

**DESARROLLO DE UN CONTROL DIFUSO ADAPTATIVO
POR MODELO DE REFERENCIA**

JOSÉ DAVID MEDINA MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

MEDELLÍN

2013

**DESARROLLO DE UN CONTROL DIFUSO ADAPTATIVO
POR MODELO DE REFERENCIA**

JOSÉ DAVID MEDINA MARTÍNEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

MANUEL J. BETANCUR
Ingeniero Electrónico, PhD.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MEDELLÍN

2013

Nota de aceptación

Firma

Nombre: Msc. Hugo Cardona Restrepo
Presidente del jurado

Firma

Nombre: Msc. Tony Peñarredonda
Jurado

Firma

Nombre: PhD. Manuel J. Betancur
Director

Medellín, Febrero 5 del 2013

DEDICATORIA

A mis padres, Marcial Medina y Dora Martínez por su amor, apoyo incondicional e interminable, a lo largo de todos estos años de formación profesional.

A Alba Lía, María Mónica y Luis David a quienes quiero demostrarle que, con actitud, responsabilidad y esfuerzo, todas nuestras metas y sueños son alcanzables.

A mis tías, Marci y Waldy, las cuales depositaron en mí su voto de confianza y siempre creyeron en mis capacidades para la obtención de este logro.

A todos aquellos familiares y amigos que siempre me apoyaron y que con sus opiniones, sugerencias y amistad fueron un impulso determinante para conquistar los objetivos de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al Dr. Manuel J. Betancur por sus orientaciones, seguimiento y supervisión y las pertinentes correcciones y comentarios para la elaboración de este trabajo de grado, y así mismo enseñarme, que todos los inconvenientes y problemas que se nos presenten en nuestro devenir personal y profesional, pueden resolverse de la mejor manera, si nos enfrentamos a éstos con una actitud proactiva basada en la dedicación y el trabajo.

Al Grupo de Investigación de Automática y Diseño (A+D) de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín, por brindarme, el aval para el desarrollo de este trabajo de grado y suministrar los espacios idóneos para la ejecución del mismo.

Agradezco a los Ingenieros Sergio Lopera Vélez, Carlos Zuluaga y Sergio Cock Ramírez, por su colaboración en la solución de dudas, opiniones y sugerencias respecto a algunos detalles de diseño y funcionamiento en el desarrollo de este trabajo.

Un reconocimiento al Ing. Armando Bohórquez y al personal auxiliar del laboratorio de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UPB, por su atenta disposición al préstamo de espacios y elementos disponibles en el laboratorio.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	18
1.1. Generalidades de los Controladores Difusos.....	18
1.1.1. Lógica Difusa	18
1.2. Controlador Difuso (Fuzzy Controller).....	20
1.2.1. Fuzzificación (<i>Fuzzification</i>)	21
1.2.2. Base de Reglas (<i>Rule-Base</i>).....	21
1.2.3. Mecanismo de Inferencia (<i>Inference Mechanism</i>).....	22
1.2.4. Defuzzificación (<i>Defuzzification</i>).....	22
1.2.5. Dinámica del Controlador.....	22
1.3. FMRLC – <i>Fuzzy Model Reference Learning Control</i>	23
1.3.1. Modelo de Referencia (<i>Reference Model</i>).....	25
1.3.2. Mecanismo de Aprendizaje (<i>Learning Mechanism</i>)	26
CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE	27
2.1. Selección del Lenguaje de Programación.....	27
2.2. Selección de las Estructuras Para la Entrada.....	27
2.3. Conjuntos Difusos para las Entradas y Modelo Difuso Inverso	28
2.4. Salidas Difusas	28
2.5. Modelo de Referencia.....	29
2.6. Mecanismo de Adaptación (Aprendizaje)	29
2.7. Interfaz PC-Planta	30
CAPÍTULO 3. MANUAL DEL USUARIO	31
3.1. Requerimientos Técnicos de Operación	31
3.2. Instalación de la Aplicación Para Usuarios de <i>Windows 7</i> [®]	32
3.3. Iniciación de la Aplicación.....	33
3.4. Pantalla Principal de la Aplicación	34
3.5. Configuración de la Estructura del Controlador	35
3.6. Configuración de los Conjuntos Difusos para las Entradas	42
3.7. Diseño del Controlador	44
3.8. Diseño del Modelo de Referencia.....	46
CAPÍTULO 4. COMPARACIONES Y ANÁLISIS EXPERIMENTALES.....	48
4.1. Criterios Integrales de Desempeño	48
4.1.1 Criterio Integral de Error Cuadrático (CECI).....	48
4.1.2 Criterio Integral de Error Absoluto (CEAI)	49

4.1.3	Criterio Integral de Error Cuadrático Por el Tiempo (CECIT)	49
4.1.4	Criterio Integral Del Tiempo Por el Error Absoluto (CEAIT)	49
4.2.	Pruebas Experimentales.....	50
4.3.	Análisis de Resultados.....	58
CONCLUSIONES		61
RECOMENDACIONES.....		63
REFERENCIAS		64
ANEXOS.....		67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Función de Membresía para conjuntos difusos	19
Figura 2. Controlador Difuso	20
Figura 3. Controlador Difuso con preprocesadores y escalamiento	23
Figura 4. Control Adaptativo Directo	24
Figura 5. Diagrama de Bloques Básico del <i>FMRLC</i>	25
Figura 6. Reproducción Automática DVD-ROM	32
Figura 7. Directorio Donde Debe Guardarse la Carpeta de Aplicación	33
Figura 8. Kernel Fuzzy	34
Figura 9. Pantalla Principal de la Aplicación <i>FMRLC</i>	35
Figura 10. Configuración del <i>FMRLC</i>	36
Figura 11. Botones para Guardar y/o Cargar los Datos	38
Figura 12. Configuración de Entradas	39
Figura 13. Configuración de Salidas	41
Figura 14. Diseño de las Entradas	42
Figura 15. Modificación de los Conjuntos Difusos de Entrada	43
Figura 16. Diseño del Controlador	44
Figura 17. Configuración del Modelo de Referencia	47
Figura 18. Método de Adaptación Por Aprendizaje Constante	52
Figura 19. Criterios de Error Para el Método de Adaptación Constante	53
Figura 20. Respuesta de la Planta Con Reglas a Cero Adaptación Constante	54
Figura 21. Criterios de Error Con Reglas a Cero Adaptación Constante	55
Figura 22. Método de Adaptación Basado en Modelo Difuso Inverso	56
Figura 23. Criterios de Error Para Método de Adaptación Difusa	57
Figura 24. Respuesta de la Planta Con Reglas a Cero Adaptación Difusa	57
Figura 25. Criterios de Error Con Reglas a Cero Método Adaptación Difusa	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipo de Arquitectura	37
Tabla 2. Selección del Tipo de Vista de Salida	46
Tabla 3. Criterios de Error para Mecanismos de Adaptación Constante y Difusa	59
Tabla 4. Criterios Integrales de Error al Realizar el Borrado de Reglas	60

LISTA DE SÍMBOLOS Y VARIABLES

g_e, g_c y g_u	Ganancias de escalamiento o sintonización del Controlador Difuso.
g_{ye}, g_{yc} y g_p	Ganancias de escalamiento del Controlador Difuso Inverso.
$r(t)$	Señal de Referencia.
Y_m	Respuesta del Modelo de Referencia.
$y(t)$	Salida de la Planta.
s	Variable Compleja en la Transformada de Laplace.
e	Error.
t	Tiempo de Prueba o Ejecución.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. DIARIO DE CAMPO

67

GLOSARIO

CONTROL ADAPTATIVO: Es aquel tipo de control que busca adaptar los parámetros variables de un proceso de forma continua y automática, con el objetivo de mantener un funcionamiento óptimo de un sistema en función de unas características dinámicas deseadas. (ORTEGA, 2001).

CONTROL ADAPTATIVO DIRECTO: Método mediante el cual el “mecanismo de adaptativo”, observa las señales del sistema de control y adapta los parámetros del controlador para mantener el desempeño, sin necesidad de conocer el modelo de la planta. (PASSINO & YURKOVICH, 1998).

CONTROL DIFUSO: Sistema de control que en lugar de utilizar ecuaciones integro-diferenciales basa su operación en la aplicación de la lógica difusa, con el propósito de utilizar la experiencia y el sentido común que puede tener un experto para controlar determinado proceso. (MARTIN DEL BRIO & SANZ, 2002).

INSTRUMENTOS VIRTUALES: Elementos generados en *LabView*, llamados así porque su apariencia y funcionamiento simulan a instrumentos físicos. (BISHOP, 2004).

LABVIEW: Programa creado por la *National Instruments* en el 1976, cuyo propósito consiste mediante la utilización de funciones integradas, realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medida y presentaciones de datos dentro de un entorno de programación gráfico.

LÓGICA DIFUSA: Lógica (algoritmo) alternativa a la lógica clásica que tiene como objetivo, involucrar un grado de incertidumbre en las cosas que evalúa y emular de esta forma, algunas de las acciones que los seres humanos empleamos en la toma de decisiones. (MARTIN DEL BRIO & SANZ, 2002).

FMRLC (*Fuzzy Model Reference Learning Control*): Acrónimo de Controlador Difuso con Aprendizaje por Modelo de Referencia, esto se refiere a aquel tipo de control cuya finalidad es sintonizar un controlador difuso. Esta sintonía consiste inicialmente, en una modificación de sus parámetros de acuerdo a las exigencias de la planta o criterios del diseñador, seguido de un proceso de aprendizaje. Este aprendizaje determinará, la sintonía adecuada para diversos puntos de operación, de modo tal, que el controlador pueda recordarlos cada vez que la planta opere bajo las condiciones especificadas para tal zona. (BETANCUR, 2001).

FUNCIÓN DE MEMBRESÍA: Función que indican el valor de pertenencia de un elemento respecto a un conjunto. (PASSINO & YURKOVICH, 1998).

MECANISMO DE APRENDIZAJE: Sintonización de las reglas bases del controlador para que el sistema de lazo cerrado se comporte de acuerdo al modelo de referencia. (PASSINO & YURKOVICH, 1998).

MODELO INVERSO: Modelo difuso basado en reglas inversas. Tales reglas inversas expresan la forma cómo modificar el controlador con base a en los errores que se presenten durante la operación del sistema controlador-planta. (BETANCUR, 2001).

MODELO DE REFERENCIA: Consiste en un modelo que representa el comportamiento y la dinámica de la planta, este es impuesto de forma arbitraria a criterio del diseñador. (BETANCUR, 2001).

MODIFICADOR DE REGLAS BASES: Algoritmo desarrollado para corregir las reglas bases activadas del controlador difuso siempre y cuando, se presente un error al comparar la salida de éste con el modelo de referencia.

REGLAS BASES: Conceptos expresados en lógica difusa que al ser combinados usando premisas basadas en reglas difusas (heurística), describen el comportamiento del controlador difuso. (PASSINO & YURKOVICH, 1998).

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un control difuso adaptativo por modelo de referencia, el cual tiene dentro de sus motivaciones extender los alcances y base teórica de un trabajo de grado titulado “Desarrollo de un Control Difuso para una Máquina Textil versión Didáctica” (LOPERA, 2008), así como brindarle a los estudiantes una familiarización con las técnicas de control no convencionales y específicamente en el tema de *Fuzzy Model Reference Learning Control*.

El aspecto diferenciador de este trabajo consiste en el diseño e implementación experimental de un controlador adaptativo, que “aprenda” la sintonía más conveniente para una planta, y posea la capacidad de determinar acertadamente los parámetros que deben ser modificados sobre este, de forma tal, que dicha planta opere bajo las condiciones deseadas. La guía de adaptabilidad será suministrada por un modelo de referencia lineal, expresado como función de transferencia de hasta orden seis (6) estimado según criterio del diseñador; mientras que el mecanismo de aprendizaje será considerado entre una corrección o sintonización de las reglas bases que fueron activadas en el controlador difuso.

PALABRAS CLAVES: FMRLC, CONTROLADOR DIFUSO, MECANISMO DE APRENDIZAJE, MODELO DE REFERENCIA, CONTROL NO CONVENCIONAL.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de control moderno, sin lugar a dudas, han incursionado en el desarrollo de la mayoría de las actividades humanas, y cada vez van asumiendo un papel más importante en el desarrollo y avance de la civilización moderna y la tecnología. Sin embargo, tales técnicas o enfoques tradicionales centran su atención en el modelizado, y su posterior uso para la construcción del controlador; aspecto que en, ocasiones, se convierte en una desventaja dependiendo de la complejidad y/o dinámica del sistema o planta que se desea controlar. Cuando surgen estos inconvenientes, se recurren a las técnicas de control no convencionales y, en particular, a los controladores difusos, los cuales proporcionan una metodología para la representación, manipulación e implementación de reglas bases (semejantes al conocimiento heurístico del ser humano) con el propósito de controlar un sistema (PASSINO & YURKOVICH,1998). En los últimos años se ha incrementado la utilización de lógica difusa y controladores difusos no sólo en el control de procesos, sino que también se encuentra en muchos aparatos y dispositivos que son utilizados en la cotidianidad, ya que se observa desde revistas especializadas que exponen las cualidades y bondades de los controladores difusos, hasta avisos publicitando cámaras fotográficas y de vídeo con ajuste de imagen bajo la técnica *Fuzzy*, lavadoras que emplean "*Fuzzy Logic*" en sus procesos de lavado, sistemas de frenos *ABS* con "*Fuzzy Logic Controller*" para automóviles, entre otros. En todo caso sea por aceptación, deslumbramiento o curiosidad, en la actualidad la lógica difusa se ha convertido en un término que representa venta y *marketing*.

Los alcances de la lógica difusa y, en particular, de los controladores difusos, no sólo se concentran a este entorno; en el mundo existen tendencias y desarrollos tecnológicos que cada vez más utilizan estas técnicas de control. En astronomía y observación espacial, se desarrollan en la actualidad una nueva generación de radiotelescopios de síntesis de apertura (*SKA*, "*Square Kilometer Array*"), los cuales estiman tener una resolución angular mucho mayor (del orden fracciones

de arco) que le permitan discernir detalles en la estructura de una radiofuente (DUBNER, 2010). El método *Fuzzy Model Reference Learning Control (FMRLC* o en español, *Control Difuso por Modelo de Referencia*) será implementado en el mecanismo de ajuste de los rayos incidentes; su misión es ajustar el controlador difuso para que el sistema de lazo cerrado actúe de acuerdo a un modelo de referencia, determinado previamente utilizando la técnica de aprendizaje basado en reglas bases (SU & DUAN, 2004).

El objetivo de este trabajo es presentar al lector una técnica de control no convencional, como lo es el *FMRLC*, y permitir al usuario, mediante la utilización de la aplicación desarrollada, relacionarse e interactuar, de forma didáctica, con las nuevas tendencias de control y automatización, brindándole una inducción a estos temas que escasamente son tratados en el pregrado.

En el capítulo 1 de este trabajo se brindará una base conceptual referente al diseño de controladores basados en el método de *FMRLC*, entendiéndose de ante mano que los posibles lectores de este libro poseen un conocimiento previo acerca de técnicas de control convencionales y no convencionales (controladores difusos). En el capítulo 2 se expondrán las consideraciones para el diseño y posterior implementación del *FMRLC*. En el capítulo 3 se encuentra un manual del usuario donde se expone la forma de utilización y manejo de las funciones que contiene la aplicación y, por último, en el capítulo 4, se hará un paralelo entre los dos (2) métodos de adaptación considerado para la aplicación implementada en el desarrollo de este trabajo de grado.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

Con el presente trabajo se busca presentar una técnica de control no convencional, el *FMRLC*. Por tal motivo, es importante, exponer conceptos relacionados con el tema de control difuso adaptativo, ofreciendo al lector una ambientación rápida en el tema y contextualizando dichas explicaciones a la aplicación desarrollada en este trabajo.

1.1. Generalidades de los Controladores Difusos

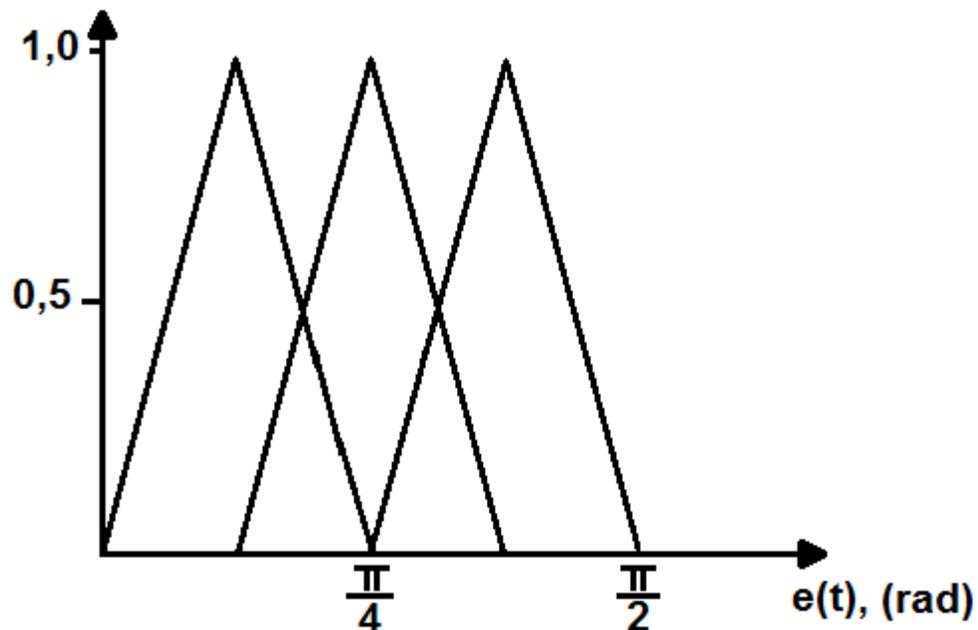
El diseño de controladores difusos aplicados en el control de procesos está basado en el uso de reglas heurísticas, las cuales emulan la forma del pensamiento humano. En esta unidad se realizará una breve explicación acerca de la teoría relacionada con los controladores difusos, además, se ofrece una ilustración de conceptos relacionados con la adaptación de dichos controladores en función de un modelo referencia.

1.1.1. Lógica Difusa

El desarrollo de los controladores difusos ha emergido como una de las técnicas de control no convencional más utilizadas en el control de procesos, gracias a la teoría de conjuntos difusos propuesta por Lofti Zadeh en el año de 1965, como una generalización de la teoría de conjuntos clásicos. La aceptación de los controladores difusos se fundamenta en el hecho de que un sistema de control, puede ser programado y/o manipulado plenamente usando reglas expresadas con representaciones lingüísticas, experiencias pasadas y sentido común; resolviendo eficientemente el problema de control sin hacer uso de ecuaciones diferenciales o

sofisticados algoritmos de la teoría de control clásica. En la teoría de conjuntos clásica un elemento pertenece plenamente a él o no lo hace en absoluto. Lo anterior puede representarse lógicamente mediante la asignación de uno (1) a todos los elementos que pertenezcan al conjunto y un cero (0) a los que no pertenezcan; para el caso de la lógica difusa se utiliza el concepto de conjunto difuso asociado a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística. Para el caso de los conjuntos difusos la función de membresía de un elemento a un determinado conjunto no se limita sólo a dos posibilidades, sino que la pertenencia o inclusión de dicho elemento, toma un número real entre 0 y 1, tal como se muestra en la Figura 1, donde cero (0) representa que el elemento no pertenece al conjunto y el uno (1), indica que dicho elemento pertenece completamente al conjunto (BETANCUR, 2001).

Figura 1. Función de Membresía para conjuntos difusos



La lógica difusa proporciona a los ingenieros de control una manera más clara e intuitiva a la hora de implementar sistemas de control, por lo tanto, existen situaciones en las cuales es mejor aplicar lógica difusa en lugar de técnicas de

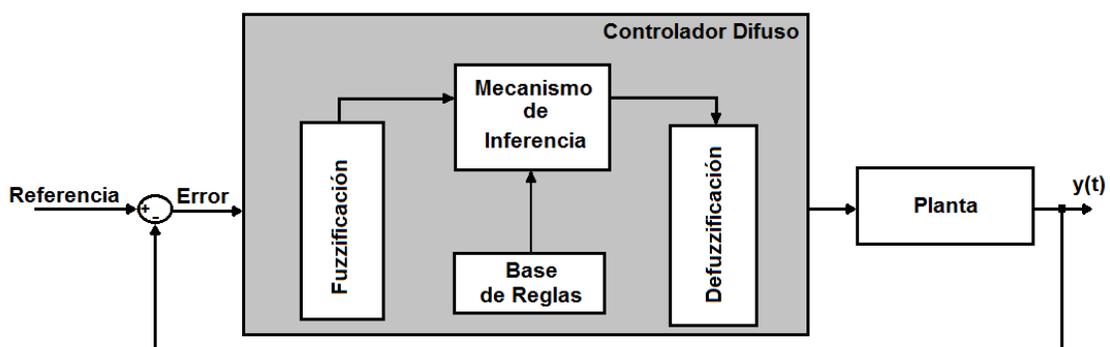
control clásico. A continuación se listan las situaciones más comunes en las que se utiliza lógica difusa:

- Variables Continuas
- Sistemas no Lineales
- Modelo matemático muy complejo del proceso
- Sensores económicos y procesadores de baja precisión
- Razonamiento incierto o aproximado (información incompleta)

1.2. Controlador Difuso (Fuzzy Controller)

Los controladores difusos, al igual que otros controladores convencionales, toman valores de las variables de entrada, realizan algún procedimiento con ellas y generan una salida que decide como modificar las variables de salida. Su diferencia es que no necesitan ecuaciones ni tablas en su procesamiento y, en su lugar, se procesan reglas bases que deciden como cambiar las salidas. La aplicación de éstas técnicas en el control de procesos hace parte de un área de la ingeniería conocida como “Control Inteligente” o también “*Soft-computing*”. En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques de un Control Difuso.

Figura 2. Controlador Difuso



1.2.1. Fuzzificación (*Fuzzification*)

Proceso de clasificación de un determinado valor de las variables de entrada (análogas) para los conjuntos difusos que fueron definidos dentro del universo de discurso.

1.2.2. Base de Reglas (*Rule-Base*)

Contienen la información sobre el control del sistema basado en la utilización de reglas difusas. Estas reglas permiten expresar la experiencia del experto en el proceso en una combinación de premisas y consecuentes (ORTEGA, 2001).

Existen casos donde el error y el cambio del error se consideran como variables para ejercer el control; las cuales a su vez, se escogen como entradas al controlador difuso. En tales casos, las reglas del controlador difuso, se representan por casillas en la matriz de reglas formadas al combinar las funciones de membresía de las dos variables de entrada, dando como resultado, una matriz $n \times m$ donde sus elementos representan las reglas para el control de la planta. (BETANCUR et al., 2001).

En lógica difusa se definen varios operadores lógicos de igual manera que en la lógica booleana pero con ciertas diferencias. Las reglas bases dependen del operador lógico que utilice. Las reglas más utilizadas son la tipo *AND* y su estructura es:

IF (Entrada1= Premisa 1) ***AND*** (Entrada2= Premisa 2) ***THEN*** (Consecuente)

donde Premisa 1 y Premisa 2 son variables lingüísticas de los conjuntos de entrada y Consecuente es una variable lingüística asignada a un conjunto de la salida.

1.2.3. Mecanismo de Inferencia (*Inference Mechanism*)

El mecanismo de inferencia es el encargado de determinar cuáles reglas bases se han activado en la operación del control, y asignar un valor de pertenencia a cada salida, obteniéndose el grado de verdad o peso para cada una de las reglas que se están activando. El valor de pertenencia depende directamente del tipo de reglas que se están usando y, en especial, del operador lógico utilizado en dichas reglas (LOPERA, 2008). Para este trabajo en particular sólo se hará uso del operador lógico difuso “AND”.

1.2.4. Defuzzificación (*Defuzzification*)

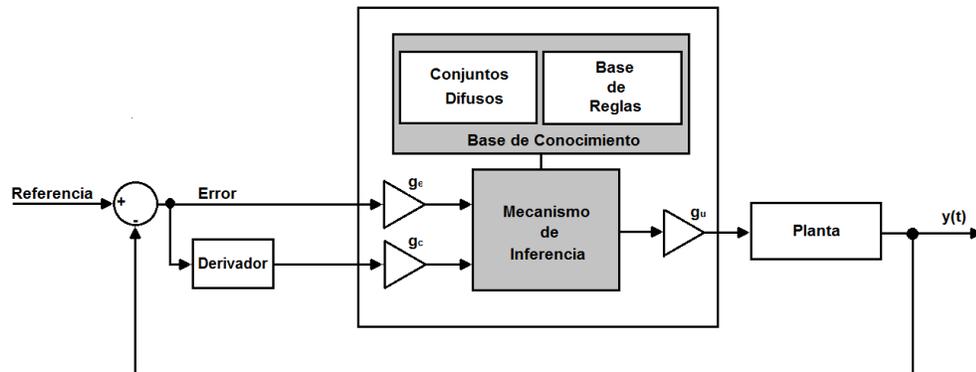
En este proceso se realiza la conversión de los resultados obtenidos mediante el mecanismo de inferencia a una señal que pueda ser interpretada por el actuador. Existen varias formas algorítmicas para realizar el proceso de Defuzzificación para este trabajo se utilizarán dos métodos, los cuales son, “*Centro de Gravedad*” y “*Promedio de Centros*”. Lo anterior se debe a su simplicidad computacional y los buenos resultados que arrojan.

1.2.5. Dinámica del Controlador

Debido a que la modelización del controlador difuso está basada en la consideración de un juego de reglas instantáneas, éste no posee dinámica propia. Sin embargo, cuando se consideran sistemas dinámicos es natural que su controlador también lo sea (BETANCUR, 2001). Por este motivo resulta indispensable agregar elementos dinámicos antes y/o después del control difuso, conforme a las exigencias del problema que se afronte. En la Figura 3 se ilustra un “Preprocesador dinámico” (derivador) antes de la entrada del controlador difuso. Si

el elemento dinámico se agrega a la salida, se denomina posprocesador. Las ganancias de entrada g_e y g_c , y la de salida g_u son elementos de sintonización o escalamiento ajustables según la planta o proceso a controlar.

Figura 3. Controlador Difuso con preprocesadores y escalamiento



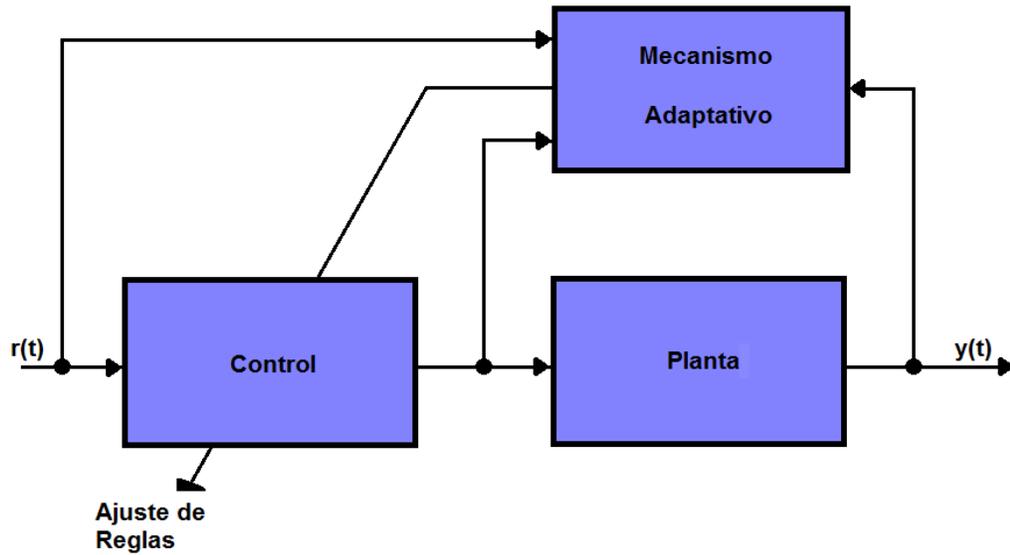
1.3. FMRLC – *Fuzzy Model Reference Learning Control*

Una vez modelado el control difuso, el procedimiento a seguir es, brindarle la capacidad de adaptarse a condiciones cambiantes. Para sintonizar dicho control ante estos cambios, se deben modificar sus parámetros de modo que, su comportamiento se ajuste a las necesidades de la planta según los criterios del diseñador.

Si el proceso de ajuste de los parámetros del controlador se realiza mediante la utilización de un algoritmo, entonces la dupla control-adaptador se estima como un control adaptativo. Si el mecanismo de adaptación sintoniza al control y posee además la capacidad de recordar, hasta cierto punto, los valores que había sintonizado en el pasado, se dice que además de adaptación hay aprendizaje (BETANCUR, 2001). El procedimiento de sintonía del controlador difuso *FMRLC* utiliza un esquema en el cual el algoritmo de adaptación no se preocupa por conocer el modelo de la planta o proceso a controlar, sino que, midiendo el

desempeño de la planta, decide los ajustes a realizar directamente sobre los parámetros del controlador. En la Figura 4 se ilustra el esquema de sintonización.

Figura 4. Control Adaptativo Directo



El diagrama funcional del FMRLC consta de tres partes fundamentales interconectadas entre sí; éstas son, el controlador difuso (*Fuzzy Controller*), el modelo de referencia (*Model Reference*) y el mecanismo de aprendizaje (*Learning Mechanism*). El esquema simplificado se ilustra en la Figura 5.

cuantitativos de ésta para poder escoger adecuadamente un modelo de referencia (BETANCUR, 2001). En general, el modelo de referencia puede ser de tiempo discreto o continuo, lineal o no lineal, invariante en el tiempo o variable en el tiempo (PASSINO & YURKOVICH, 1998).

1.3.2. Mecanismo de Aprendizaje (*Learning Mechanism*)

El mecanismo de aprendizaje es el elemento central del *FMRLC*, ya que se encarga de sintonizar las reglas bases, que fueron activadas en el controlador difuso con el propósito que el sistema de lazo cerrado se comporte como el modelo de referencia. La modificación de las reglas bases se hace por la observación y comparación de los datos obtenidos en las salidas de la planta y la que se esperaría del modelo de referencia. Si son iguales, las reglas que utilizó el controlador son las adecuadas, y por lo tanto no necesitan adaptación. Pero si existe un error, entonces las reglas utilizadas en el inmediato pasado no eran las más adecuadas, y deber ser corregidas (BETANCUR, 2001). El mecanismo de aprendizaje consta de dos partes: Un Modelo Difuso Inverso y un Modificador de reglas de conocimiento.

El Modelo Difuso Inverso (o en inglés, *Fuzzy Inverse Model*) utiliza la desviación que existe entre el comportamiento real de la planta y la salida del modelo de referencia, con el propósito de generar un valor, el cual cuantifica cuánto deben ser modificadas aquellas reglas que estuvieron involucradas en la operación del controlador.

El Modificador de las Reglas Bases (o en inglés, *Knowledge-Base Modifier*) como su nombre lo indica, determina la función de modificación de las reglas bases que fueron utilizadas por el controlador difuso, para efectuar los cambios necesarios en las entradas del proceso.

CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

En el presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un control difuso adaptativo por modelo de referencia, que permita, a sus potenciales lectores y/o usuarios, tener un acercamiento con las técnicas de control no convencionales de una forma didáctica e interactiva mediante la utilización de una aplicación que no genere inconvenientes ni dificultades para los usuarios finales.

2.1. Selección del Lenguaje de Programación

Este trabajo de grado es una extensión al proyecto “Desarrollo de un Control Difuso para una Máquina Textil versión Didáctica” (LOPERA, 2008), en la cual se construyó una *GUIDE* (o en inglés, *Graphical User Interface Development Environment*) en el lenguaje *LabView* (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*). Debido a lo anterior, es natural, que el desarrollo de la aplicación para este trabajo de grado se realice bajo las mismas consideraciones, con las modificaciones que sean pertinentes para el *FMRLC*, ya que el entorno de *LabView* posee instrumentos virtuales apropiados para la adquisición, control y procesamiento de datos.

2.2. Selección de las Estructuras Para la Entrada

Como se anotó anteriormente, los controladores difusos por definición carecen de dinámica. Con el propósito de brindar esta característica, en la configuración de las entradas del control difuso se ha dispuesto la posibilidad de pre procesamiento para el error. El número de entradas de la aplicación se ha restringido a 2, es decir que el conjunto de reglas difusas sólo pueden operar con dos entradas diferentes.

Para el caso particular del *FMRLC*, por motivos de simplicidad, sólo podrá contar con el Error y su Derivada. Si se desea tener más conocimientos y profundización acerca de las diferentes entradas que pueden ser configuradas para un controlador difuso, pueden buscar información en LOPERA (2008).

2.3. Conjuntos Difusos para las Entradas y Modelo Difuso Inverso

Una vez escogidas las entradas que se desean para el controlador difuso, se deben determinar las funciones de membresía y las variables lingüísticas que serán utilizadas para la conformación de los conjuntos difusos, los cuales determinarán el comportamiento del controlador.

La aplicación cuenta con la posibilidad de configurar y asignar variables lingüísticas a los conjuntos de entrada, así como también determinar las funciones de membresía para el modelo difuso inverso, en caso que éste sea considerado por el usuario. Para este trabajo se consideró trabajar con funciones triangulares dado a que son más fáciles de implementar computacionalmente.

La aplicación cuenta con la posibilidad de configurar independientemente los conjuntos difusos que conformarán el universo de discurso de las entradas y el modelo difuso inverso. Se podrán configurar hasta siete conjuntos para ambas señales, lo cual se traduce en una gran flexibilidad al momento de aplicar o diseñar el control. En el capítulo 3 se explicará con más detalles la configuración de dichos conjuntos difusos.

2.4. Salidas Difusas

Establecidos los conjuntos difusos del controlador el procedimiento a seguir es determinar las salidas para dichos conjuntos. La aplicación posee la capacidad de generar esta salida mediante dos métodos. El método gráfico que consiste en la

selección de las entradas que correspondan a dicha salida y luego se realiza un *drag and drop* en las gráficas de salida generadas. El otro método es mediante la modificación de la tabla de reglas difusas, donde las filas y las columnas designan las entradas Error y su Derivada respectivamente.

2.5. Modelo de Referencia

La aplicación desarrollada en este trabajo de grado contempla la posibilidad de configurar un modelo de referencia lineal según criterio del usuario. Éste modelo representará la forma y el comportamiento deseado para la planta. En dicha aplicación se podrá configurar un modelo de referencia, como función de transferencia factorizada, hasta de orden seis, lo cual se convierte en una gran flexibilidad al momento de considerar las características dinámicas de la planta, salvaguardando las posibilidades de respuesta de los actuadores y la capacidad de sintonía del controlador.

2.6. Mecanismo de Adaptación (Aprendizaje)

Una vez configurado el modelo de referencia el procedimiento a seguir es establecer el mecanismo de adaptación con el cual se modificarán las reglas difusas que fueron activadas al momento de actuar el controlador difuso. El usuario de esta aplicación tendrá la posibilidad de escoger entre dos mecanismos de adaptación. El primer mecanismo consiste en multiplicar, por una constante, el error generado entre el modelo de referencia y la salida de la planta, y conforme a este resultado se modificarán las reglas activas del controlador. El segundo mecanismo, por su parte, consiste en activar un modelo inverso basado en reglas difusas inversas, las cuales procesarán y trabajarán bajo el error generado entre el

modelo de referencia y la salida real de la planta. En el capítulo 3 se ofrece más información acerca de la configuración del mecanismo de adaptación.

2.7. Interfaz PC-Planta

La comunicación entre el PC y la planta se efectuará mediante el protocolo MODBUS-RTU. Dicha rutina ya se encuentra implementada en la máquina textil, que se usará como plataforma experimental, gracias a un trabajo de grado llamado “Modelo Didáctico de Control de Tensión para Proceso Textil” (CONGOTE & RINCÓN, 2008).

CAPÍTULO 3. MANUAL DEL USUARIO

Como se mencionó en el capítulo 2, la interfaz gráfica de la aplicación y el procesamiento digital de los datos se realizó en *LabView*[®]. En este capítulo se expondrán los pasos más importantes para hacer uso de dicha aplicación, de forma tal que se establezcan unas pautas mínimas para un manejo adecuado, ofreciéndole al usuario una herramienta útil al momento de interactuar con la interfaz del *FMRLC*.

3.1. Requerimientos Técnicos de Operación

Esta sección incluye información importante para una operación segura y eficiente. Por favor, lea esta información antes de hacer uso de esta aplicación.

Es importante que el usuario antes de llevar a cabo la utilización de esta aplicación, tenga presente las siguientes recomendaciones:

- Antes de realizar cualquier experimento con la aplicación, leer cuidadosamente este manual, así como, los capítulos 1 y 2 de este libro.
- Cerciorarse que la ejecución de ésta aplicación, sea realizada, en una versión igual o superior a *LabView*[®] 2010. De no ser así, no se podrá asegurar el buen funcionamiento.
- Seguir rigurosamente los pasos expuestos en este manual, para obtener de forma consecuente, un adecuado funcionamiento de la aplicación.
- La aplicación desarrollada debe ejecutarse sobre una estación de trabajo con las siguientes características técnicas mínimas: Sistema Operativo *Windows 7*[®] de 64 bits, Procesador Core (TM) 2 Duo de 2,93 GHz y 2,94 GHz, Memoria RAM 4 GB y un espacio en Disco Duro de 86,4 MB.

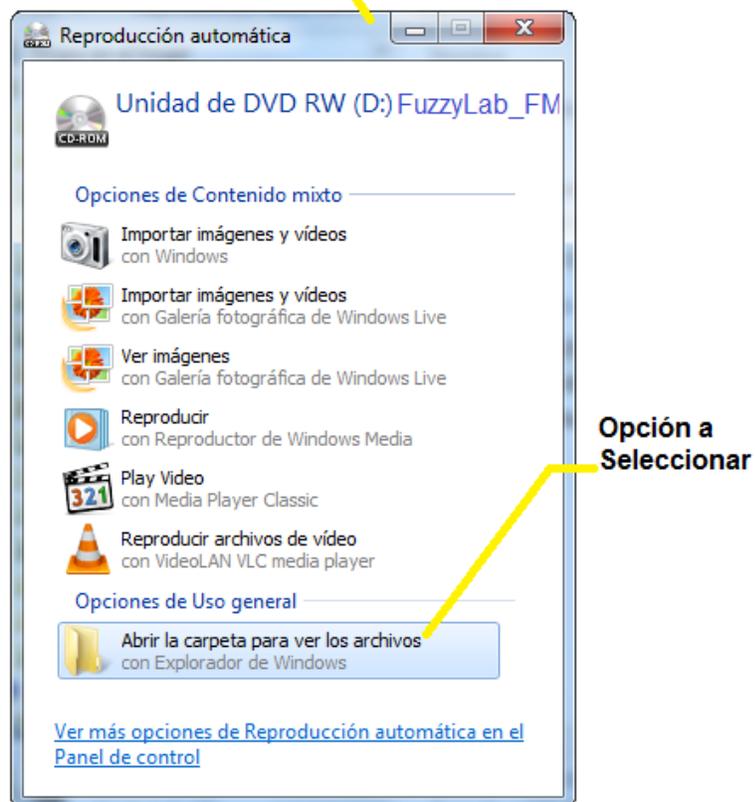
3.2. Instalación de la Aplicación Para Usuarios de *Windows 7*[®]

Para la instalación de la aplicación debe tener a su disposición el DVD instalador de ésta, y seguir las siguientes instrucciones:

- Cierre todos los programas que tenga abiertos en su ordenador e introduzca el DVD de la aplicación en la unidad DVD-ROM.
- Espere hasta que el DVD despliegue la ventana de reproducción automática y seleccione la opción “Abrir la carpeta para ver los archivos” tal como se ilustra en la Figura 6.

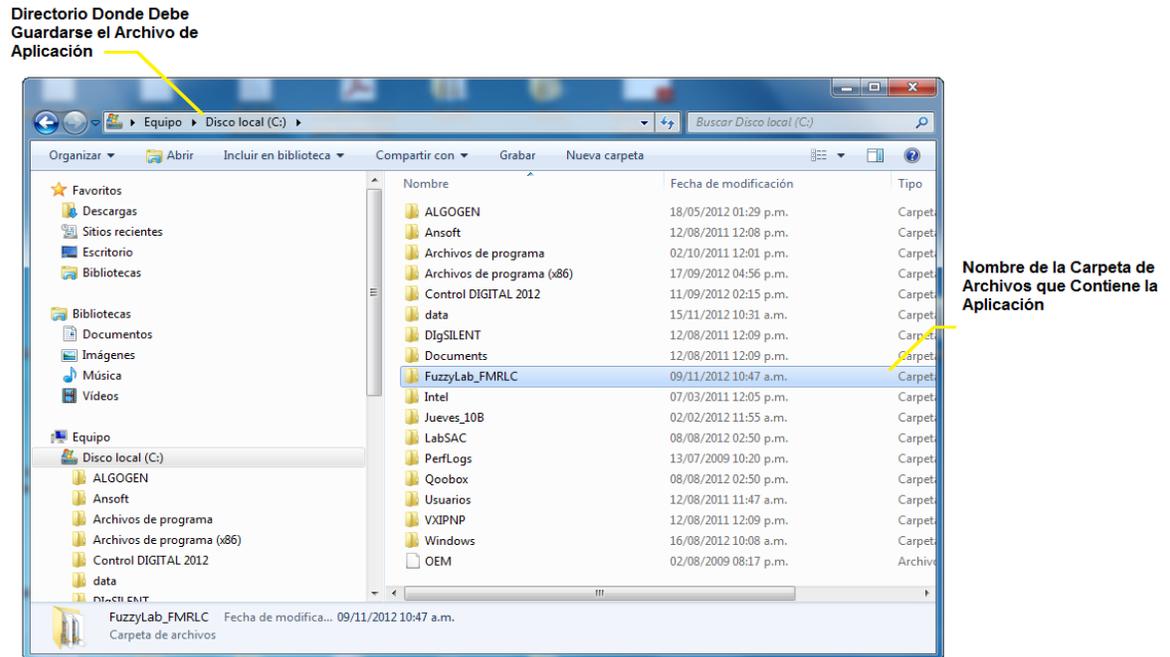
Figura 6. Reproducción Automática DVD-ROM

Ventana de Reproducción Automática



- Al hacer doble clic en la opción anterior se mostrará la carpeta archivos llamada “FuzzyLab_FMRLC”. Ésta carpeta es la que va a ser instalada o guardada en el disco C de su ordenador. Para mayor ilustración véase la Figura 7.

Figura 7. Directorio Donde Debe Guardarse la Carpeta de Aplicación



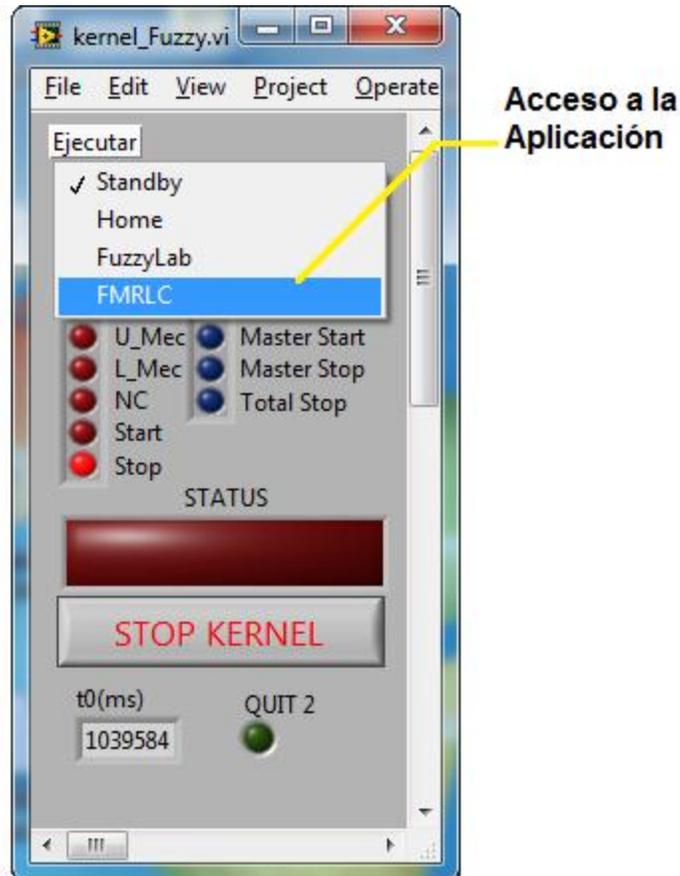
3.3. Iniciación de la Aplicación

Para comenzar a utilizar la aplicación, el usuario debe, previamente encender la máquina didáctica del cabezote textil. Se debe garantizar que exista comunicación remota entre el *PLC* de dicha máquina y la estación de trabajo. Para hacer lo anterior, el usuario debe, inicialmente encender el *PLC* donde podrá observar, el “menú de inicialización”, en la *HMI* con la que cuenta el *PLC*, y luego deberá, seleccionar la opción “Interfaz I/O”.

Una vez realizado lo anterior, el usuario debe, buscar en la carpeta de aplicación el archivo llamado “*Kernel_Fuzzy*”. Mediante este archivo se tendrá acceso a

aplicación *FMRLC* desarrollada. Al hacer doble clic en dicho archivo, se desplegará, una ventana de igual nombre desde donde se podrá comenzar a utilizar la aplicación del *FMRLC*. Para mayor ilustración véase la Figura 8.

Figura 8. Kernel Fuzzy



3.4. Pantalla Principal de la Aplicación

Una vez escogida la opción *FMRLC* se desplegará la ventana principal de la aplicación por unos segundos. Seguido esto se cargará el menú “Configuración del *FMRLC*”. En la Figura 9 se ilustra la pantalla principal de la aplicación.

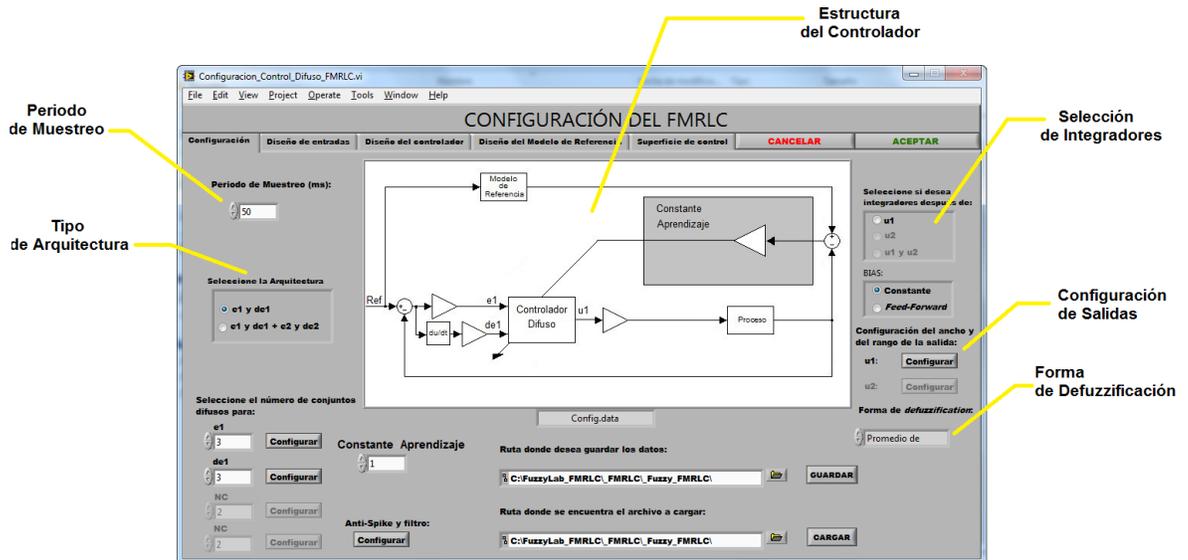
Figura 9. Pantalla Principal de la Aplicación *FMRLC*



3.5. Configuración de la Estructura del Controlador

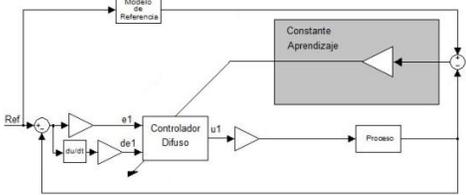
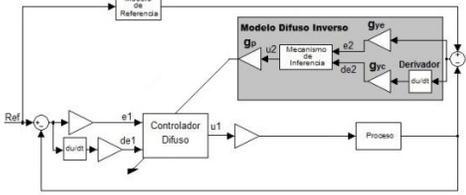
En este ítem se configuran todos los parámetros que el controlador necesita para su funcionamiento. En la Figura 10 se muestra el menú de "Configuración del *FMRLC*", en el cual, el usuario puede establecer los parámetros que permitan preparar al controlador difuso por modelo de referencia para su posterior funcionamiento.

Figura 10. Configuración del FMRLC



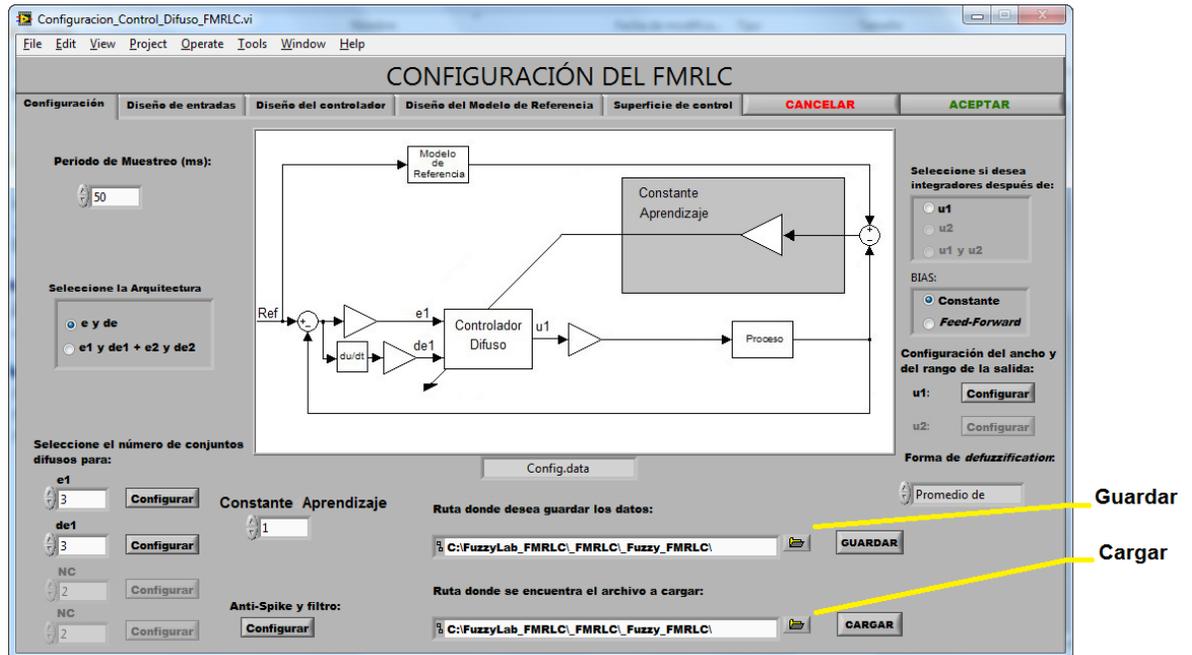
- **Periodo de Muestreo:** Se establece un valor al periodo de muestreo con el cual funcionará el controlador. Este periodo está considerado en unidades de milisegundos (ms).
- **Tipos de Arquitectura:** Selección de las entradas a los bloques de reglas bases del controlador difuso y al modelo difuso inverso. En la Tabla 1 se resumen las entradas que pueden ser configuradas en la aplicación.

Tabla 1. Tipo de Arquitectura

Tipo de Arquitectura	Configuración
<p>e1 y de1</p>	 <p>The diagram shows a feedback control loop. A reference signal 'Ref' enters a summing junction. The error signal 'e1' is fed into a 'Controlador Difuso' (Fuzzy Controller) block. The output of the controller is 'u1', which goes to a 'Proceso' (Process) block. The process output is compared with the reference at another summing junction to produce the error 'e1'. A 'Modelo de Referencia' (Reference Model) block also receives 'e1' and its output is compared with the process output at a third summing junction to produce 'de1'. This 'de1' signal is fed into a 'Constante Aprendizaje' (Learning Constant) block, which outputs a gain 'g' back to the fuzzy controller.</p>
<p>e1 y de1 + e2 y de2</p>	 <p>The diagram shows a similar feedback control loop. The error signal 'e1' is fed into a 'Controlador Difuso' (Fuzzy Controller) block. The output 'u1' goes to a 'Proceso' (Process) block. The process output is compared with the reference 'Ref' to produce 'e1'. A 'Modelo de Referencia' (Reference Model) block also receives 'e1' and its output is compared with the process output to produce 'de1'. This 'de1' signal is fed into a 'Modelo Difuso Inverso' (Inverse Fuzzy Model) block. Inside this block, 'de1' is processed through a 'Mecanismo de Inferencia' (Inference Mechanism) to produce 'e2', which is then fed into a 'Derivador' (Derivative) block to produce 'de2'. The outputs 'e2' and 'de2' are fed into a 'Constante Aprendizaje' (Learning Constant) block, which outputs a gain 'g'. This gain 'g' is fed back into the 'Modelo Difuso Inverso' block.</p>

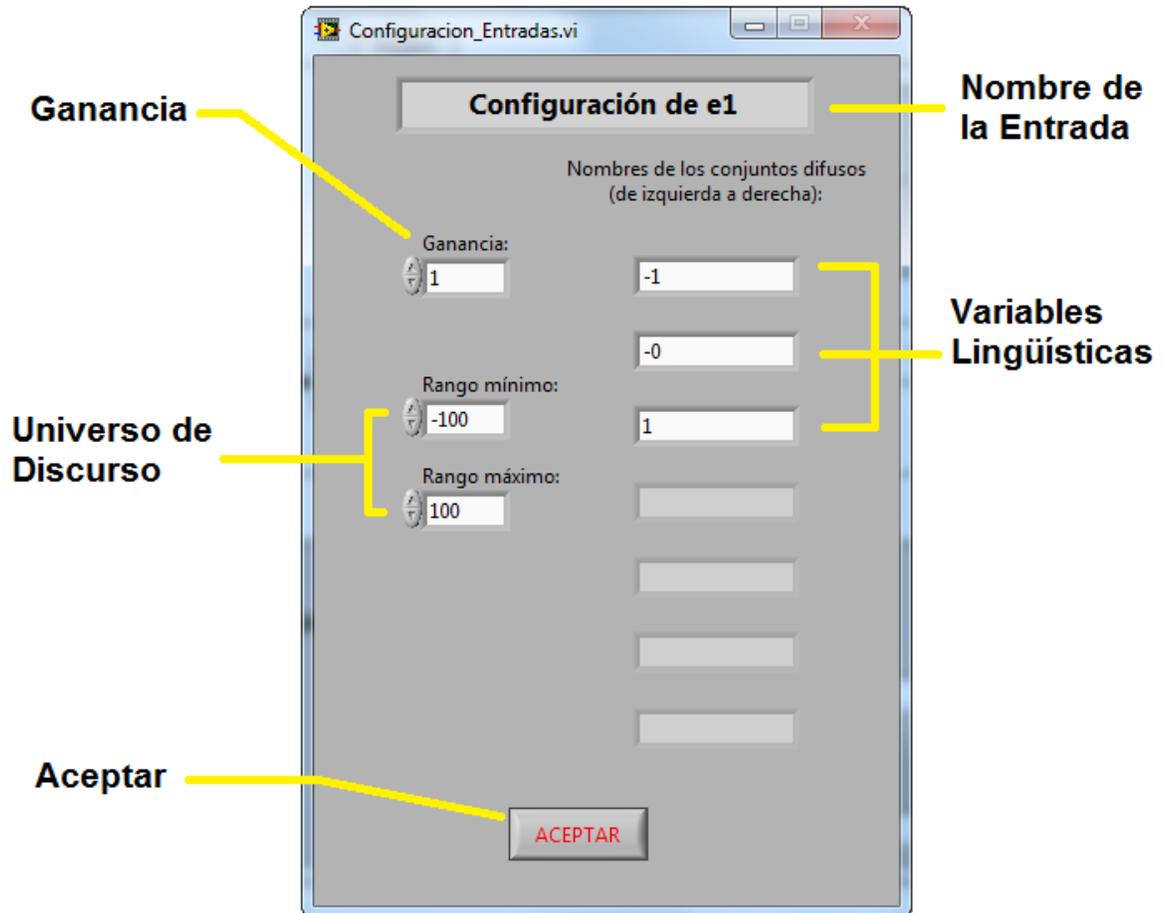
- Botones de Cargar y Guardar: Mediante la utilización de estos botones el usuario puede inicialmente cargar un diseño que haya sido construido después de la instalación de la aplicación. Así mismo, con la ayuda del botón guardar, el usuario puede guardar los datos y configuraciones que él considere sean importantes. En la Figura 11 se ilustran los botones con más detalles.

Figura 11. Botones para Guardar y/o Cargar los Datos



- Configuración de los conjuntos de entrada: El usuario puede determinar, el número de conjuntos difusos, para las entradas configuradas previamente. Estos se encuentran acotados entre un número de 2 a 7 conjuntos. Los conjuntos difusos también pueden ser configurados en la pestaña “Diseño de entradas”, en ambos casos, al pulsar el botón configurar se desplegará el submenú mostrado en la Figura 12. En este submenú se pueden establecer parámetros concernientes, los cuales, se explican a continuación.

Figura 12. Configuración de Entradas



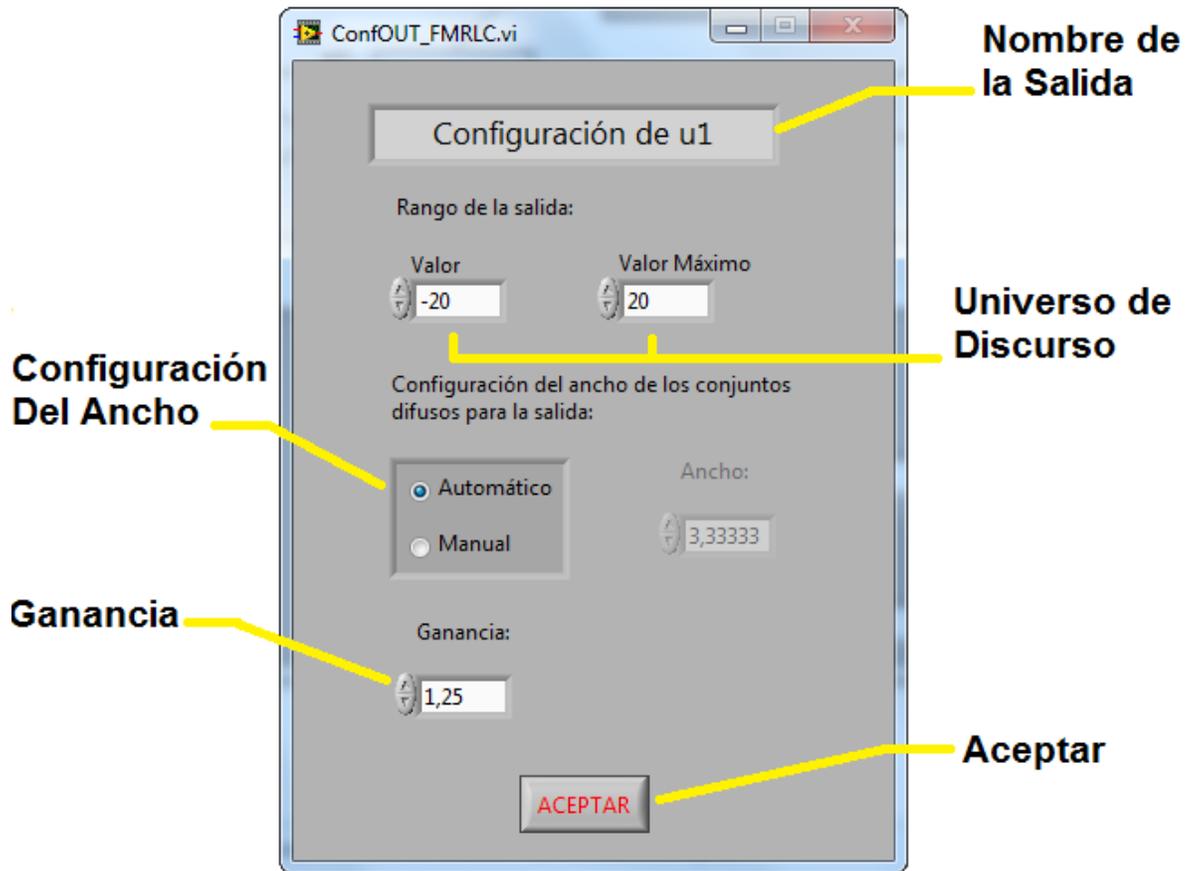
- Ganancia: Mediante ésta constante se pueden modificar las magnitudes de las entradas que fueron configuradas con anterioridad. Por defecto tiene asignado un valor de uno.
- Universo de Discurso: Permite acotar los límites máximo y mínimo del universo de discurso para las entradas. El usuario puede configurar valores para su universo de discurso sin exceder las cotas mínima y máxima las cuales, por defecto, se estiman desde -100 hasta 100.
- Nombre de la Entrada: Ilustra el nombre de la entrada que está siendo configurada por el usuario.

- Variables Lingüísticas: Mediante estos controles el usuario puede cambiar los nombres de los conjuntos difusos de las entradas.
- Aceptar: Acepta y guarda los cambios realizados por el usuario. Permite salir de este submenú.

Una vez establecidos todos los parámetros de este submenú, se retorna nuevamente, al menú principal de la Figura 10. A continuación se exponen los demás parámetros del menú configuración.

- Integradores: Se puede configurar a la salida de cada conjunto de reglas difusas un integrador, lo anterior, para brindar flexibilidad al diseño del control.
- Configuración de las salidas: Se pueden configurar, al igual que para las entradas, parámetros que permiten ordenar las salidas del controlador difuso y las de modelo difuso inverso. Al presionar el botón Configurar se desplegará un submenú correspondiente a la configuración de las salidas tal como se ilustra en la Figura 13.
- Forma *Defuzzification*: El usuario puede escoger entre Promedio de centros y Centro de gravedad para realizar el proceso de defuzzificación.

Figura 13. Configuración de Salidas



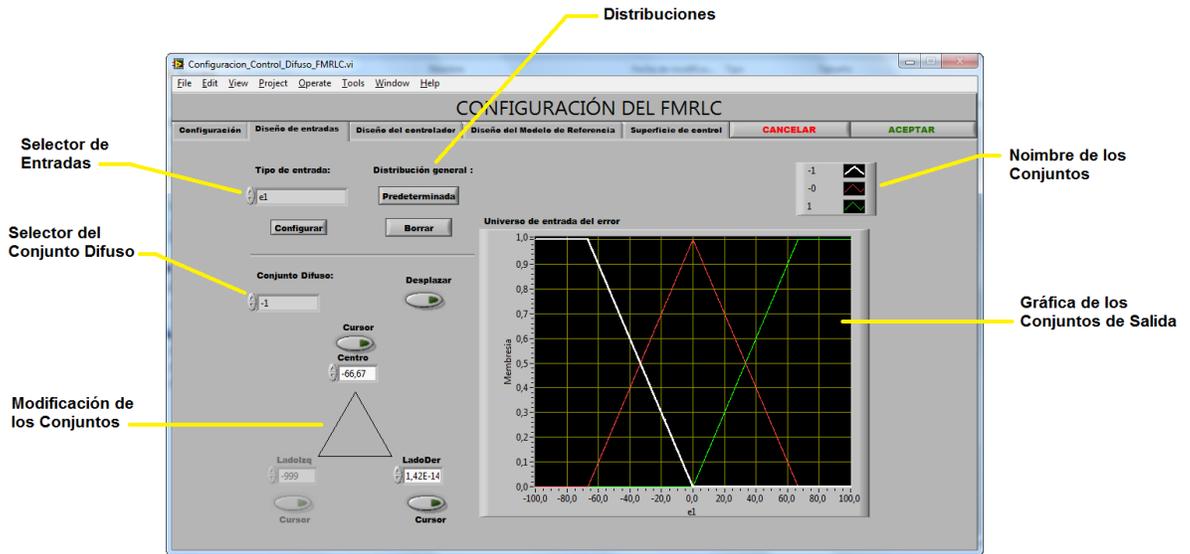
- **Universo de Discurso:** Permite acotar los límites máximos y mínimo del universo de discurso para la salida. El usuario puede configurar valores para su universo de discurso sin exceder las cotas mínima y máxima las cuales, por defecto, se estiman desde -100 hasta 100.
- **Configuración del Ancho:** Configura el ancho de los triángulos de salida.
- **Ganancia:** Constante mediante la cual se modificará la magnitud de la salida en caso de ser necesario.
- **Aceptar:** Acepta los cambios y sale de este submenú.

Una vez configurada la salida, se retorna de nuevo, al menú configuración.

3.6. Configuración de los Conjuntos Difusos para las Entradas

Una vez configuradas las entradas del controlador difuso, se procede, a la construcción de los conjuntos difusos para éstas. En la pestaña Diseño de entradas se despliega el submenú mostrado en la Figura 14.

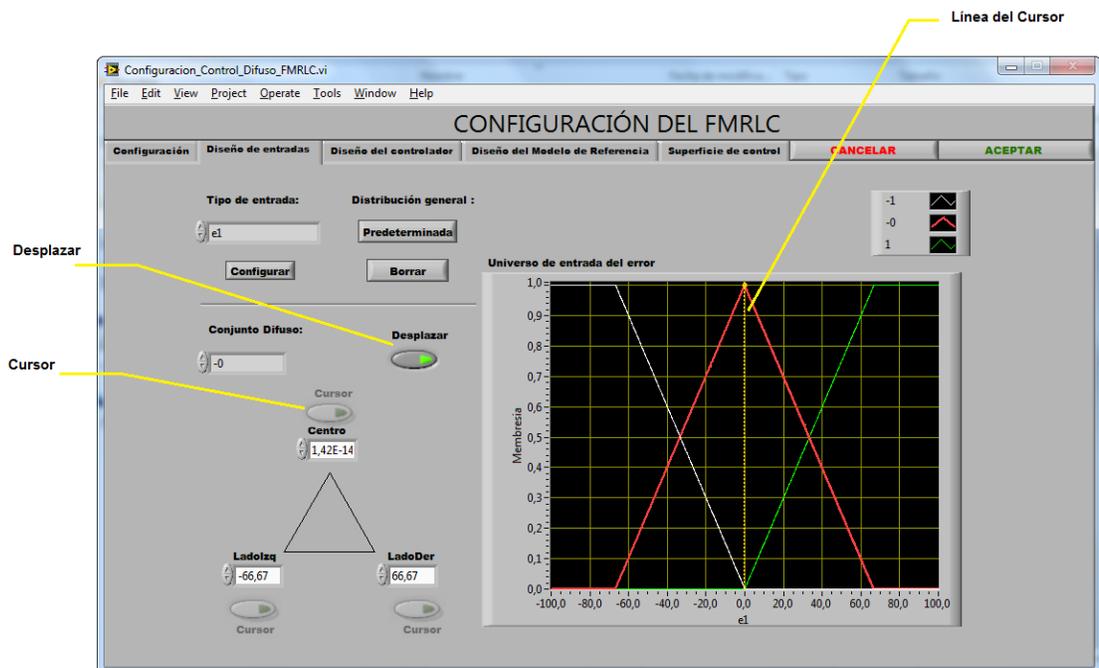
Figura 14. Diseño de las Entradas



- Selector de Entradas: Mediante este control, el usuario puede, referenciar la entrada sobre la cual desea hacer cambios en sus conjuntos difusos. Los ítems en este control varían conforme a la estructura de entrada que haya seleccionado previamente el usuario.
- Distribuciones: Con la ayuda de este control el usuario puede realizar una distribución predeterminada de los conjuntos difusos para las entradas, sin la necesidad, de construir desde cero dichos conjuntos. También puede borrar estos conjuntos por completo, en el caso, que no cumplan con sus expectativas.

- Selector del Conjunto Difuso: Permite escoger a cuál de los conjuntos difusos de las entradas se le harán los cambios. Los conjuntos difusos estarán denotados por sus variables lingüísticas correspondientes.
- Nombres de los Conjuntos: En esta etiqueta se relacionan las variables lingüísticas de cada uno de los conjuntos determinados por el usuario con un código de colores, los cuales, permiten al usuario identificar dichos conjuntos difusos en la gráfica.
- Gráfica de los conjuntos de entrada: Se ilustran los conjuntos difusos de las entradas.
- Modificación de los conjuntos: Para asignar los valores a cada uno de los conjuntos difusos, la aplicación, posee dos alternativas a saber. La primera consiste en establecer valores mediante el uso de los controles numéricos, y la segunda, es pulsar el botón Cursor o Desplazar y realizar estos cambios de forma gráfica. En la Figura 15 se ilustra la modificación de los conjuntos difusos de entrada.

Figura 15. Modificación de los Conjuntos Difusos de Entrada

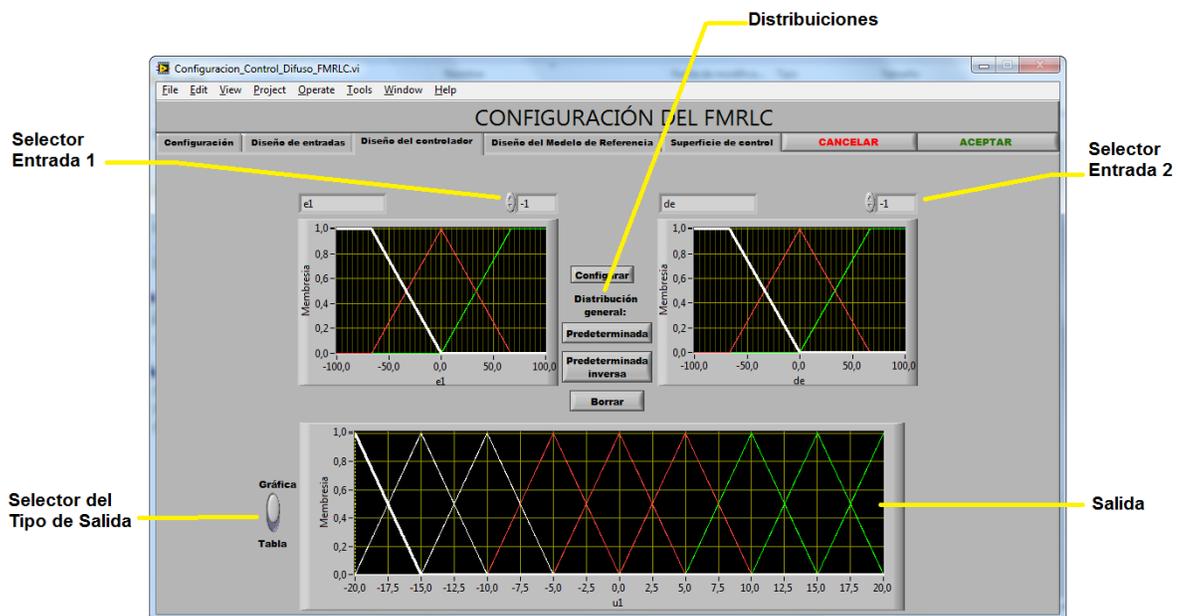


- Desplazar: Mediante este botón se posiciona una línea de cursor en el centro del triángulo, la cual, se manipula mediante un *drag and drop* con el propósito de desplazar todo el conjunto a lo largo del universo de discurso.
- Línea del cursor: Es una línea que permite realizar, gráficamente, cambios en el conjunto difuso.
- Cursor: Mediante estos botones se posiciona la línea del cursor, conforme, al botón Cursor que fue pulsado.

3.7. Diseño del Controlador

Una vez consignadas las entradas de los controladores difusos y difuso inverso, se procede a la construcción de las reglas difusas para cada uno de dichos controladores. Ésta aplicación tiene dos opciones para la construcción de dichas reglas, bien sea, de forma gráfica o mediante la elaboración de la tabla de reglas. En la Figura 16 se muestra la pestaña de configuración correspondiente al diseño del controlador.

Figura 16. Diseño del Controlador

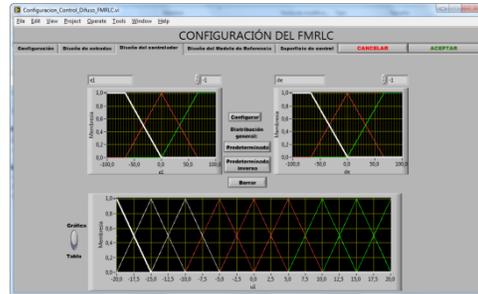


- Selector de entrada 1 y selector de entrada 2: Para cada de una de las entradas, se puede elegir, el conjunto difuso asociado a su variable lingüística. En caso de seleccionar ambos conjuntos, una línea de cursor, se posicionará en el centro de la salida difusa correspondiente.
- Distribuciones: Con el propósito de facilitar, al usuario la organización de los conjuntos difusos de salida, la aplicación tiene la opción de predeterminedar la ubicación de los conjuntos difusos de salida, de acuerdo a dos opciones, de manera directa o inversa. También se tiene la opción de borrar dichos conjuntos, siempre y cuando, estos no sean coherentes las exigencias o pretensiones del usuario.
- Salida: En esta parte se ubica, la gráfica de los conjuntos difusos de salida o la tabla de reglas, dependiendo del tipo de elección realizada por el usuario. Indistintamente de cual fuere, el tipo de salida escogida, se pueden hacer modificaciones respecto a la ubicación de los conjuntos difusos.
- Selector Tipo de Vista de Salida: Mediante este selector, el usuario puede, observar la disposición de las salidas en forma gráfica o en la tabla de reglas. Para mayor ilustración véase Tabla 2.

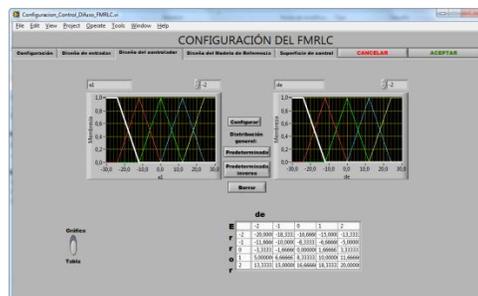
Tabla 2. Selección del Tipo de Vista de Salida

Selección	Vista
-----------	-------

Vista Salida Gráfica



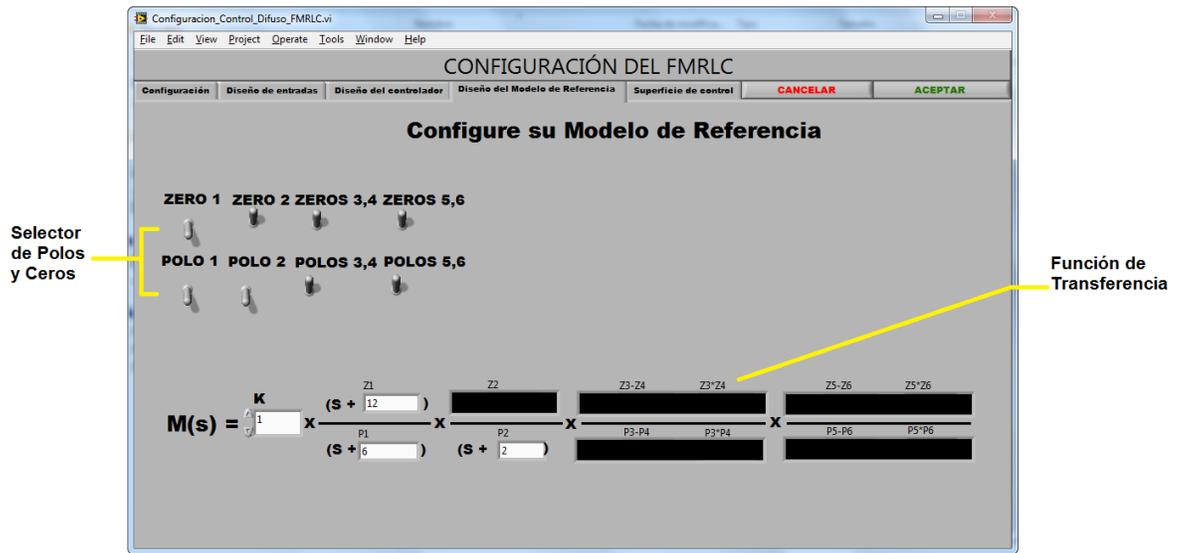
Vista Salida por Tabla de Reglas



3.8. Diseño del Modelo de Referencia

Una vez establecidas las reglas difusas del controlador se procede a la configuración del modelo de referencia. Para configurar el modelo de referencia se selecciona la pestaña “Diseño del Modelo de Referencia”, en la cual, el usuario de la aplicación tiene la posibilidad de configurar un modelo de referencia factorizado hasta de orden 6, lo que permite, tener una buena flexibilidad al momento de escoger un modelo que represente el comportamiento y la dinámica de la planta. En la Figura 17 se muestra la pestaña de configuración de dicho modelo.

Figura 17. Configuración del Modelo de Referencia



- Selectores de Polos y Ceros: El usuario puede configurar la estructura del modelo de referencia, mediante la selección, del número de polos y ceros que él considere. Mediante el uso de estos controles, se habilitarán o deshabilitarán, los polinomios del numerador y denominador de la función de transferencia, los cuales, determinarán el orden del modelo.
- Función de Transferencia: En esta parte se muestra la estructura final del modelo, de acuerdo, a la configuración de Polos y Ceros realizada previamente.

CAPÍTULO 4. COMPARACIONES Y ANÁLISIS EXPERIMENTALES

En este capítulo se encontrarán los resultados experimentales obtenidos al comparar, cualitativa y cuantitativamente, los dos (2) métodos de adaptación desarrollados en la aplicación, y se tendrá como parámetro de comparación y evaluación, el comportamiento del error. Para el caso particular de este trabajo, dicho error será la diferencia que exista entre la salida de la planta y el valor que se esperaría del modelo de referencia propuesto por el diseñador.

La aplicación desarrollada en este trabajo, contempla que la señal de referencia (entrada) tenga cambios en amplitud y frecuencia; por lo tanto, se utilizará el error dinámico para hacer las comparaciones experimentales; específicamente, se utilizarán los Criterios Integrales de Desempeño, como medida experimental para cada uno de los dos (2) métodos de adaptación ensayados en el laboratorio.

4.1. Criterios Integrales de Desempeño

Los índices de comportamiento se definen como un valor para determinar la calidad de la respuesta de un sistema ante una entrada. Entre estos índices se destacan los criterios integrales, los cuales han sido, comúnmente utilizados como funciones de costo a la hora de optimizar controladores (ORTIZ, 2009).

4.1.1 Criterio Integral de Error Cuadrático (CECI)

Este criterio da mayor importancia a los errores grandes pero da poco peso a los errores pequeños. Es fácilmente computable tanto analítica como experimentalmente pero no es muy selectivo, ya que variaciones de los parámetros no afectan significativamente el resultado final de la integral. (OGATA, 1998). La integral del error cuadrático está dada por

$$CECI = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (1)$$

4.1.2 Criterio Integral de Error Absoluto (CEAI)

Se caracteriza por ser de fácil aplicación y por proporcionar un amortiguamiento y una respuesta aceptables a la salida del lazo de control. Sin embargo, este criterio no es capaz de optimizar sistemas altamente sobre amortiguados o altamente subamortiguados. Además, es difícil de evaluar analíticamente y no es muy selectivo. (OGATA, 1998). La integral del valor absoluto del error está dada por

$$CEAI = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2)$$

4.1.3 Criterio Integral de Error Cuadrático Por el Tiempo (CECIT)

Se caracteriza por dar poco peso a los errores iniciales grandes pero castiga a los errores presentes tiempo después del inicio de la entrada al sistema. Posee una mayor selectividad con respecto al CECI. (OGATA, 1998). La integral del tiempo por el error cuadrático está dada por

$$CECIT = \int_0^{\infty} t e(t)^2 dt \quad (3)$$

4.1.4 Criterio Integral Del Tiempo Por el Error Absoluto (CEAIT)

Bajo este criterio se obtienen respuestas transitorias con sobreimpulsos pequeños y oscilaciones bien amortiguadas. Al estar el valor absoluto del error multiplicado por el tiempo, errores grandes son multiplicados por tiempos pequeños, brindando poco peso a los errores grandes que se dan al inicio del sobreimpulso y gran peso a los errores pequeños. (OGATA, 1998). La integral del tiempo por el error absoluto está dada por

$$CEAIT = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4)$$

4.2. Pruebas Experimentales

Como se mencionó anteriormente, los criterios integrales del error, fueron los parámetros utilizados para la comparación cuantitativa de los dos (2) métodos de adaptación desarrollados en este trabajo. Las pruebas experimentales se realizaron, midiendo el desempeño de dichos métodos, en una ventana de ejecución de una duración aproximada de 13 segundos, tiempo suficiente, para lograr controlar y adaptar completamente los parámetros del sistema; además, se tuvieron presentes, las siguientes consideraciones:

- La longitud del pivote danzarín sea igual a 25 cm para ambos experimentos.
- Que existiera imparcialidad, en lo referido, a los parámetros de diseño del controlador difuso. Para tal caso, se consideró trabajar, con cinco (5) conjuntos difusos de entrada tanto para la señal de error como para su derivada.
- Tanto los conjuntos difusos de entrada del error como los de su derivada, están uniformemente distribuidos, en un universo de discurso que va desde -30° hasta 30° .
- Se consideró un modelo de referencia igual para ambos métodos. Un modelo lineal de segundo orden, cuya función de transferencia, está dada por

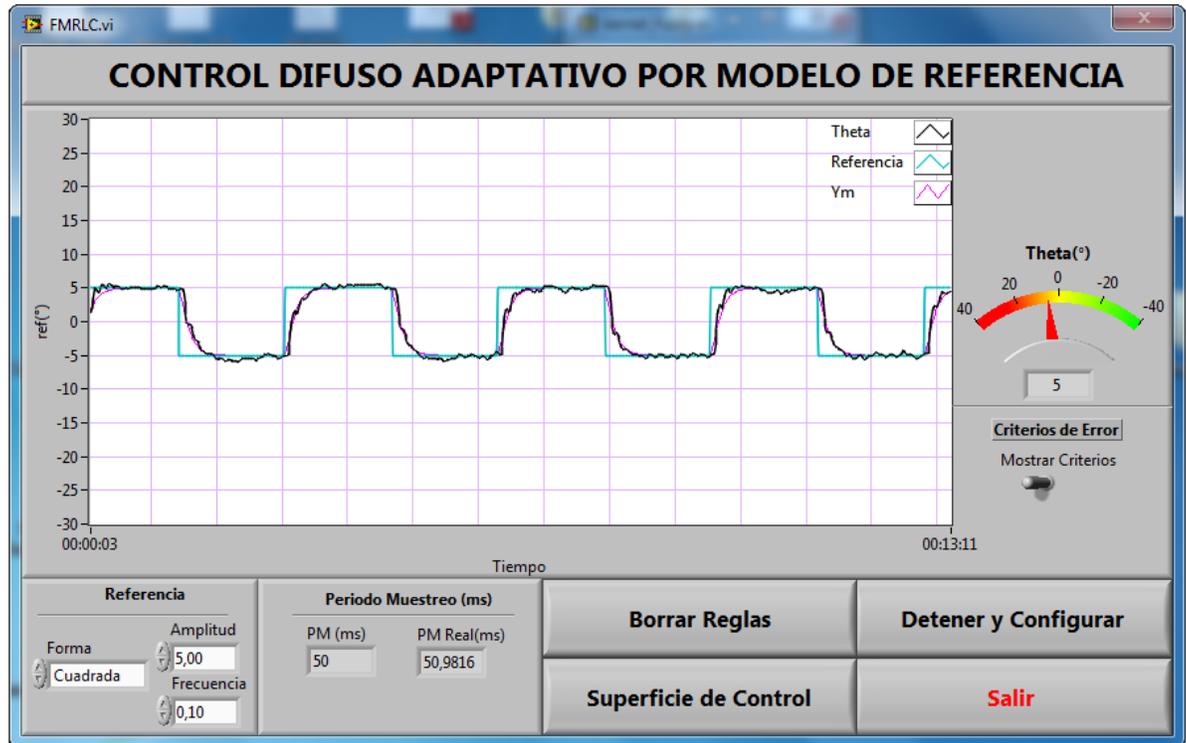
$$M(s) = \frac{s + 15}{(s + 3)(s + 5)} \quad (5)$$

- Para ambos métodos de adaptación se asumió que los conjuntos difusos de salida, fueran, en esencia, similares a los conjuntos de entrada. No obstante, el universo de discurso para los conjuntos de salida estará acotado de -20° a 20° .

Luego de tener presentes las consideraciones anteriores se procede a la ejecución de la aplicación. Recordando las secciones, 3.4 a la 3.8, y ejecutando la aplicación desde la ventana principal se obtienen los resultados.

En la Figura 18 se muestra el comportamiento del mecanismo de adaptación cuando se considera un aprendizaje constante, es decir, aquellas reglas del controlador difuso que fueron activadas, están siendo sintonizadas por una constante. Para el caso que muestra en la Figura 18, se consideró una constante con un valor de 0.045. Con la ayuda de las etiquetas ubicadas en la parte superior derecha, se pueden identificar las señales de referencia, respuesta del modelo de referencia y la respuesta de la planta. Se puede apreciar que, pese a que, las respuestas del modelo de referencia (Y_m) y la salida de la planta (Θ) se parecen; ésta última presenta muchas oscilaciones, lo que indica que no hay una sintonización fina del control, y se debe, en gran medida, al proceso de arreglo de las reglas difusas activadas.

Figura 18. Método de Adaptación Por Aprendizaje Constante



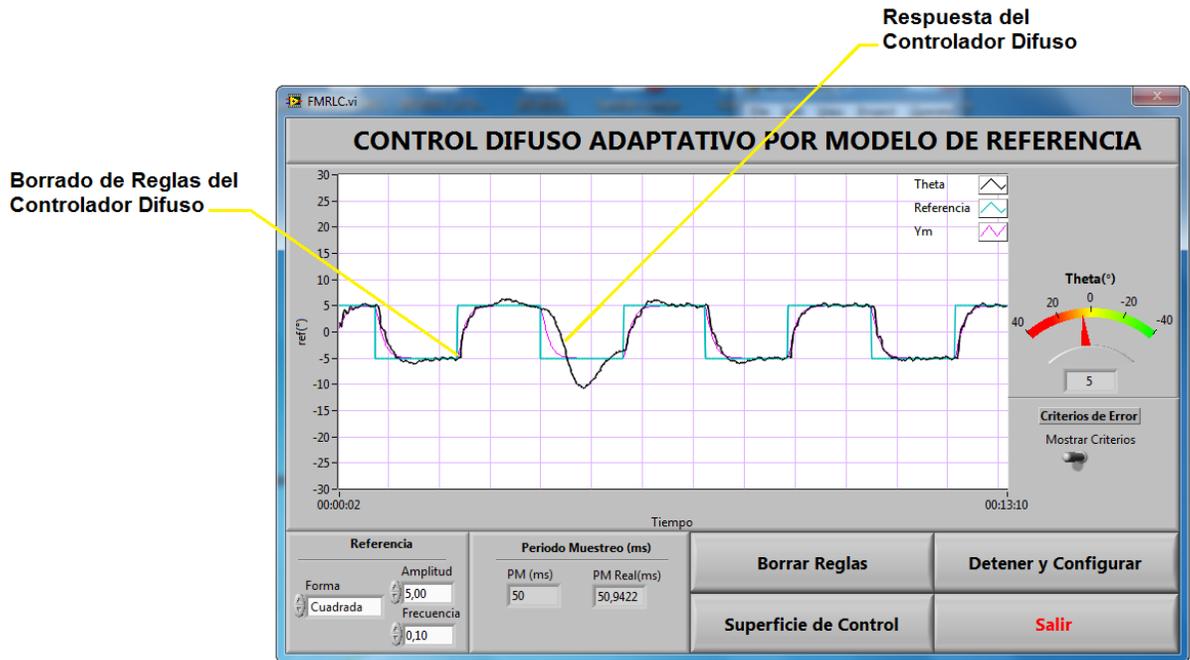
Ejecutado el mecanismo de adaptación contante, se procede a establecer los valores para los criterios de error, los cuales, determinarán si el desempeño de este mecanismo es mejor cuando se compare con el mecanismo de adaptación difusa. En la Figura 19 se pueden observar el comportamiento que presentaron los criterios de error durante la ejecución y funcionamiento del mecanismo de adaptación constante. En la sección 4.3 se realizará el análisis de los resultados obtenidos para los criterios de error.

Figura 19. Criterios de Error Para el Método de Adaptación Constante



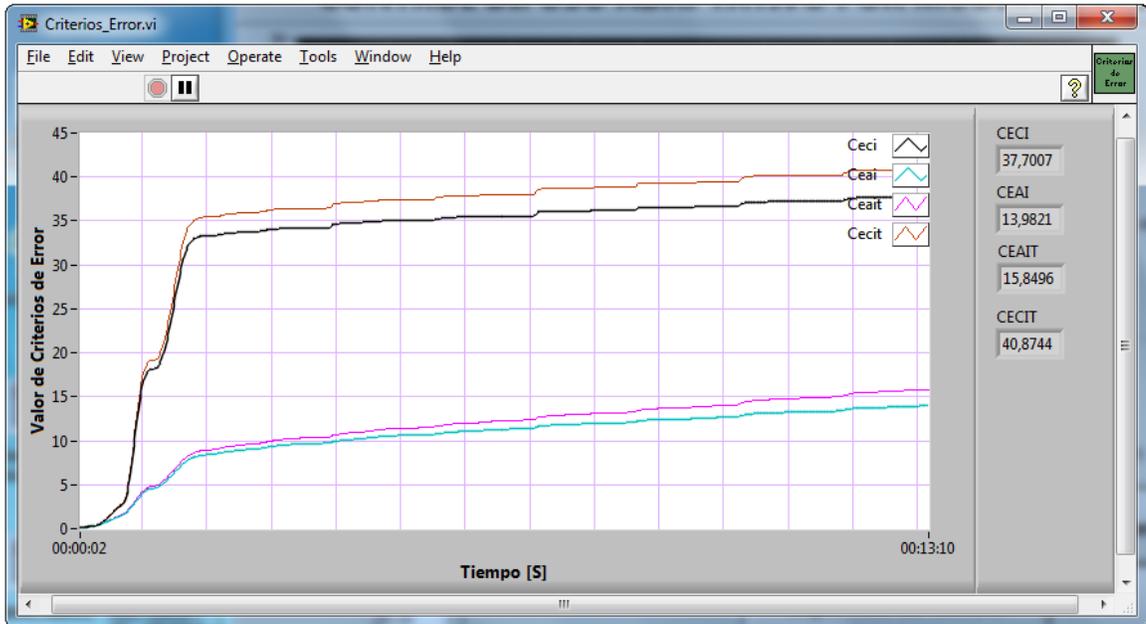
La aplicación desarrollada posee la opción de borrar las reglas del controlador difuso, con lo cual se puede observar, el comportamiento de la planta cuando el controlador no tiene información alguna acerca del proceso. En la Figura 20 se puede observar, la respuesta de la planta cuando son borradas las reglas del controlador difuso, y cómo éste, es capaz de sintonizar o adaptar sus reglas a las nuevas condiciones y lograr, de ésta manera, que la respuesta de la planta sea igual en lo posible a la respuesta obtenida con el modelo de referencia.

Figura 20. Respuesta de la Planta Con Reglas a Cero Adaptación Constante



Se realizaron mediciones de los criterios de error para el instante en cual, las reglas del controlador difuso, fueron borradas. Los valores obtenidos en dicha experimentación, son mostrados, en la Figura 21. En tal gráfica se pueden observar como todos los criterios de evaluación obtienen sus máximos valores, justamente para el caso en cual se establece el proceso de borrado de reglas.

Figura 21. Criterios de Error Con Reglas a Cero Adaptación Constante

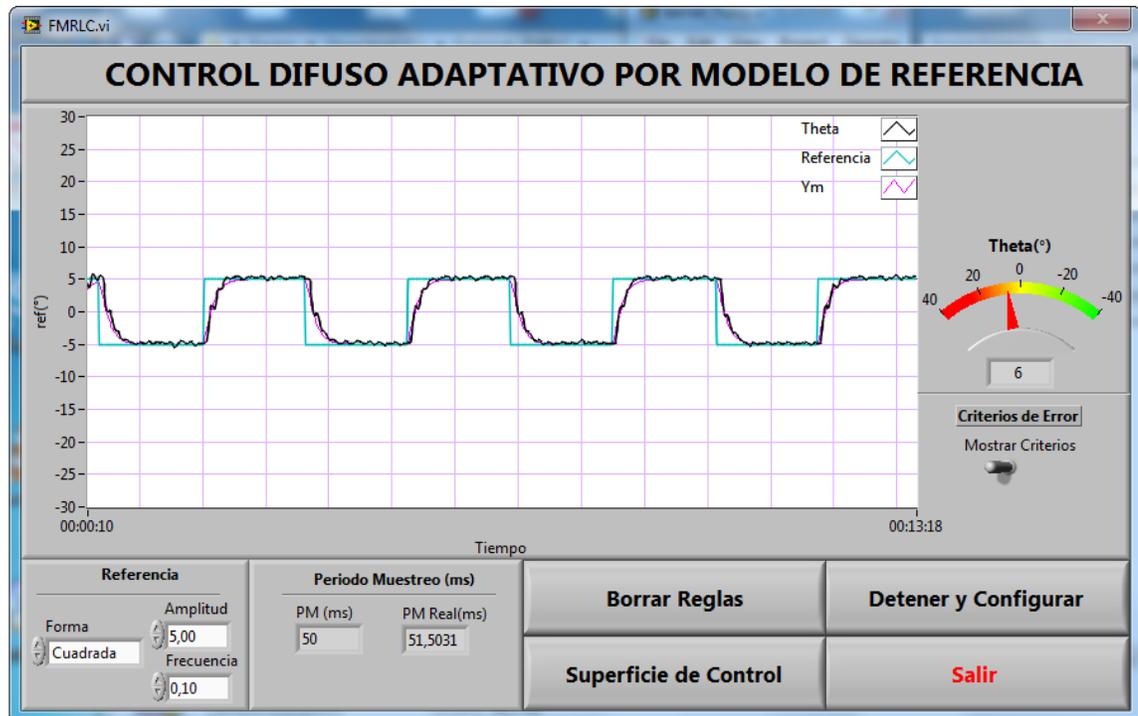


Una vez realizado el experimento con el método de adaptación constante, se procede, a realizar la ejecución de la aplicación para el caso en el cual el método de adaptación sea un modelo difuso inverso. En la Figura 22 se puede apreciar el comportamiento del controlador cuando se considera un aprendizaje basado en un modelo difuso inverso, esto quiere decir, que las reglas del controlador difuso están siendo sintonizadas por un valor generado por el procesamiento, del error y su derivada, originados por la comparación entre la respuesta real de la planta y la que se espera de un modelo de referencia. Se puede apreciar que, la señal de salida de la planta, se acondiciona al comportamiento dinámico descrito por el modelo de referencia, lo que indica, la eficiencia de este método en relación al método de adaptación por aprendizaje constante.

Una vez ejecutada la aplicación con el método de adaptación usando un modelo difuso inverso por un tiempo aproximado de 13 segundos se establecen los criterios de error, los cuales, serán utilizados para realizar las comparaciones y aseverar, de esta manera, cuál de los métodos es mejor de acuerdo a las

consideraciones inicialmente planteadas. En la Figura 23 se pueden apreciar los comportamientos que presentaron los criterios de error durante la ejecución y puesta en marcha del método adaptación usando un modelo difuso inverso.

Figura 22. Método de Adaptación Basado en Modelo Difuso Inverso



Similar a como se hizo para el método de adaptación por aprendizaje constante, se realizaron experimentaciones con las reglas del controlador difuso iguales a cero, con lo cual se evidenció, la capacidad que tiene el controlador de adaptarse a las nuevas condiciones operativas establecidas. En la figura 24 se puede apreciar, la respuesta de la planta cuando son borradas las reglas del controlador difuso. También se realizaron mediciones de los criterios de error para el instante en cual, las reglas del controlador difuso, fueron borradas. En la figura 25 de ilustran los valores tomados por los criterios de error una vez ejecutada la opción de borrado.

Figura 23. Criterios de Error Para Método de Adaptación Difusa

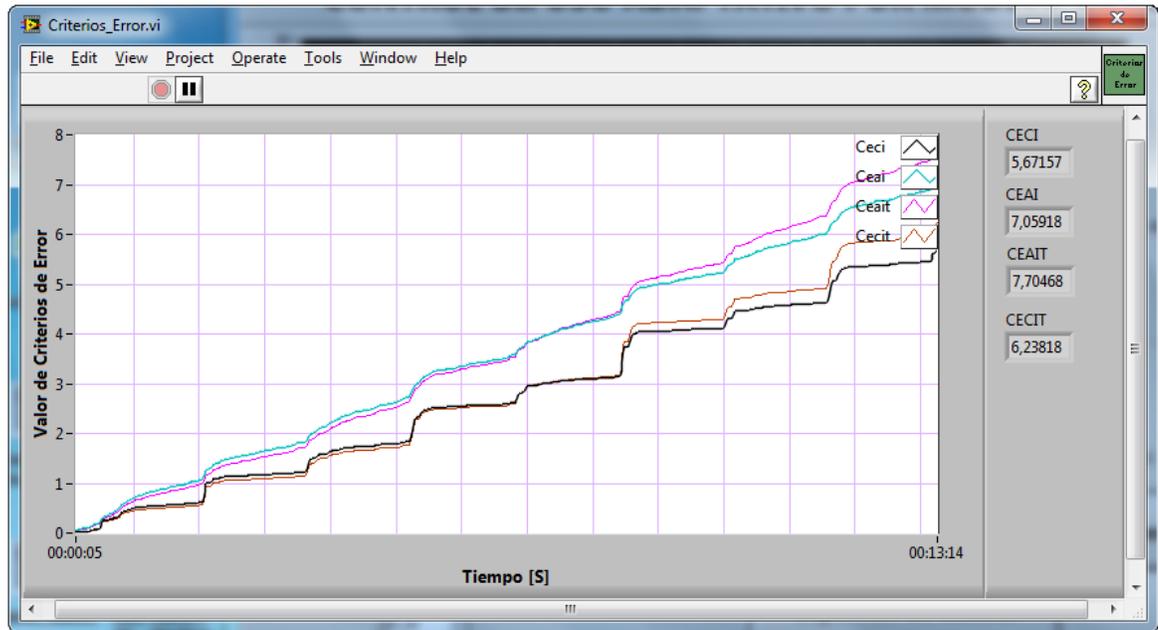


Figura 24. Respuesta de la Planta Con Reglas a Cero Adaptación Difusa

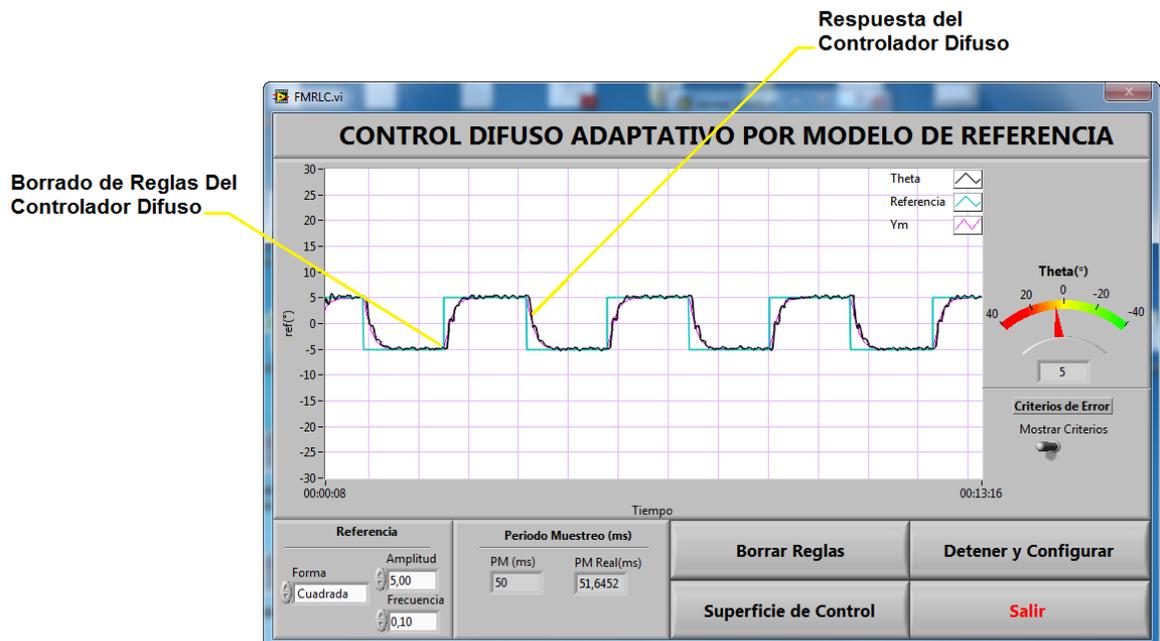
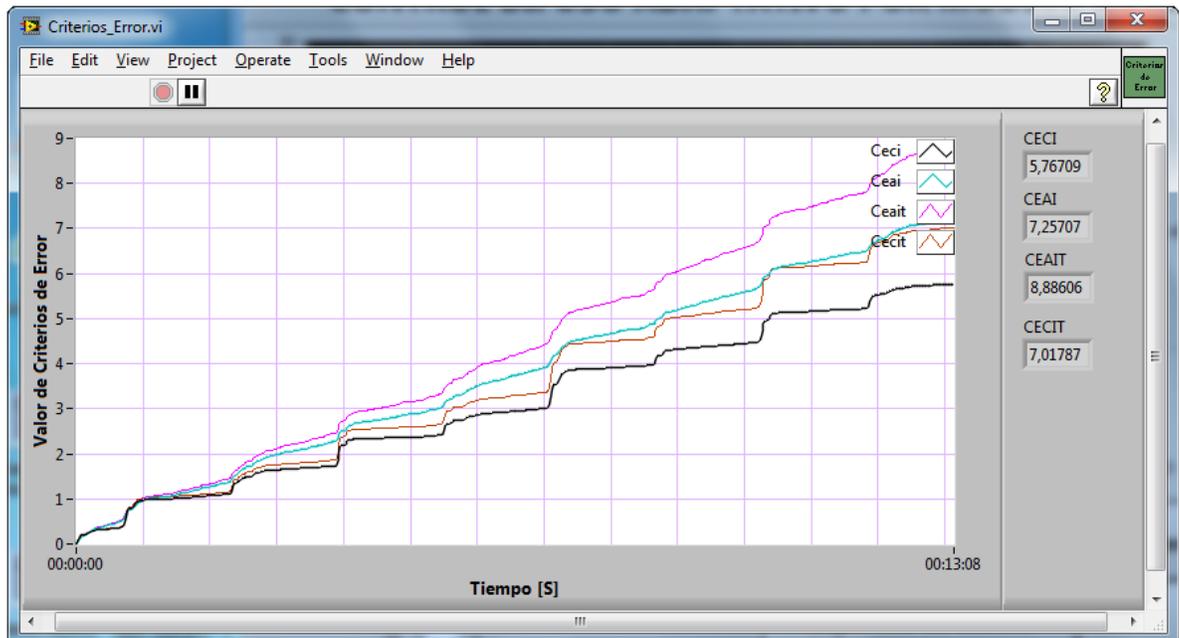


Figura 25. Criterios de Error Con Reglas a Cero Método Adaptación Difusa



4.3. Análisis de Resultados

A partir de los resultados experimentales obtenidos mediante la ejecución de la aplicación, se tienen suficientes datos, para determinar cuál de los dos (2) métodos de adaptación posee el mejor desempeño de acuerdo a las condiciones de operación establecidas y ensayadas en la sección 4.2. En dicha sección, se evidenciaron las respuestas que presenta la planta, cuando se ensayaron los métodos supuestos, además, se obtuvieron criterios de error indispensables para realizar una comparación razonada.

Con la ejecución de la aplicación, resultaba muy complicado, anotar los valores obtenidos para los criterios de error, por lo tanto, se estableció construir una gráfica e indicadores que mostraran sus valores y, determinar de ésta forma, el mejor desempeño obtenido por parte del controlador.

A partir de los datos obtenidos para los criterios integrales de error, se decidió construir la Tabla 3. En ésta, se realiza una comparación cuantitativa, de los

criterios de error cuando se ejecutan los dos métodos de adaptación considerados durante 13 segundos.

Tabla 3. Criterios de Error para Mecanismos de Adaptación Constante y Difusa

Mecanismo de Adaptación	Criterios Integrales de Error			
	CECI	CEAI	CEAIT	CECIT
Adaptación Constante	4,6	6,1	17,9	13,4
Adaptación Difusa	5,6	7,0	7,7	6,2

A partir de la tabla anterior, se puede observar que al iniciarse la aplicación, el método de adaptación difusa presenta mayor error en comparación al mecanismo de adaptación constante, esto se evidencia en los criterios CECI y CEAI, los cuales obtienen valores más grandes en comparación a los registrados por el otro método de adaptación. Sin embargo, transcurrido cierto tiempo de ejecución, el mecanismo de adaptación difusa comienza a tener un comportamiento más estable, y por tanto, los criterios CEAIT y CECIT comienzan a registrar valores más pequeños en comparación al otro mecanismo. Lo anterior se debe a que, inicialmente para el mecanismo de adaptación difusa, se debe ajustar y/o sintonizar una base de reglas difusas inversas mientras se va ejecutando la aplicación, aspecto que se diferencia del mecanismo de adaptación constante, el cual sólo debe ajustar las reglas del controlador difuso por una constante predeterminada por el usuario. La anterior condición, se convierte en una ventaja a favor del mecanismo de adaptación, pues éste logra, controlar con mayor eficiencia y exactitud el proceso, es decir, actúa con una mayor inteligencia en comparación al mecanismo de adaptación constante.

Para el caso particular del CECIT, el cual castiga los errores presentes tiempo después de haberse iniciado la ejecución, ofrece suficiente información cómo para determinar que el mecanismo de adaptación basado en la utilización de un modelo difuso inverso, brinda el mejor desempeño y ofrece mayor fiabilidad al controlador

al momento de gobernar la planta. Además de lo anterior, el mecanismo de adaptación difusa, logró que la respuesta de la planta se ajustara acertadamente con la respuesta esperada de un modelo de referencia, esto se puede observar, cuando se realiza una comparación cualitativa entre la Figura 18 y Figura 22.

Adicionalmente se decidió, realizar una medida del desempeño de los mecanismos de adaptación cuando se le imponen al controlador nuevas condiciones de operación (borrado de reglas). En la Tabla 4 se evidencian los resultados obtenidos para los criterios integrales de error cuando se ejecutó la aplicación.

Tabla 4. Criterios Integrales de Error al Realizar el Borrado de Reglas

Mecanismo de Adaptación	Criterios Integrales de Error			
	CECI	CEAI	CEAIT	CECIT
Adaptación Constante	37,7	13,9	15,8	40,8
Adaptación Difusa	5,7	7,2	8,8	7,0

Otro aspecto que refuerza el buen desempeño del mecanismo de adaptación difusa sobre el de adaptación constante, es la comparación cualitativa entre los resultados obtenidos en la Figura 20 y Figura 24. Se observa cómo el mecanismo de adaptación difusa, ajusta rápidamente, la respuesta de la planta al comportamiento definido por el modelo de referencia predeterminado por el usuario.

CONCLUSIONES

Para una adecuada utilización de la aplicación desarrollada en este trabajo es de gran importancia que los usuarios de la misma, tengan conocimientos básicos acerca de sistemas bioinspirados y, en particular, sobre lógica y controladores difusos. Por tal razón es importante presentar una base teórica acerca del tema y, especialmente, brindar conceptos relacionados con *FMRLC*.

Pese a que, por definición, el *FMRLC* no necesita del conocimiento del modelo de la planta, se debe disponer de un modelo conceptual y algunos parámetros cuantitativos de ésta, para poder escoger adecuadamente un modelo de referencia. Por lo tanto, debe tenerse un cuidado especial, al momento de considerar el modelo de referencia del *FMRLC*, pues pese a que este es definido de forma arbitraria por el diseñador, tal elección debe ser razonable.

Al comparar cuantitativa y cualitativamente los dos (2) métodos de adaptación considerados en este trabajo, se concluye, que el mecanismo de adaptación difusa posee el mejor desempeño al momento de controlar la planta. Lo anterior se respalda en el hecho que, para este mecanismo, se obtuvieron los mejores resultados para los criterios integrales de error una vez ejecutada la aplicación. Además, se evidenció que la adaptación y/o acondicionamiento de la respuesta de la planta ante una respuesta deseada descrita por un modelo de referencia, se logró, con la implementación del mecanismo adaptativo basado en reglas difusas inversas, dado al hecho que, éste mecanismo posee mayor inteligencia al momento de manipular el error y su derivada, lo cual le brinda mayor eficiencia para alcanzar la adaptación.

Para el caso particular del control de procesos existen situaciones en las cuales es preferible optar por la lógica difusa sobre otras alternativas de control clásico. Sin embargo, no siempre es conveniente utilizar controladores difusos, principalmente

en aquellos problemas de control y situaciones que han sido resueltas teniendo en cuenta, ecuaciones diferenciales y métodos matemáticos propios del control convencional.

RECOMENDACIONES

Mientras se hizo el proceso de recopilación de información e investigaciones realizadas en el tema de controladores difusos para la elaboración de este trabajo, se encontraron buenos trabajos desarrollados en la Universidad Pontificia Bolivariana acerca del tema de lógica y controladores difusos que datan de finales del año 1990 e inicios del año 2000, los cuales en general, fueron trabajos basados en simulaciones utilizando la ayuda de *Matlab*[®]. Dado lo anterior, resultaría de gran interés para la facultad de ingeniería electrónica y, en particular, para el grupo de investigación en automática de la UPB (A+D) recopilar nuevamente dichos trabajos, renovarlos e implementarlos en la máquina didáctica de control de tensión para proceso textil de la que se dispone en el laboratorio.

Con el desarrollo y ejecución de este trabajo se pretende generar un interés para que se realicen trabajos posteriores basados en la aplicación aquí desarrollada, de modo que, se permita continuar con el estudio de los controladores difusos y las técnicas de control no convencional; además, se busca invitar a los estudiantes de pregrado a familiarizarse con los temas de control inteligente y profundizar en investigaciones y trabajos futuros en esta área de la ingeniería.

Como recomendación final pueden plantearse investigaciones y trabajos posteriores a partir de este proyecto, por ejemplo, la consideración de un modelo de referencia configurado ya no como función de transferencia factorizada, sino que en su lugar sea realice un modelado en el espacio de estados haciendo los ajustes que sean necesarios para tal fin.

REFERENCIAS

BETANCUR, Manuel J. (2001). *Fuzzy Model Reference Learning Control*. Trabajo de grado Especialista en Automática. Medellín. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería. Especialización en Automática.

BETANCUR MJ, PEDRAZA M, MARÍN D. (2001). Sentido Común para Controladores Difusos: Extrapolando el FMRLC. *Energía y Computación*, 2001, #17, 10-1:68-77. Univalle, Cali, Colombia, ISSN 0121-5299.

BISHOP, Robert H. (2004). *Learning with LabView 7TM express*. New Jersey: Pearson Education, 571p.

CONGOTE ROLDÁN, Leonardo y RINCÓN GIL, Edgar. (2008). Modelo Didáctico de Control de Tensión para Proceso Textil. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Medellín. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

DUBNER, Gloria. (2010). SKA, *Square Kilometer Array*. [En Línea]. [Consulta: 4 de Junio 2011]. Disponible en: <www.iar.unlp.edu.ar/SKA/SKA-planetario-05.ppt>.

LOPERA VÉLEZ, Sergio. (2008). Desarrollo de un Control Difuso para una Máquina Textil Versión Didáctica. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Medellín. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

LOPEZ, Jesús. (2001). Lógica Difusa: Introducción y Conceptos Básicos. [En Línea]. [Consulta: 28 de Mayo 2011]. Disponible en:<http://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/FuzzyIntro.html>.

MARTÍN DEL BRIO, Bonifacio y SANZ MOLINA, Alfredo. (2002). Redes Neuronales y Sistemas Difusos. México: Alfaomega, 399p.

OGATA, Katsuhiko. (1998). Ingeniería de Control Moderna. México: Prentice Hall, 997p.

ORDÓÑEZ, R; ZUMBERGE, J; SPOONER, J; PASSINO, K. (1997). Adaptative Fuzzy Control: Experiments and Comparative Analyses. IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS. VOL 5, NO 2, MAY 1997. [En Línea]. 2002. [Consulta: 4 de Junio 2011]. Disponible en:<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=580793>.

ORTEGA MÚNERA, María. (2001). Asistencia al Proyecto Controlador Adaptativo Difuso con Autosintonía del Modelo de Referencia. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Medellín. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería. Facultad de ingeniería Eléctrica y Electrónica.

ORTIZ DE LA VEGA, Héctor (2009). Algoritmo Simple Para Sintonización de Controladores Difusos. Trabajo de grado. Maestro en Ciencias, Área Cibernética. México, DF. Universidad La Salle. [En Línea]. [Consulta: 16 de Noviembre 2012]. Disponible en:<[es.scribd.com./doc/68505292/28/Criterios-integrales-de-desempeno](http://es.scribd.com/doc/68505292/28/Criterios-integrales-de-desempeno)>.

PASSINO, Kevin y YURKOVICH, Stephen. (1998). *Fuzzy Control*. Ohio: Addison-Wesley, 475p.

PEÑARREDONDA, Tony y QUINTERO, Cesar. (2004). Controlador Borroso Con Aprendizaje Por Modelo de Referencia Utilizando Técnicas de Convolución y Afines. Trabajo de grado. Magíster en Ingeniería con énfasis en Automática. Medellín. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Formación Avanzada. Maestría en Ingeniería con énfasis en Automática.

SU, Y. ZHENG, C. DUAN, B. (2004). *Fuzzy Learning Tracking of Parallel Cable Manipulator of the Square Kilometre Array*. [En Línea]. [Consulta: 4 de Junio 2011].

Disponibile

en:

<http://www.sciencedirect.com.bibliobd.upb.edu.co/science?_ob=MImg&_imagekey=B6V43-4FWKDRD-1-1F&_cdi=5747&_user=8743942&_pii=S095741580500019X&_origin=search&_coverDate=07%2F31%2F2005&_sk=999849993&view=c&wchp=dGLbVlzSkzS&md5=ccbd5846c7f6cefc01fdc2faadc951d7&ie=/sdarticle.pdf>.

ANEXOS

ANEXO A. DIARIO DE CAMPO