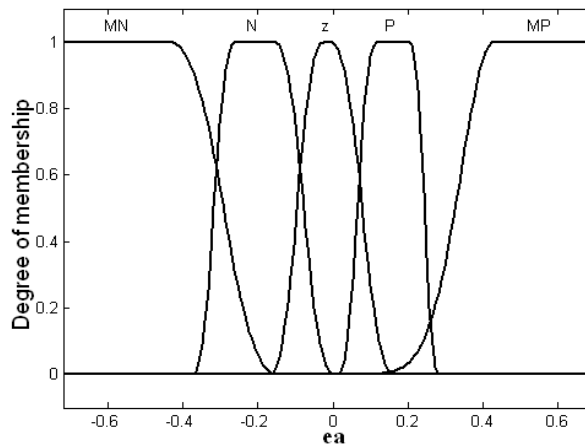


Figura A.10 Conjunto difuso de entrada e_a

El universo de discurso de los conjuntos de salida se limita analizando las máximas y mínimas variaciones de (Z_g , P_{g1} y K), luego se encuentra mediante la representación en el tiempo y el lugar geométrico de las raíces el intervalo de variación para las tres salidas del sistema difuso (ΔZ_1 , ΔZ_2 y ΔK_c). Los valores instantáneos de los parámetros del controlador de la planta real se calculan mediante las expresiones descritas en la ecuación A.5.

$$\begin{aligned} K_{cn} &= K_c \cdot \Delta K_c \\ Z_{1n} &= Z_1 + \Delta Z_1 \\ Z_{2n} &= Z_2 + \Delta Z_2 \end{aligned} \tag{A.5}$$

Donde Z_{1n} , Z_{2n} y K_{cn} representan los valores adaptados.

Es importante mencionar que las variaciones de K se pueden compensar con solo adaptar la constante del controlador K_c , en tanto que para las variaciones de Z_g y P_g puede ser necesario variar o adaptar los tres parámetros del controlador. Las gráficas de los conjuntos difusos de salida se presentan en las figuras A.11, A12 y A13.

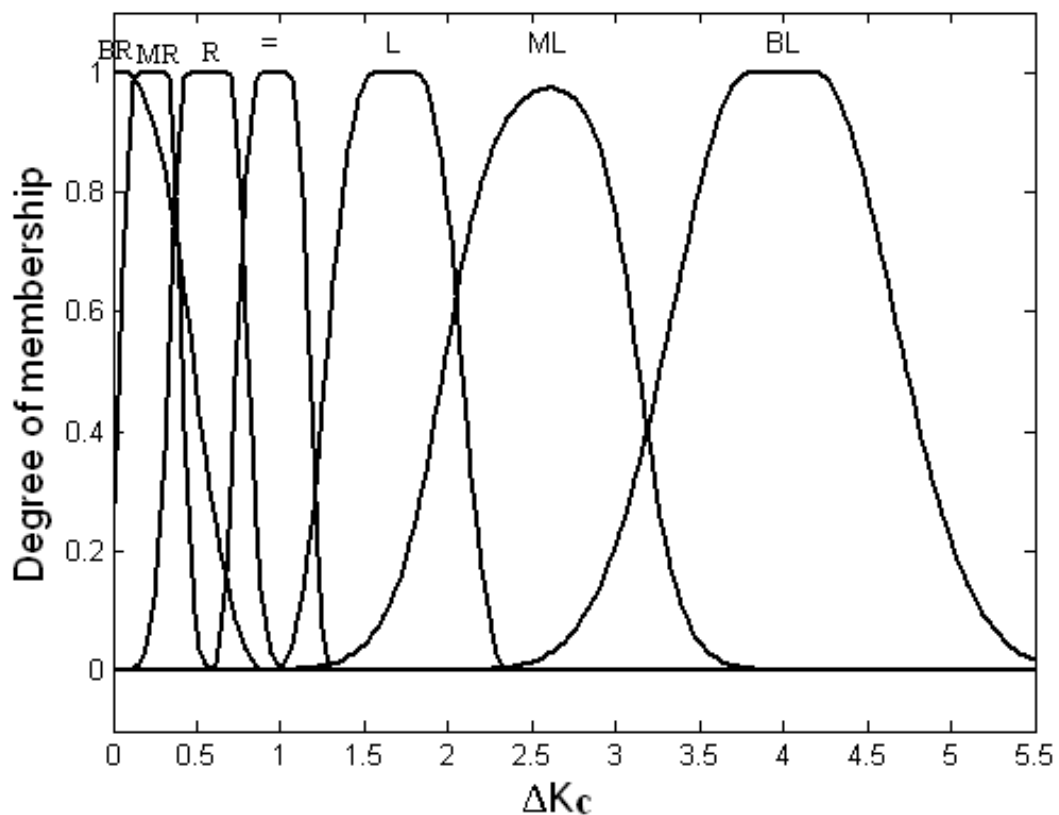


Figura A.11 Conjunto difuso de salida ΔK_c

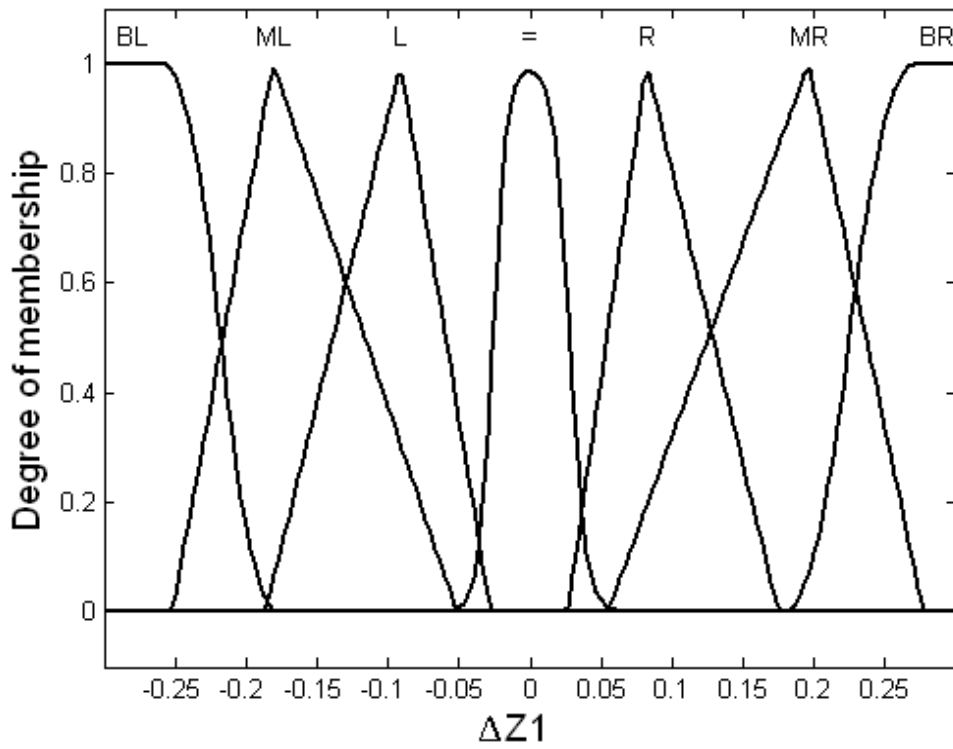


Figura A.12 Conjunto difuso de salida ΔZ_1

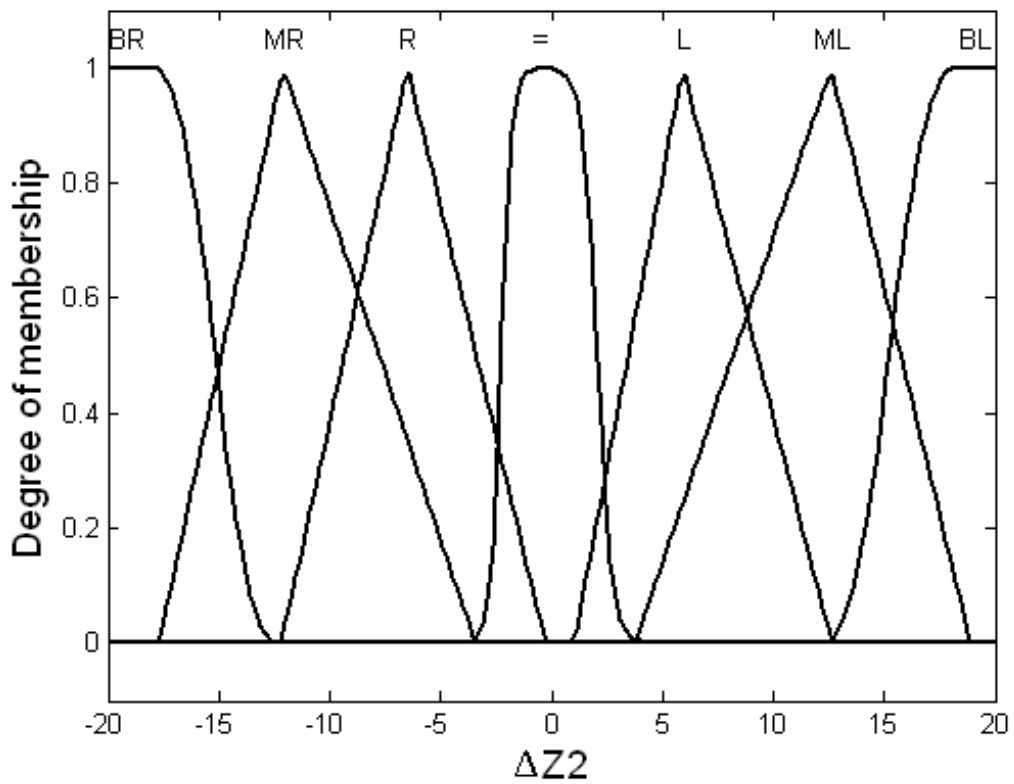


Figura A.13 Conjunto difuso de salida ΔZ_2

A continuación se presentan Los conjuntos difusos de salida etiquetados con los nombres: **bastante lento [BL]**, **muy Lento [ML]**, **lento [L]**, **igual [=]**, **rápido [R]**, **muy rápido y bastante rápido [BR]** y algunas de las proposiciones de la base de reglas.

1. ***If (delta(y_r) is Z) or (delta(y_m) is Z) or (e_a is Z) then (K_d is =)(Z₁ is =)(Z₂ is =) (1)***
2. ***If (delta(y_r) is MP) or (delta(y_m) is MP) or (e_a is Z) then (K_d is =)(Z₁ is =)(Z₂ is =) (1)***
3. ***If (delta(y_r) is MP) or (delta(y_m) is SP) or (e_a is Z) then (K_d is BR)(Z₁ is =)(Z₂ is =) (1)***
4. ***If (delta(y_r) is P) or (delta(y_m) is MP) or (e_a is MP) then (K_d is BL)(Z₁ is =)(Z₂ is =) (1)***
5. ***If (delta(y_r) is P) or (delta(y_m) is MP) or (e_a is Z) then (K_d is BR)(Z₁ is BR)(Z₂ is BR) (1)***
6. ***If (delta(y_r) is Z) or (delta(y_m) is Z) or (e_a is MP) then (K_d is BL)(Z₁ is BL)(Z₂ is BL) (1)***

La reglas 1 y 2 sirven para mantener los parámetros nominales del controlador en caso de que el sistema no requiera adaptar sus parámetros puesto que el sistema real está dentro de los valores deseados. La reglas 3 y 4 básicamente se activan cuando se detectan grandes variaciones en la derivada de la respuesta real. Las reglas 5 y 6 se activan ante variaciones significativas en el cero de la planta.

A.4 Validación numérica del esquema FMRAC.

Para la implementación numérica del adaptador difuso se utilizó la *Toolbox Fuzzy Logic* de MATLAB. La variación de parámetros de la planta, la evaluación de la base de reglas y finalmente la validación numérica de todo el sistema se realizó mediante la simulación en Matlab-Simulink del esquema del FMRAC.

La figura A.14, muestra el diagrama de bloques del FMRAC implementado en Simulink.

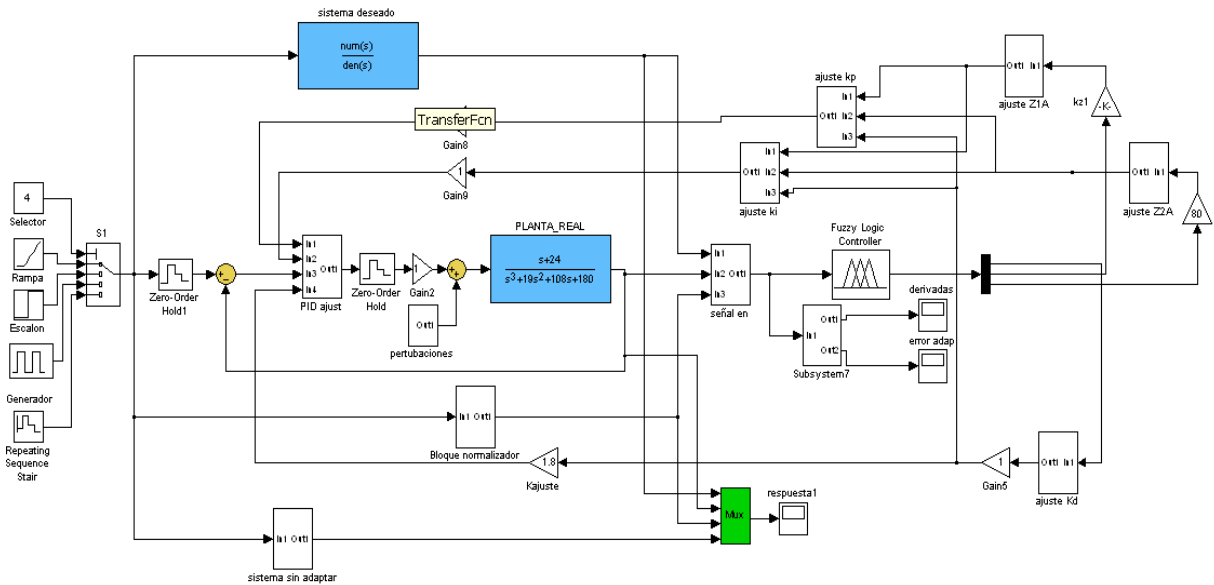


Figura A.14 Implementación en Simulink del FMRAC

A continuación se presentan los resultados gráficos, obtenidos para un sistema en dos condiciones de operación diferentes.

A.4.1 Caso 1.

En la figura A.15, se presenta la respuesta deseada Y_D , la respuesta la respuesta adaptada Y_A y respuesta sin adaptar Y_R , bajo condiciones de variación de parámetros de la planta y una perturbación entre el controlador y la planta.

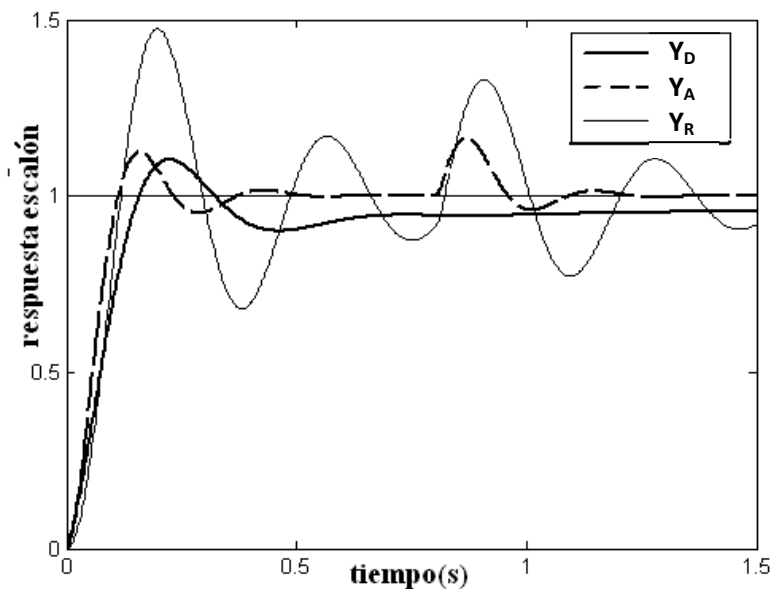


Figura A.15 Respuesta del adaptador

A.4.2. Caso 2.

En la figura A.16, se compara la respuesta deseada con la respuesta sin adaptar y adaptada respectivamente en un sistema sometido a variaciones del punto de operación y variación en lo parámetro de la planta.

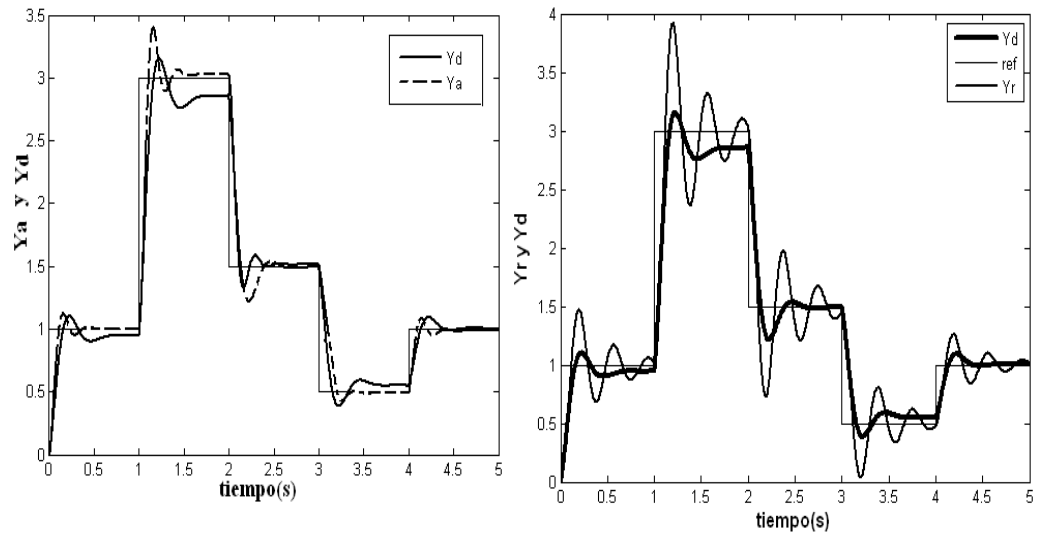


Figura A.16 Respuesta sin adaptar y adaptada ante variación del punto de operación

Anexo B: modelo lineal de la plata del sistema de nivel

Para simular el esquema de control FMRAC se necesita establecer un modelo lineal del sistema nivel para determinar los parámetros del controlador PID nominal. Este modelo se obtiene linealizando el comportamiento de la planta alrededor de un punto de operación.

La expresión que describe el flujo dentro del tanque se define mediante la ecuación B.1. El término no lineal de esta ecuación representa el comportamiento dinámico del fluido que pasa la válvula de salida.

$$q_o = c_d \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (B.1)$$
$$h \in (0, 1.8)[m] \wedge a \in (0.03, 0.05)[m^2]$$

A continuación se describe brevemente el modelo matemático para la válvula de salida del tanque donde.

- **A** representa el área de la sección transversal del tanque
- **a** representa el área del orificio de salida.
- **C_d** y **g** coeficiente de descarga y la constante gravitacional respectivamente.

Si se establece el punto de operación a una altura $h = H_{op}$ se tienen las características para el flujo de salida esquematizadas en la figura B.1.

Para determinar el modelo lineal de la planta en el sistema de nivel, se deriva la curva que caracteriza la dinámica del flujo de salida y se evalúa en el punto de operación $h = H_{op}$ para establecer la pendiente m descrita en la ecuación B.2

$$m = \left[\frac{dq_o}{dh} \right]_{h=H_{op}} \quad (B.2)$$

Tomando el término no lineal de B.1 se tiene.

$$q_0 = c_d \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (\text{B.3})$$

Reemplazando la ecuación B.3 en B.2

$$m = \left[\frac{d(c_d \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h})}{dh} \right]_{h=H_{op}} \quad (\text{B.4})$$

Derivando

$$m = \left[\frac{g \cdot c_d \cdot a}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_{op}}} \right] \quad (\text{B.5})$$

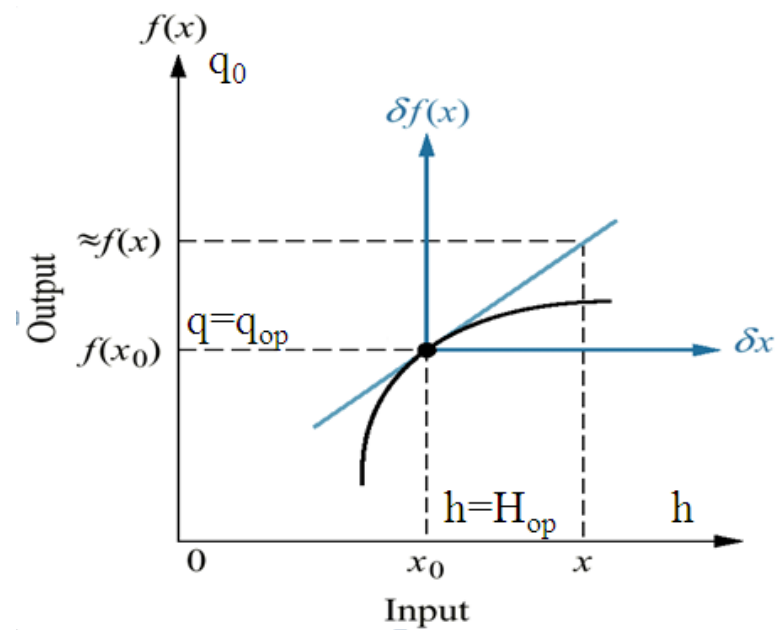


Figura B.1 Representación del punto de operación nominal.
(Fuente: Rodrigo Correa, E3T – UIS)

Luego de establecer la pendiente m se plantea la ecuación que describe el comportamiento del flujo en el tanque para valores cercanos al punto de operación como se presenta en la ecuación B.6

$$q_i = m \cdot h + A \cdot \frac{dh}{dt} \quad (\text{B.6})$$

Pasando al dominio del plano s la ecuación B.6, se obtiene la función de transferencia descrita en la ecuación B.7 y B.8.

$$G_t(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1/m}{(A/m)s + 1} \quad (\text{B.7})$$

$$G_t(s) = \frac{1/A}{(s + m/A)} \quad (\text{B.8})$$

Tomando como punto de operación $H_{op}=1$ y los parámetros nominales del tanque presentados en la tabla B.1, se obtiene la función de transferencia de la ecuación B.9. que caracteriza la dinámica del tanque en condiciones nominales

Altura	$H=2\text{m}$
Área transversal	$A=1\text{m}^2$
Área transversal del orificio	$a=0.05\text{m}^2$
Coeficiente de descarga	$C_d=1$

TABLA. B.1 PARAMETROS DEL TANQUE

$$G_t(s) = \frac{1}{(s + 0.111)} \quad (\text{B.9})$$

Adicionando el efecto del actuador entre el controlador y el tanque tenemos que la ecuación de laplace para la planta del sistema de nivel queda descrita por la ecuación B.10.

$$G_s(s) = \left[\frac{0.5}{s \cdot (s + m)} \right]_{h=H_{op}} \quad (\text{B.10})$$

Para las condiciones nominales $H_{OP}=1$ [m], se obtiene el modelo lineal de la planta descrito en la ecuación B.11.

$$G_s(s) = \frac{0.5}{s(s + 0.111)} \quad (\text{B.11})$$

Anexo C: resultados adicionales de validación.

Con el objetivo de ampliar la comprensión del esquema FMRAC aplicado en el sistema de nivel se presentan a continuación otros resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo.

La figura C.1, ilustra el comportamiento de los sistemas con control difuso y PID respectivamente, sometidos a una condición de operación en la que se varían los parámetros de la planta.

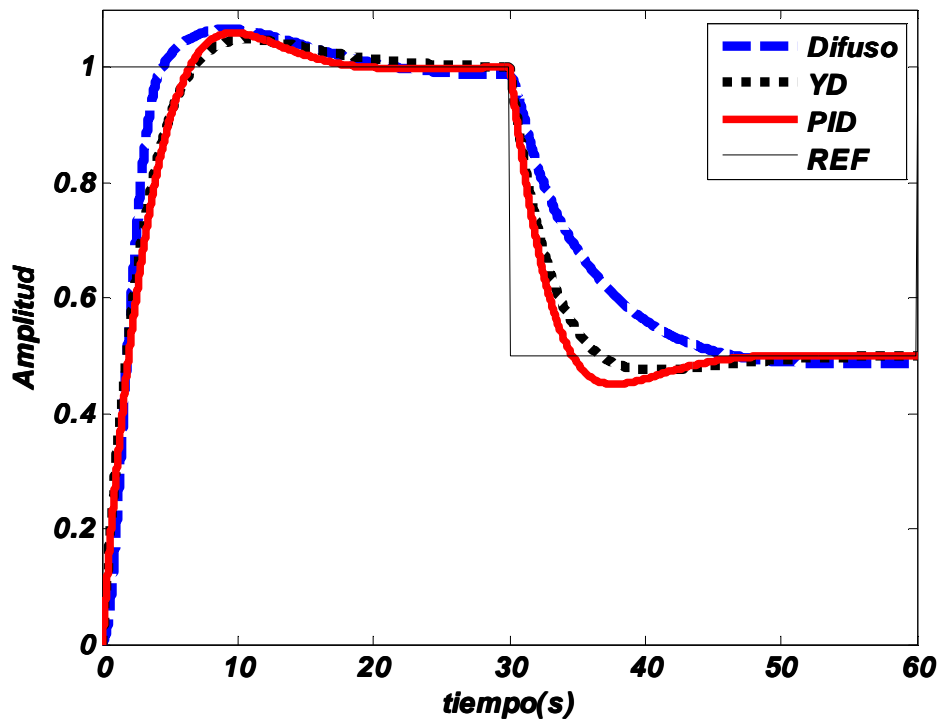


Figura C.1 respuesta al escalón variando parámetros de la planta

Las gráficas de línea discontinua y continua de la figura C.2 (la grafica de puntos corresponde a la respuesta deseada), ilustran el comportamiento de los sistemas con control difuso y PID respectivamente, sometidos a una condición de operación en la que se someten los sistemas a una perturbación.

La etapa de caracterización del proceso permitió establecer que el sistema con el control difuso nominal presenta mayores problemas desempeño y robustez, que el sistema con el controlador PID nominal, cuando estos dos sistemas son sometidos a variaciones en los parámetros de la planta, variaciones del punto de operación y perturbaciones como lo ilustra la figuras C.1 y C.2.

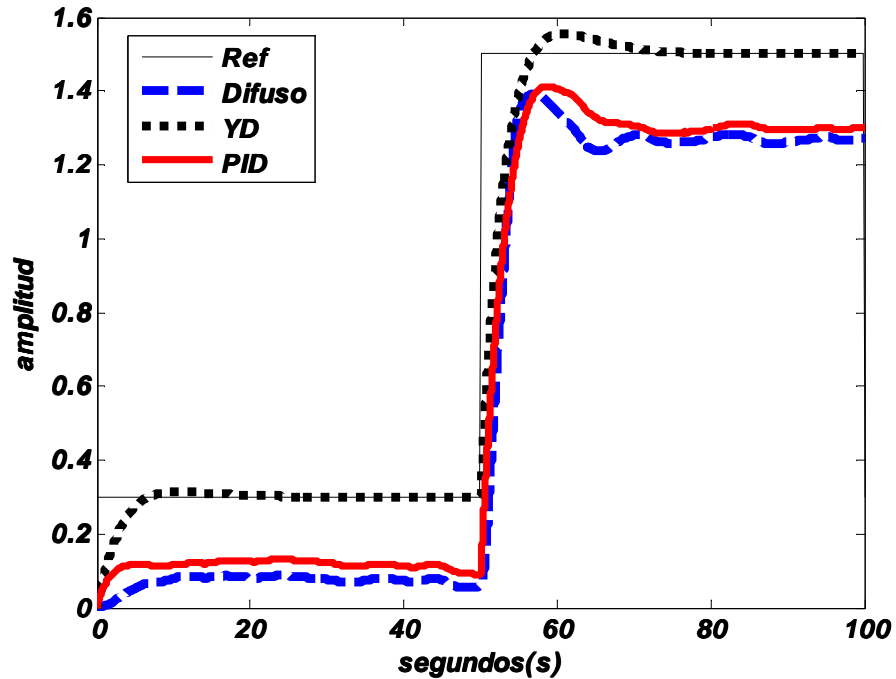


Figura C.2 Respuesta al escalón de los sistemas sometidos a perturbaciones.

Otros resultados de la etapa de validación numérica del adaptador se presentan en los casos uno y dos, donde los sistemas adaptado y sin adaptar son sometidos a dos condiciones de operación diferentes. Adicionalmente se extraen del sistema FMRAC, las graficas de las respuestas en el tiempo de las salidas del adaptador difuso y los parámetros del controlador PID.

C.1 Caso 1.

Se somete al sistema con adaptador y sin adaptador a una variación de los parámetros de la planta y una variación de punto de operación como se muestra en la figura C.3.

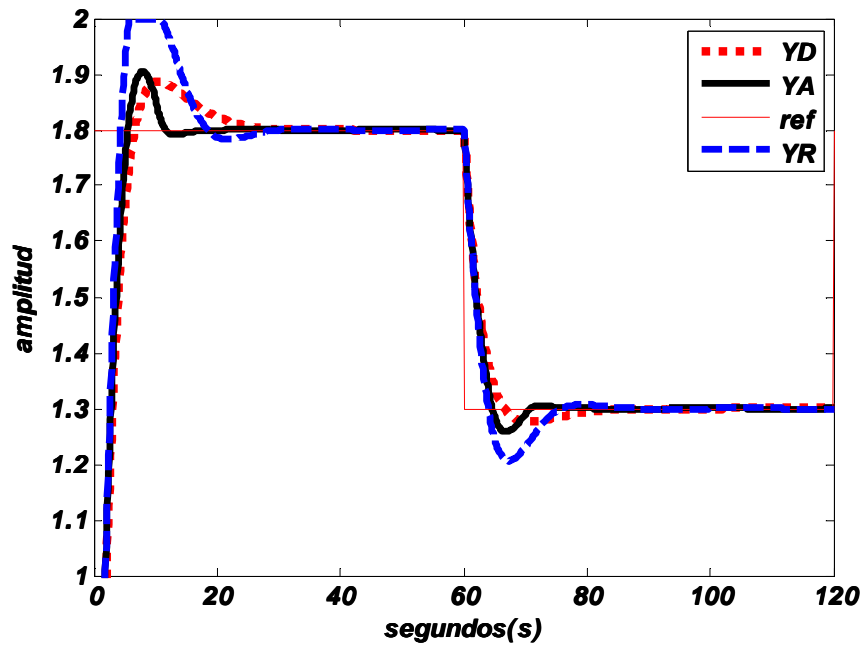


Figura C.3 sistemas sometidos a variaciones en el punto de operación y los parámetros de la planta

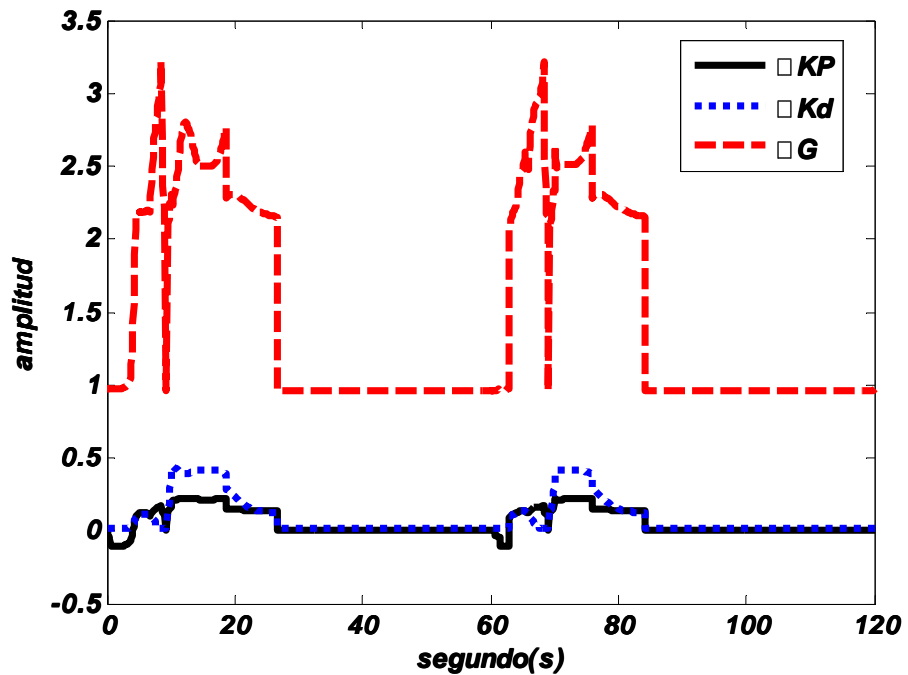


Figura C.4 salidas del sistema difuso de adaptación

En la figura C.4, se observa como varían en el tiempo los valores de salidas del adaptador difuso para adaptar las condiciones de operación presentadas en la

figura C.3. Igualmente se observa en la graficas a y b de la figura C.5 cómo se reflejan estos cambios en los parámetros del PID los cuales dejan de variar conforme el error de adaptación se mantiene cerca a cero.

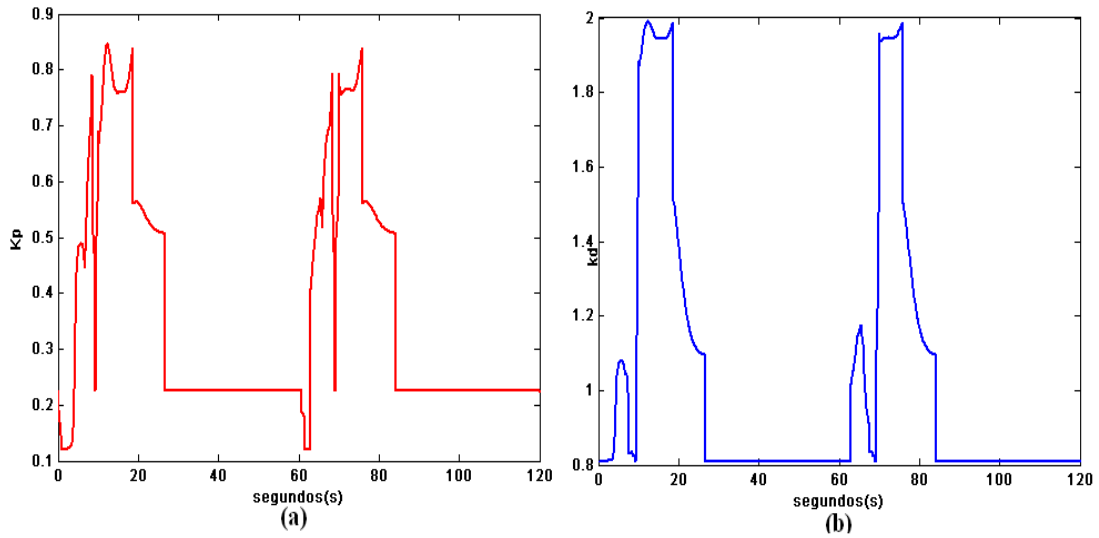


Figura C.5 Variación de los parámetros del PID

C.2 Caso 2.

Se realiza una variación grande y pequeña en el punto de operación de los sistemas adaptado, deseado y sin adaptar, como se observa en las graficas a y b de la figura C.6, para diferenciar la forma en que actúa el lazo de adaptación sobre el sistema.

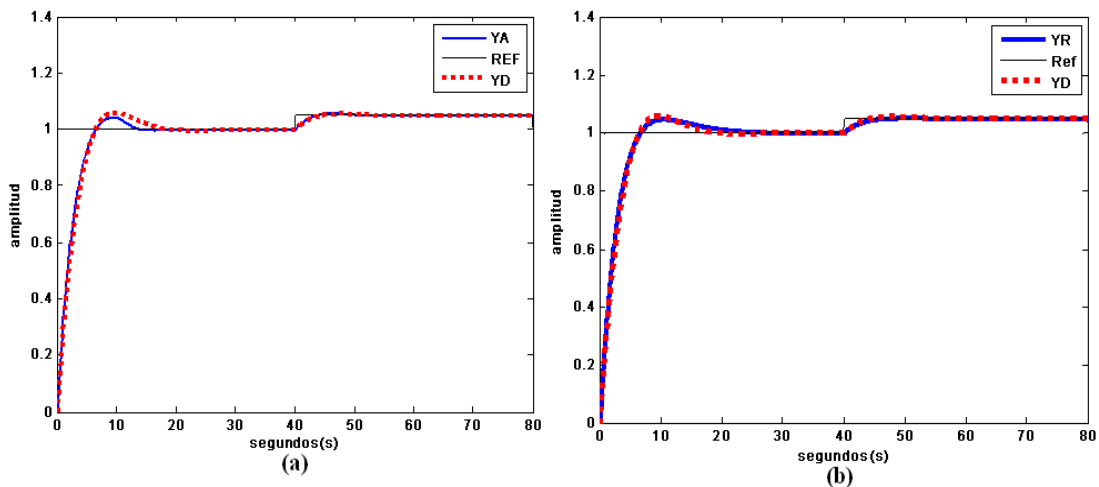


Figura C.6 Variación del punto de operación

Las gráficas de la figura C.7 muestran las variaciones en tiempo de las salidas del sistema difuso para cada punto de operación. Esto se refleja en las salidas del

adaptador difuso y los parámetros del PID los cuales experimentan un variación mayor en el rango de 0 a 40 segundos pues el cambio en el punto de operación es más grande ver (figura C.7 y C.8).

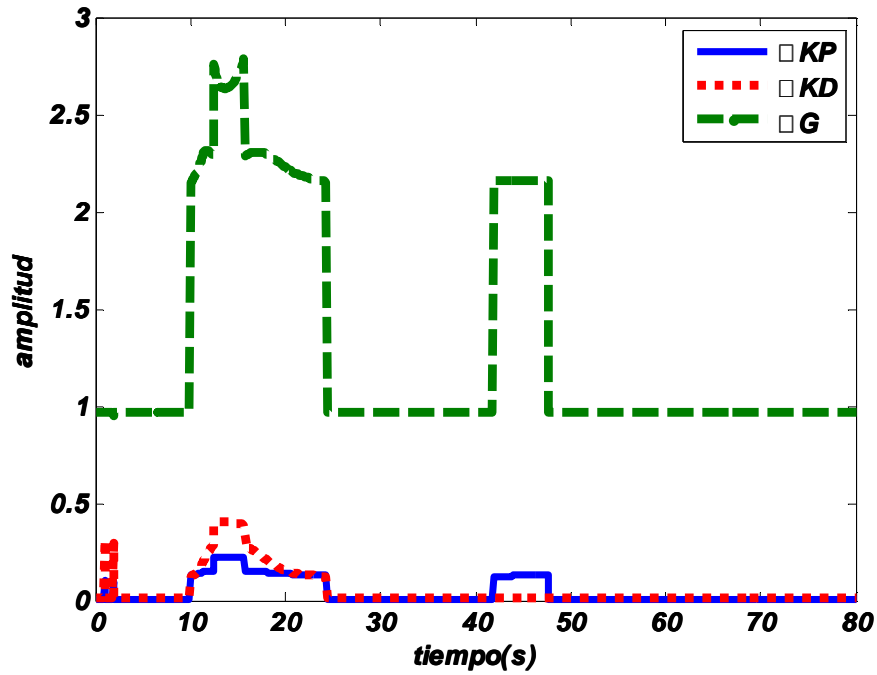


Figura C.7 salidas del sistema difuso de adaptación

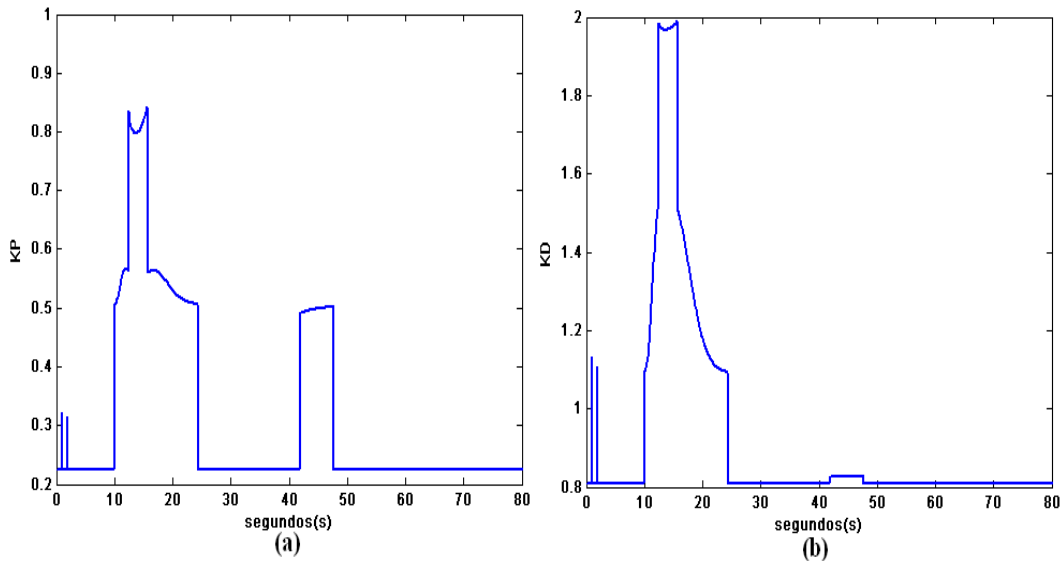


Figura C.8 Variación de los parámetros del PID

Tiempo de simulación 80 [s].

Condiciones de operación	Control FMRAC			Control PID nominal		
	IAE	ITAE	Energía de control	IAE	ITAE	Energía de control
Caso 1.	4.93	70.47	24.6	6.78	123.7	19.6
Caso 2.	2.47	9.4	6.9	2.88	13.6	5.6

Tabla C.1 Índices de desempeño etapa de validación adicional

En la tabla C.1, nuevamente se hace una evaluación numérica del desempeño de los sistemas, adaptado y sin adaptar descritos en los casos 1 y 2, donde se ratifican las ventajas de implementar el esquema FMRAC. En cuanto a la energía de control es de esperarse que el esquema FMRAC tenga un mayor consumo puesto que los parámetros del PID ajustable tienen que variar en un rango considerable, describiendo un área bajo la curva de magnitud mayor que los parámetros del PID nominal los cuales se mantienen constantes en el tiempo. Esto no implica que el sistema con el PID nominal consuma menos energía que el sistema FMRAC teniendo en cuenta que para evaluar la energía total del sistema es necesario considera también la planta, los actuadores y las características que deseamos del proceso.

Anexo D: Simulación en tiempo real del esquema de control FMRAC

El esquema FMRAC validado en este trabajo fue sometido adicionalmente a una prueba en tiempo real mediante la emulación del proceso (lazo interno) en un PC1 y del lazo de adaptación (lazo externo) en un PC2. Los dos sistemas se implementan en Simulink y son comunicados mediante el protocolo TCP/IP a través de la herramienta Communication & Strings Blockset [28], diseñada para Matlab-Simulink.

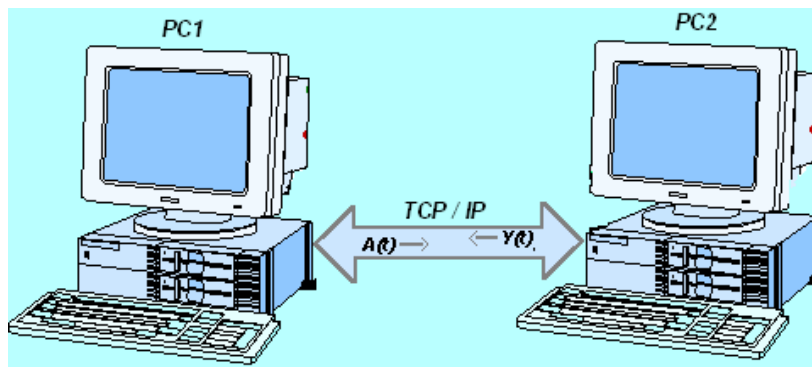


Figura D.1 Diagrama representativo del proceso de comunicación.

Como se observa en la figura D.1, los dos sistemas implementados establecen una comunicación bidireccional donde el PC1 envía su consigna y su respuesta al PC2 para recibir de éste los valores de ajuste para los parámetros del controlador PD.

En el esquema implementado en Simulink para el PC1 (ver figura D.2), se destacan.

- Controlador ajustable PD.
- Modelo de la planta.
- Bloques para enviar información al PC2 [28].
- Bloques para recibir información del PC2 [28].

En el esquema implementado en Simulink para el PC2 (ver figura D.3), se destacan.

- Bloque modelo de referencia.
- Bloque mecanismo de adaptación (adaptador difuso).
- Bloques para enviar información al PC1 [28].
- Bloques para recibir información del PC1 [28].

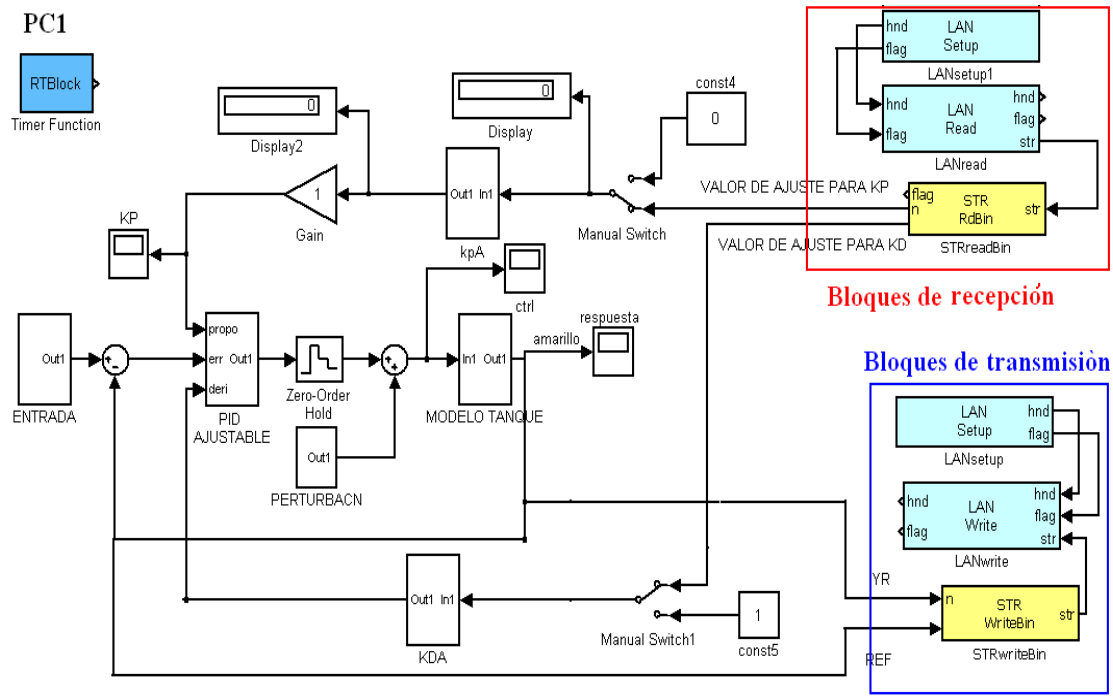


Figura D.2 Diagrama de bloques del sistema implementado en el PC1

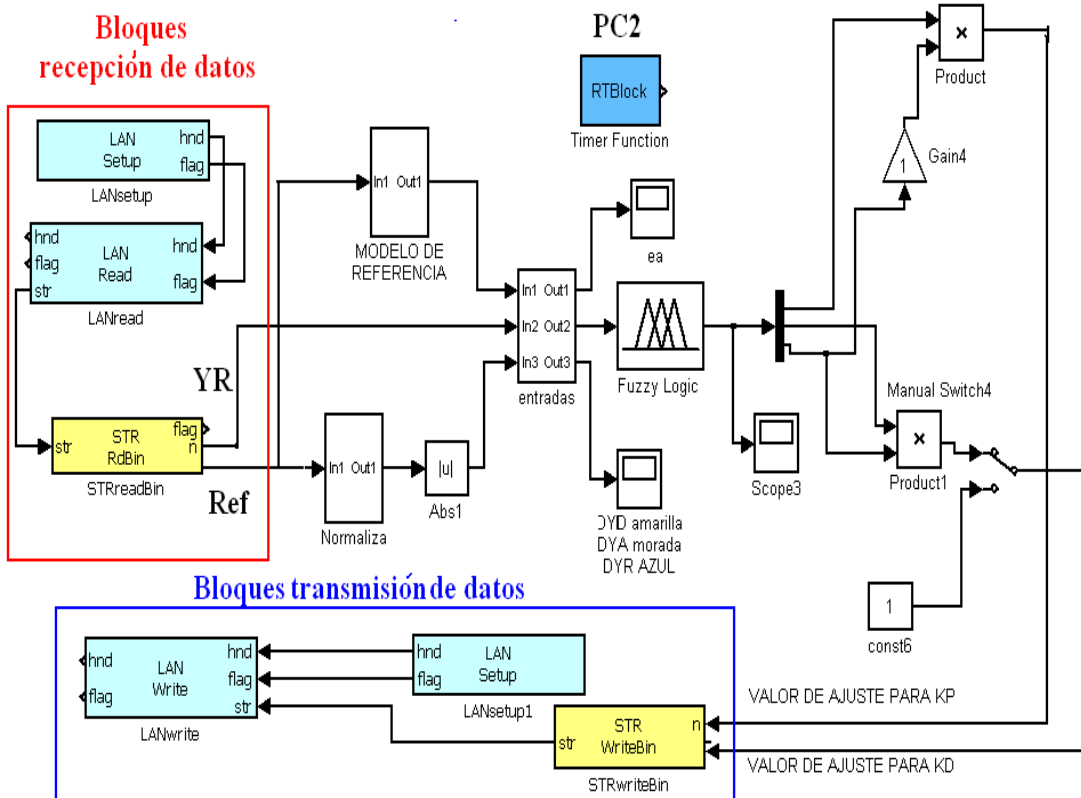


Figura D.3 Diagrama de bloques del sistema implementado en el PC2

Es importante resaltar que debido a la comunicación bidireccional que existe entre el lazo cerrado de control y el lazo de adaptación, cada computador (PC1 y PC2) debe contar con un bloque de transmisión y recepción de datos como lo muestra las figuras D.1 y D.2. El bloque de transmisión de datos se comporta como servidor por lo tanto el **LAN setup** debe ser configurado con la dirección IP del computador desde donde se va a transmitir la información. El bloque de recepción se comporta como un cliente de manera que en el **LAN setup** debe colocarse la dirección IP del computador del cual se va a recibir la información [28].

A continuación se presentan dos casos, donde se emuló el proceso con condiciones de operación diferentes. Cada uno contiene gráficas de la repuesta en el tiempo de los sistemas adaptado, deseado, sin adaptar y las variaciones de los parámetros KD y KP del controlador PD ajustable. La tabla D.1 presenta los respectivos índices de desempeño que evalúan cada condición de operación.

Tiempo de emulación 500 [s].

Condiciones de operación	Control FMRAC			Control PID nominal		
	IAE	ITAE	Energía de control	IAE	ITAE	Energía de control
Caso 1.	24.79	6292	79.61	4285	9330	32.35
Caso 2.	16.69	4860	94.23	29.48	7110	35.51

Tabla D.1 índices de desempeño etapa de emulación

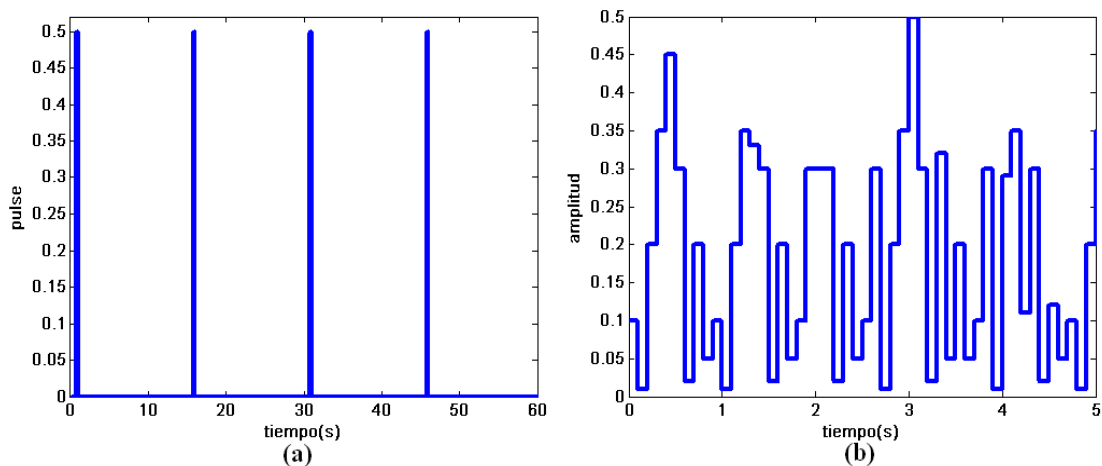


Figura D.4 Señales de perturbación para el PID y FMRAC

D.1 caso1

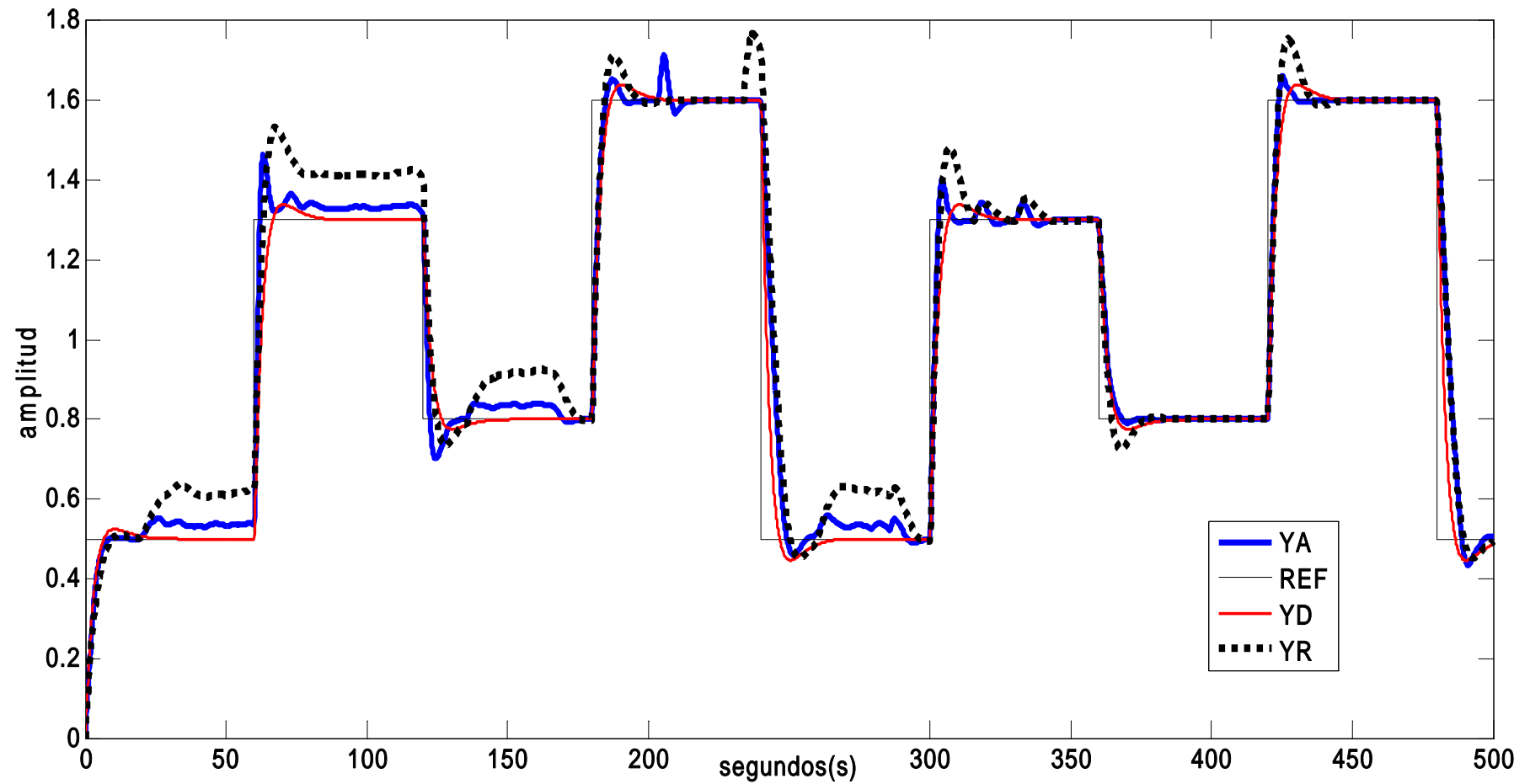


Figura D.5 Emulacion de los sistemas adaptado, deseado y sin adaptar

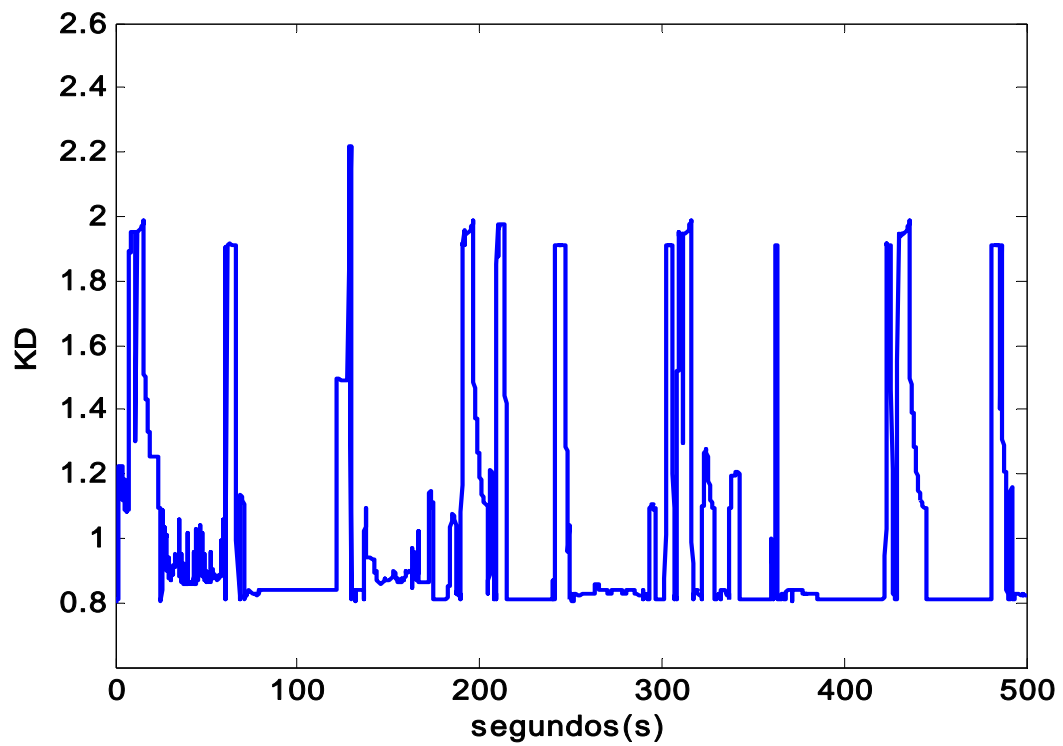


Figura D.6 Respuesta en el tiempo de KD

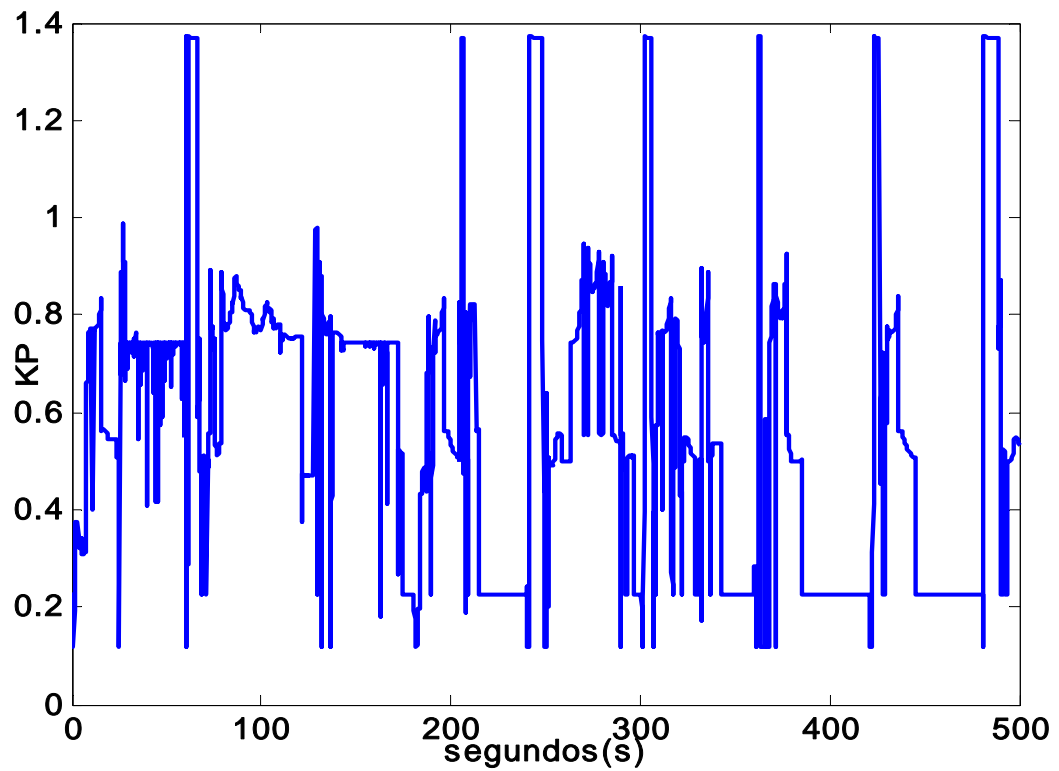


Figura D.7 Respuesta en el tiempo de KP

D.2 Caso 2.

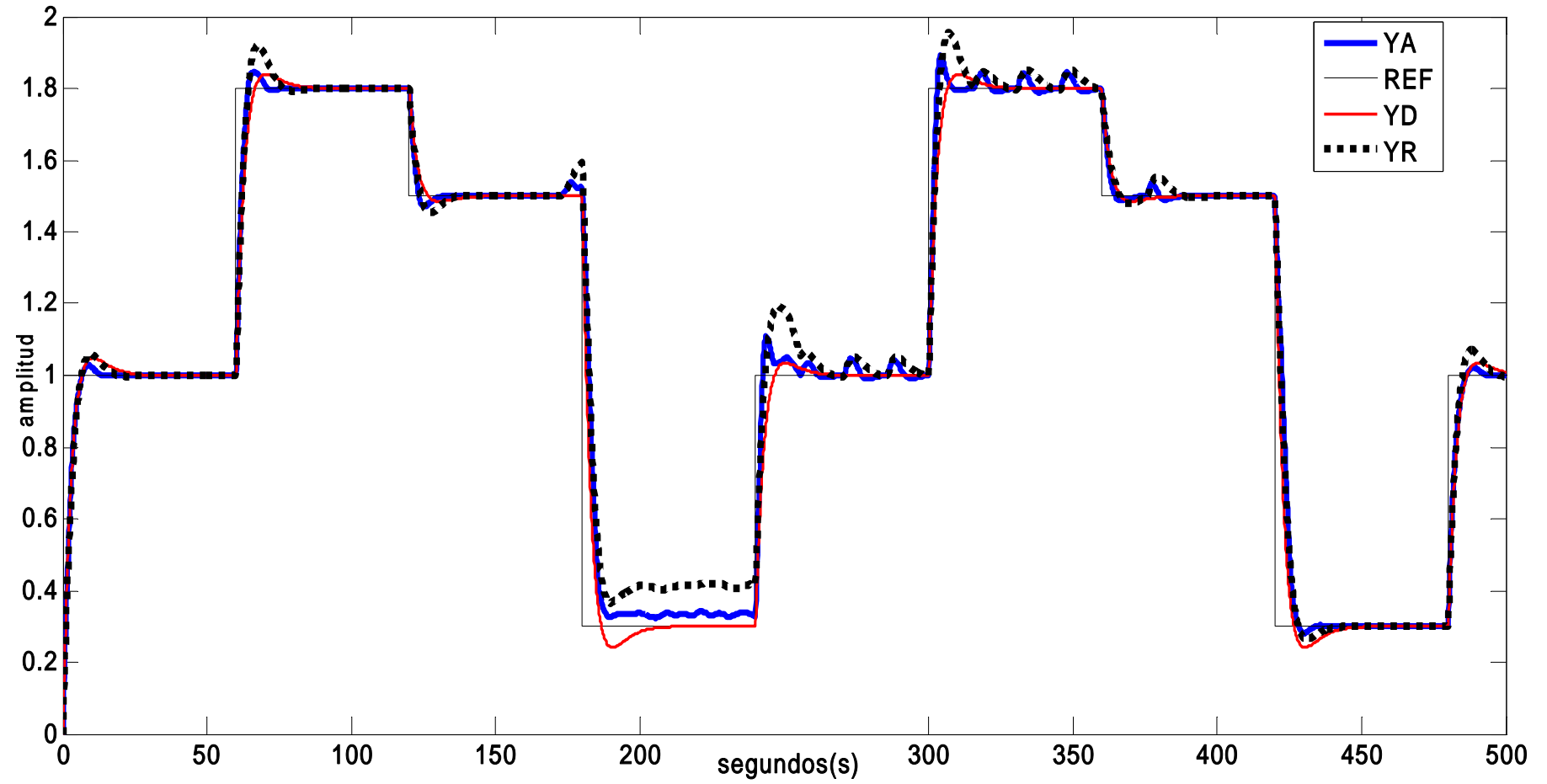


FIGURA D.8 Emulación de los sistemas adaptado y sin adaptar

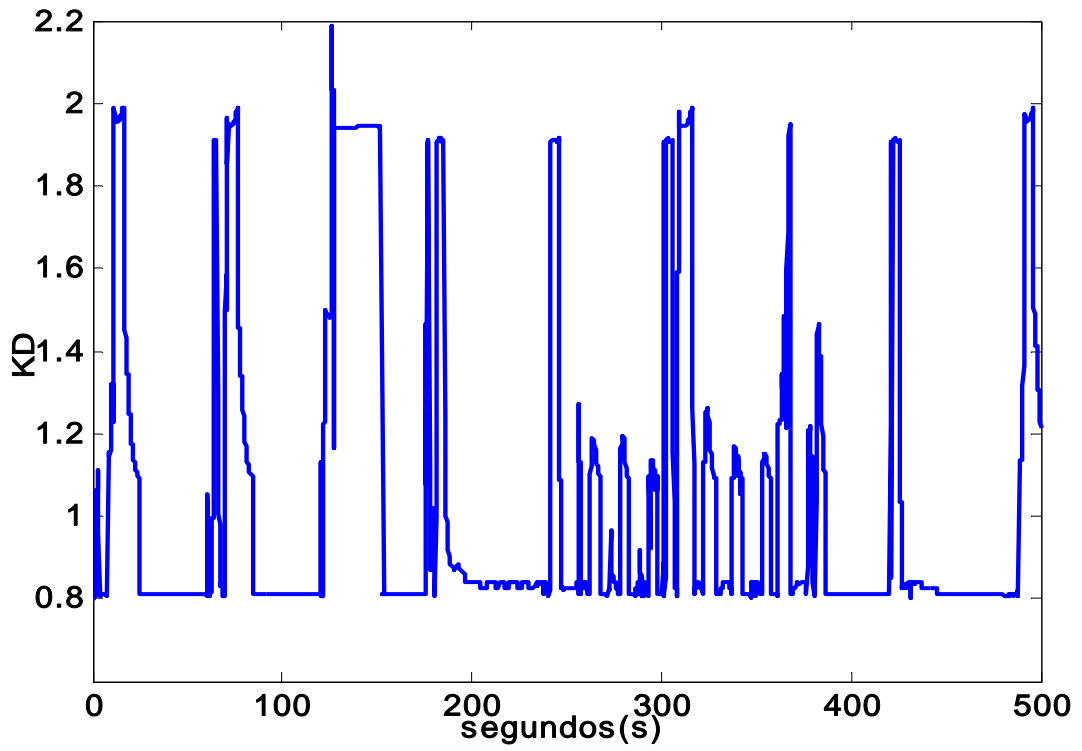


Figura D.9 Respuesta en el tiempo de KD

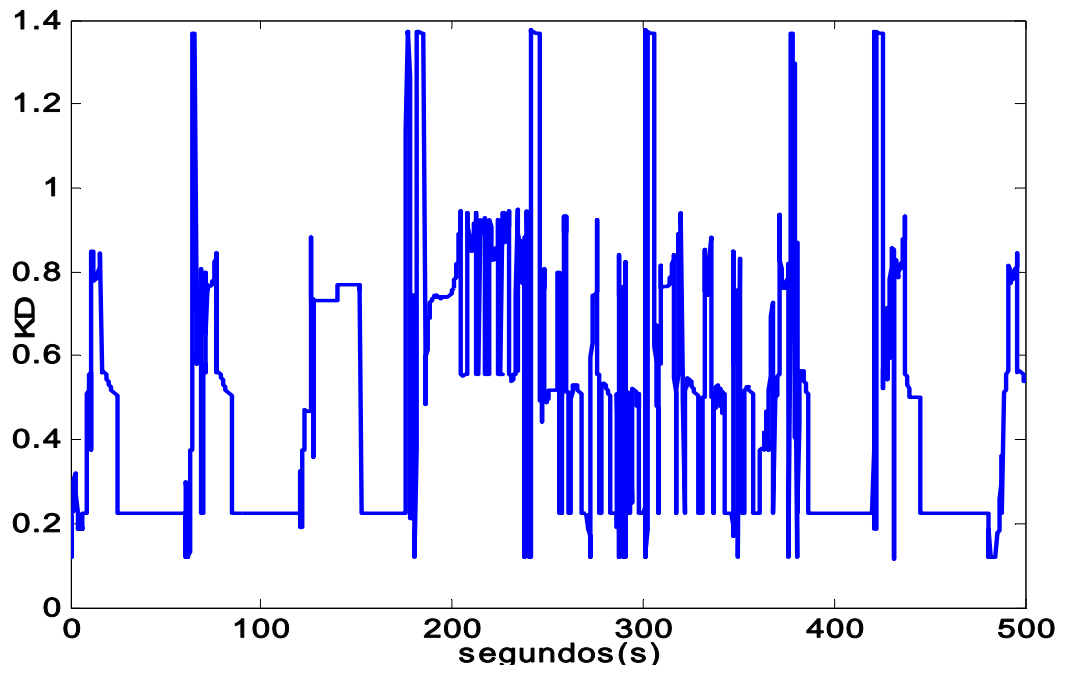


Figura D.10 Respuesta en el tiempo de KP