

# UNIVERSIDAD DE GRANADA

Departamento de Arquitectura y Tecnología  
de los Computadores



Tesis Doctoral:

**“ESTUDIO ESTADÍSTICO DE ALGORITMOS DE  
CONTROL INTELIGENTE EN TIEMPO REAL.  
APLICACIÓN EN UNA PLATAFORMA HARDWARE  
DE CONTROL DE TEMPERATURA.”**

Presentada por: **Rafik Lasri**

Directores de Tesis:

**Dr. Ignacio Rojas**

**Dr. Héctor Pomares**

**Dr. Olga Valenzuela**

**Granada, Abril 2012.**

Editor: Editorial de la Universidad de Granada  
Autor: Rafik Lasri  
D.L.: GR 2312-2012  
ISBN: 978-84-9028-151-2



D. Ignacio Rojas Ruiz, D. Héctor Pomares Cintas, Catedrático y Profesor Titular de Universidad respectivamente del Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores y D<sup>a</sup>. Olga Valenzuela Cansino Profesora Titular de Universidad del Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Granada

## CERTIFICAN

Que la memoria titulada:

**“ESTUDIO ESTADÍSTICO DE ALGORITMOS DE CONTROL  
INTELIGENTE EN TIEMPO REAL.  
APLICACIÓN EN UNA PLATAFORMA HARDWARE  
DE CONTROL DE TEMPERATURA.”**

ha sido realizada por D. Rafik Lasri, bajo nuestra dirección en el Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada para optar al grado de Doctor en Ingeniería Informática.

Granada, a      de Abril del 2012.

Firmado por:

D. Ignacio Rojas

D. Héctor Pomares

D<sup>a</sup>. Olga Valenzuela



## Agradecimientos

*A la memoria de mi Madre...*

Con lo difícil que es expresar lo que siento en estos momentos, intentaré traducir un poco lo que pienso y siento en pocas palabras.

Sin embargo, existen numerosas universidades por todo el mundo donde se puede llevar proyectos de investigación bajo la dirección de gente muy cualificada y conseguir un sólido conocimiento científico. Personalmente me veo afortunado de haber pasado por el sistema educativo superior español, precisamente en la universidad de Granada, no solo por la gran calidad de su comunidad científica, sino por las cualidades excepcionales que dispone esta comunidad a nivel humano y social, obviamente, dichos cualidades han hecho mi estancia aquí muy cómoda y llena de buenos recuerdos, GRACIAS España.

Quiero agradecer de forma personal a D. Ignacio Rojas y a D. Héctor Pomares lo que han hecho para mí, paciencia, apoyo y motivación. GRACIAS de todo corazón.

A D<sup>a</sup>. Olga Valenzuela muchas gracias por su colaboración, ha sido de gran utilidad.

A mi familia, especialmente a mis hermanos y mis primos en granada. Sin su apoyo, realizar un trabajo así sería más difícil de lo que es.

A mi amigo Otman de haber aguantado mi comportamiento durante la elaboración de esta tesis y de escucharme en cuando más necesitaba hablar.

Finalmente, dedico este trabajo al hombre que dedicó su vida a sus hijos, el hombre que su nombre para mí es un sinónimo de los sacrificios, paciencia y amor. Mi querido padre, no tengo palabras que pueden agradecerte lo que has hecho y sigues haciendo para nosotros, no obstante, tengo muchos sentimientos y admiración para usted.

Muchas Gracias a todos...

*Rafik Lasrí*



# Tabla de Contenidos

<b>Índice de figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>xii</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>xiii</b>
<b>I. SUMARIO DE LA TESIS .....</b>	<b>2</b>
I.1.    Introducción .....	2
I.2.    Objetivos principales y nuevas aportaciones.....	4
I.2.1.    Objetivos principales .....	4
I.2.2.    Nuevas aportaciones y conclusiones .....	4
I.3.    Estructura de la tesis.....	6
<b>II. CONTROL Y LÓGICA DIFUSA.....</b>	<b>10</b>
II.1.    Enfoque histórico sobre la política de control.....	10
II.2.    El control por lógica difusa .....	12
II.2.1.    La lógica difusa .....	12
II.2.1.    Controlador lógico difuso.....	13
II.2.2.1.    Introducción .....	13
II.2.2.2.    Principio e implementación de un controlador difuso .....	14
II.2.2.3.    Estructura de un controlador difuso .....	16
II.2.2.4.    Diferentes tipos de controladores difusos .....	21
II.2.2.5.    Ventajas e inconvenientes del control por lógica difusa .....	23
II.3.    Estado de arte: controladores lógicos difusos y consumo energético .....	24
II.3.1.    Introducción.....	24
II.3.1.1.    Control inteligente.....	24
II.3.1.2.    Controladores lógicos difusos .....	25
II.3.2.    Control lógico difuso en diversos campos de la vida humana .....	27
II.3.2.1.    Aplicaciones biomédicas.....	27



II.3.2.2.	Aplicaciones en vehículos de transporte .....	30
II.3.2.3.	Aplicaciones en la robótica .....	32
II.3.2.4.	Aplicaciones en ingeniería eléctrica.....	33
II.3.2.5.	Aplicaciones en procesos químicos.....	34
II.3.2.6.	Aplicaciones con sistemas híbridos.....	35
II.3.3.	Consumo energético y control lógico difuso .....	36
<b>III.</b>	<b>SISTEMA REAL UTILIZADO -ENTORNO EXPERIMENTAL - .....</b>	<b>40</b>
III.1.	Descripción general de la maqueta utilizada.....	40
III.2.	Dispositivos incorporados en la maqueta.....	41
III.3.	Experimentos de control incorporados.....	46
III.4.	Control de temperatura: preparación de la plataforma .....	48
III.5.	Proceso de programación y de comunicación con la plataforma .....	51
III.5.1.	Funciones principales del ICP usadas en la programación del proceso ...	52
III.6.	Resumen del entorno experimental .....	56
<b>IV.</b>	<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES USADOS</b>	<b>58</b>
IV.1.	Diseño e implementación de controladores de tipo P, I y D .....	58
IV.1.1.	Sintonización del controlador PID .....	59
IV.1.2.	Sintonización real de los controladores de estructura P, I y D .....	60
IV.1.3.	Algoritmo del controlador PID.....	61
IV.2.	Diseño e implementación real del controlador lógico difuso estático.....	63
IV.2.1.	Selección de las variables y del universo de discurso .....	63
IV.2.2.	Selección de la estrategia de fuzzificación .....	65
IV.2.3.	Construcción de la base de reglas.....	66
IV.2.4.	Selección de la estrategia de defuzzificación .....	67
IV.3.	Diseño e implementación real del controlador lógico difuso adaptativo .....	70
IV.3.1.	Introducción.....	70
IV.3.1.1.	Enfoque sobre la estabilidad del proceso de control .....	73
IV.3.2.	Planteamiento del problema .....	74

IV.3.3.	Arquitectura de control.....	76
IV.3.4.	Primera etapa: Adaptación de los consecuentes de las reglas .....	78
IV.3.4.1.	Requisitos exigidos al sistema auxiliar $ca_1$ .....	79
IV.3.5.	Segunda etapa: Optimización de las funciones de pertenencia .....	83
IV.3.6.	Temporización del proceso de adaptación.....	85
IV.3.7.	Resumen y mejoras en el proceso de adaptación .....	85
IV.3.7.1.	Mejoras generales: el rango del actuador.....	86
<b>V.</b>	<b>SIMULACIÓN REAL .....</b>	<b>88</b>
V.1.	Control de temperatura usando controladores de tipo PID .....	89
V.2.	Control de temperatura usando un Controlador Lógico Difuso .....	94
V.3.	Control de temperatura usando el controlador adaptativo.....	96
V.3.1.	Controlador adaptativo I: Adaptación de los consecuentes de las reglas .	97
V.3.2.	Controlador adaptativo II: Adaptación de los consecuentes de las reglas y optimización de las funciones de pertenencia .....	100
V.4.	Comparación de los resultados.....	103
V.4.1.	Precisión del proceso de control.....	104
V.4.2.	Consumo eléctrico del proceso de control.....	107
V.4.3.	Efecto del tiempo de muestreo .....	111
V.4.4.	Efecto de las perturbaciones .....	115
<b>VI.</b>	<b>ANÁLISIS INFERENCIAL .....</b>	<b>120</b>
VI.1.	Enfoque teórico .....	121
VI.2.	Análisis de la varianza del error registrado (ECM) y del consumo eléctrico (CE)...	123
VI.2.1.	Análisis de la varianza (ANOVA) para el error del control .....	124
VI.2.2.	Análisis de la varianza (ANOVA) para el Consumo Eléctrico .....	128
VII.3.	Análisis de la varianza del error registrado (ECM) del proceso de control bajo perturbaciones .....	131
VI.4.	Conclusión.....	136

<b>VII. CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJOS PUBLICADOS .....</b>	<b>140</b>
VII.1. Conclusiones y aportaciones .....	140
VII.2. Trabajos publicados.....	142
<b>Apéndice A .....</b>	<b>143</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>145</b>

## Índice de figuras

Figura II.1:	Ejemplo de definición de conjuntos en el universo de discurso con lógica binaria y lógica difusa.....	12
Figura II.2:	Proceso general de la implementación de un controlador lógico difuso.....	15
Figura II.3:	Estructura de base de un controlador difuso.....	17
Figura II.4:	Método de fuzzificación para medidas correctas.....	17
Figura II.5:	Método de fuzzificación para una medida inexacta.....	18
Figure II.6:	Diferentes métodos de defuzzificación.....	20
Figura II.7:	Modelo difuso de tipo Mamdani.....	21
Figura II.8:	Modelo difuso de Takagi – Sugeno.....	23
Figura II.9:	Esquema del método del control clínico para el bloqueo neuromuscular.....	29
Figura II.10:	Robot con inteligencia lógica difusa incorporada.....	33
Figura III.1:	La plataforma Sensonyc utilizada en el experimento.....	41
Figura III.2:	Servomotor modelo Futaba S3003.....	42
Figura III.3:	Micro-placas solares.....	42
Figura III.4:	Ventilador de corriente continua.....	43
Figura III.5:	Sensor de temperatura.....	43
Figura III.6:	Bombilla con encendido electrónico ajustable.....	43
Figura III.7:	Solenoid/electroimán de armadura abierta.....	44
Figura III.8:	Sensor óptico de ranura.....	44
Figura III.9:	Zumbador piezo-eléctrico de estado sólido.....	45
Figura III.10:	Conmutadores de configuración.....	45
Figura III.11:	Conmutadores digitales.....	45
Figura III.12:	Conmutadores de configuración.....	46
Figura III.13:	Escala de leds.....	46
Figura III.14:	Conexión general de entradas y salidas de la plata forma.....	48

Figura III.15:	Módulo ICP utilizado.....	49
Figura IV.1:	Primeras oscilaciones reales del sistema usando la ganancia $K_{pu}$ .....	61
Figura IV.2:	Diseño paralelo de un controlador PID.....	62
Figura IV.3:	Algoritmo de programación del PID digital.....	62
Figura IV.4:	Distribución de variables de entrada y salida dentro de sus rangos de actuación presentados con las etiquetas lingüísticas.....	68
Figura IV.5:	Diagrama de bloques de la arquitectura de control adaptativo.....	76
Figura IV.6:	Organigrama del algoritmo propuesto.....	77
Figura V.1:	Evolución del proceso de control usando el controlador PD para el primer conjunto de puntos de referencia.....	90
Figura V.2:	Evolución del proceso de control usando el controlador PD para el segundo conjunto de puntos de referencia.....	91
Figura V.3:	Evolución del proceso de control usando el controlador PI para el primer conjunto de puntos de referencia.....	92
Figura V.4:	Evolución del proceso de control usando el controlador PI para el segundo conjunto de puntos de referencia.....	92
Figura V.5:	Evolución del proceso de control usando el controlador PID para el primer conjunto de puntos de referencia.....	93
Figura V.6:	Evolución del proceso de control usando el controlador PID para el segundo conjunto de puntos de referencia.....	94
Figura V.7:	Evolución del proceso de control usando el controlador Lógico Difuso para el primer conjunto de puntos de referencia.....	95
Figura V.8:	Evolución del proceso de control usando el controlador Lógico Difuso para el segundo conjunto de puntos de referencia.....	95
Figura V.9:	Evolución del proceso de control usando el controlador Adaptativo I para el primer conjunto de puntos de referencia.....	99
Figura V.10:	Evolución del proceso de control usando el controlador Adaptativo I para el segundo conjunto de puntos de referencia.....	99
Figura V.11:	Evolución del proceso de control usando el controlador Adaptativo II para el primer conjunto de puntos de referencia.....	101
Figura V.12:	Evolución del proceso de control usando el controlador Adaptativo II para el segundo conjunto de puntos de referencia.....	102
Figura V.13:	Funciones de pertenencia de las dos entradas antes y después del proceso de optimización de la segunda etapa del controlador adaptativo.....	102

Figura V.14:	Curva representativa de la función Diferencia del error entre el controlador adaptativo II y el resto de los controladores durante los primeros 40 minutos del proceso de control para lograr el mismo punto de referencia.....	105
Figura V.15:	Evolución del consumo eléctrico de todos los controladores usados durante 200 minutos de simulación usando el primer conjunto de puntos de referencia....	109
Figura V.16:	Evolución del Consumo Eléctrico (CE) del proceso de control usando el controlador adaptativo II en función del tiempo de muestreo.....	111
Figura V.17:	Evolución del Error Cuadrático Medio (ECM) del proceso de control usando el controlador adaptativo II en función del tiempo de muestreo.....	112
Figura V.18:	Evolución del proceso de control del controlador adaptativo II y el controlador difuso usando un tiempo de muestro $T_m = 3T_m/2$ .....	113
Figura V.19:	Evolución del proceso de control del controlador adaptativo II y el controlador difuso usando un tiempo de muestro $T_m = 2T_m$ .....	113
Figura V.20:	Efecto de la perturbación sobre el proceso de control usando el controlador adaptativo.....	115
Figura V.21:	Efecto de la perturbación sobre el proceso de control usando el controlador difuso.....	116
Figura VI.1:	Evolución del control usando el controlador adaptativo para los dos conjuntos de puntos de referencia utilizados.....	120
Figura VI.2:	Medias del ECM para los dos tipos de conjuntos.....	125
Figura VI.3:	Medias del ECM para todos los controladores usados.....	126
Figura VI.4:	Medias del CE para los dos tipos de conjuntos.....	128
Figura VI.5:	Medias del CE para todos los controladores usados.....	130
Figura VI.6:	Medias del ECM para los dos tipos de conjuntos.....	134
Figura VI.7:	Medias del ECM para los dos controladores usados.....	135

## Índice de tablas

Tabla II.1:	Matriz de Macvicar-Whelan.....	22
Tabla IV.1:	Formulas para la sintonización del controlador en lazo cerrado.....	60
Tabla IV.2:	Reglas difusas del controlador lógico difuso diseñado.....	67
Tabla V.1:	Distintos índices de Error Cuadrático Medio (ECM) de todos los controladores usados.....	106
Tabla V.2:	El coste eléctrico real de cada controlador durante el proceso de control usando el primer conjunto de puntos de diferencia.....	110
Tabla V.3:	ECM y CE del controlador adaptativo II durante el proceso de control para distintos tiempo de muestreo.....	114
Tabla V.4:	ECM y CE del controlador difuso durante el proceso de control para distintos tiempo de muestreo.....	114
Tabla V.5:	Error cuadrático medio 10 minutos antes y después de causar las perturbaciones para los dos controladores (Adaptativo y difuso).....	117
Tabla VI.1:	Arquitectura básica de la tabla ANOVA.....	121
Tabla VI.2:	ECM y CE obtenidos en cinco simulaciones usando el primer conjunto de puntos de referencia para todos los controladores usados.....	122
Tabla VI.3:	ECM y CE obtenidos en cinco simulaciones usando el segundo conjunto de puntos de referencia para todos los controladores usados.....	122
Tabla VI.4:	Análisis de la varianza para el ECM (Suma de Cuadrados Tipo III).....	123
Tabla VI.5:	Análisis de la varianza para el CE (Suma de Cuadrados Tipo III).....	127
Tabla VI.6:	ECM obtenido en cinco simulaciones usando el primer conjunto de puntos de referencia bajo dos tipos de perturbaciones con diferentes grados.....	131
Tabla VI.7:	ECM obtenido en cinco simulaciones usando el segundo conjunto de puntos de referencia bajo dos tipos de perturbaciones con diferentes grados.....	131
Tabla VI.8:	Análisis de Varianza para ECM (Suma de Cuadrados Tipo III).....	132

## Resumen

El trabajo realizado durante la elaboración de esta tesis doctoral presenta una contribución al campo del control adaptativo difuso y de auto-aprendizaje. Bien precisamente, el presente trabajo presenta una metodología de adaptación capaz de adaptar y reorganizar los parámetros internos del controlador adaptativo difuso en tiempo real apoyándose de forma exclusiva sobre la información de entrada/salida obtenida del propio funcionamiento de la planta. En otras palabras, se puede controlar la planta sin necesidad de hacer una modelación matemática del proceso controlado. El controlador y de forma autónoma puede llevar a cabo el proceso de control satisfactoriamente utilizando su rígido sistema de auto-aprendizaje que le permite aprender en tiempo real el comportamiento de la variable controlada, dicho sistema contiene dos etapas esenciales. La primera etapa se encarga de adaptar los consecuentes de las reglas corrigiendo los consecuentes responsables del deficiente estado de la planta, mientras que en la segunda etapa se intenta optimizar el espacio de las entradas redistribuyendo las funciones de pertenencia para tener antecedentes más adecuadas que podrán influir en el mejoramiento de la precisión del control.

Mediante un proceso de control de temperatura en tiempo real, el controlador adaptativo propuesto y un conjunto de controladores convencionales se ponen en prueba bajo las mismas condiciones para evaluar el comportamiento de cada uno de ellos y mediante distintas medidas de comparaciones cualitativas y cuantitativas se destaca la superioridad de la metodología propuesta respecto a la precisión del control y de forma novedosa, respecto al coste energético del proceso de control, ya que muy pocos son los trabajos que figuran en la literatura que presentan sistemas capaces de garantizar un cierto nivel de ahorro energético durante los procesos de control. Por otro lado, la robustez del controlador adaptativo frente a varios tipos de perturbaciones imprevistas se demuestra claramente.

Por último, se realiza un análisis estadístico de las conclusiones extraídas de las comparaciones realizadas, este análisis usa como conjunto de muestreo los resultados de un amplio conjunto de simulaciones reales usando todos los controladores usados bajo las mismas condiciones y con dos conjuntos de puntos de referencia diferentes. Los resultados obtenidos ilustran la validez de todas las conclusiones previamente sacadas.





# Capítulo I

## “SUMARIO DE LA TESIS”

### *Resumen:*

En este capítulo se presenta una introducción general sobre el control inteligente y los principales objetivos propuestos en la presente memoria, junto con las motivaciones del desarrollo de las políticas de control, destacando las principales aportaciones novedosas que se han realizado en el ámbito de sistemas de control adaptativos. Finalmente se presenta la estructura de la presente tesis, resumiendo brevemente cada uno de los capítulos que la componen.

# **I. SUMARIO DE LA TESIS**

## **I.1. Introducción**

La teoría del control conoció un experimentado inmenso en tema de políticas, técnicas y objetivos, partiendo de los primeros controladores lineales [Zieg, 42] hasta llegar a los primeros modelos de controladores que disponen de alto grado de independencia, adaptativos y auto-ajustables [Proc, 79]. Sin embargo, el crecimiento de la complejidad de los sistemas físicos y la aparición de nuevas plantas que presentan serias restricciones han sido uno de los principales motivos para los avances en este campo de investigación. Numerosas son las metodologías usadas para superar estas restricciones y cumplir con las nuevas demandas. La mayoría de los controladores clásicos o convencionales requieren el modelo matemático de las plantas controladas. Esa dependencia limita el uso de este tipo de controladores ya que la aparición de nuevas plantas más complejas hace que la obtención del modelo matemático sea una tarea muy difícil o incluso a veces imposible. De hecho, liberar los procesos del control de la dependencia del modelo matemático fue un salto muy relevante hacia un nuevo entorno de investigación.

La aparición de los controladores difusos capaces de controlar plantas sin pasar por la modelación matemática fue realizada por primera vez en el año 1974 [Mamd, 74] un poco después de la introducción de la teoría de lógica difusa por el profesor Lotfi Zadeh en 1965 [Zadeh, 65]. Dichos controladores no solo han sido una buena alternativa en los casos donde los modelos matemáticos son muy complejos o difícil a encontrar, sino también han podido aportar grandes ventajas en tema de precisión y robustez [Chen, 03], en otras palabras, para los controladores la política de control dejó de ser convencional y clásica, ya que el avance en este campo justifica el uso del término control “inteligente”. En cierto sentido, los problemas de control abordados en el área del control usando las nuevas técnicas que no son clásicas y las que podemos llamar “inteligente” pueden ser vistos como versiones ampliadas, más ambiciosas y generales de los problemas planteados en el control clásico convencional [Antsa, 94]. Es más, estos problemas presentan requisitos adicionales que los métodos tradicionales no pueden satisfacer. Como consecuencia, el control inteligente se convierte en un ámbito interdisciplinar en el que se combinan métodos y teorías de áreas diversas, como son el control, las ciencias computacionales y la investigación operativa.

Por otro lado, los controladores difusos considerados como “inteligentes” presentan un interesante ámbito de investigación y de desarrollo [Antsa, 94; Gupta, 00; Ange, 02], de hecho, un poco más tarde del uso de los primeros modelos de los controladores difusos, empezó el debate científico sobre las posibles mejoras y las posibilidades de aumentar el grado de independencia de estos últimos, lo que se ha traducido en la elaboración de controladores difusos adaptativos que disponen de alto grado de independencia y auto-aprendizaje [Proc, 79], dichas características han ilustrado y han justificado de forma muy general el uso del término “control inteligente” [Schaal, 10].

En general y de forma resumida, a diferencia de los sistemas de control convencional y clásico, los sistemas de control inteligente cuentan con una alta capacidad de adaptación y autonomía frente a cambios imprevistos [Antsa, 94]. Sin embargo, el aprendizaje es el factor clave para lograr dichos objetivos. De forma básica, los modelos de aprendizaje para el control se plantearon como un medio para mejorar el rendimiento limitado causado por las diferencias del modelado de sistemas no lineales, ya que permitían incorporar la experiencia obtenida a través de la interacción directa con la propia planta [Gupta, 00]. Hoy en día, su uso se ha extendido a un rango más amplio, que incluye el manejo de incertidumbres ambientales, de problemas de desgaste en los actuadores y mecanismos, etc. [Ange, 02; Doctor, 05; Schaal, 10].

La evolución de las políticas de control y de los controladores se puede considerar como una migración hacia nuevas perspectivas donde los sistemas clásicos tienen serias limitaciones, esa migración tiene que ser justificada mediante los comportamientos de los nuevos sistemas, de hecho, para los controladores adaptativos y auto-organizativos - sin perder la generalidad para cualquier otra nueva estrategia de control- tendrán que demostrar y justificar su eficacia y cumplir con los requisitos por lo cual fueron los principales motivos para su diseño. Sin embargo, probar una nueva política de control en un proceso de control en tiempo real simultáneamente con otros controladores convencionales bajo las mismas condiciones puede enfocar de forma amplia sobre las aportaciones de la nueva metodología, el análisis y la comparación de los resultados obtenidos justificarán la necesidad de diseñar un sistema de control distinto a los convencionales.

## **I.2. Objetivos principales y nuevas aportaciones**

### **I.2.1. Objetivos principales**

El principal objetivo de esta tesis es demostrar la superioridad de la nueva metodología de adaptación y de auto-organización del controlador difuso adaptativo diseñado frente a otros algoritmos de control convencional. Durante las diferentes etapas de este trabajo se procede a aclarar las ventajas y las mejoras que presenta la nueva metodología propuesta en varios aspectos del proceso de control.

Después de implementar y sintonizar varios tipos de controladores convencionales, se procede al diseño del controlador difuso adaptativo y auto-organizativo. Mediante un sistema real de control de temperatura, todos los controladores previamente diseñados se ponen a prueba en tiempo real bajo las mismas condiciones de trabajo, de modo que cada uno de ellos tendrá que trabajar con la política de control específica de dicho controlador en un proceso de control real para proceder a la obtención de distintas medidas de robustez y precisión que permitirán realizar comparaciones cuantitativas y cualitativas de los resultados obtenidos.

Por último, un análisis estadístico inferencial de los resultados obtenidos podrá sin embargo apoyar nuestra propuesta y conclusiones, ya que analizar la varianza de un conjunto de resultados obtenidos repitiendo el proceso de control varias veces para cada algoritmo y con dos conjuntos de puntos de referencia diferentes podrá destacar la validez de estos resultados y generalizar las conclusiones extraídas para todas las simulaciones futuras mediante la herramienta estadística ANOVA (del inglés , *Analysis Of Variance*).

### **I.2.2. Nuevas aportaciones y conclusiones**

Generalmente, podemos presentar las principales aportaciones de esta tesis en dos partes. La primera parte se trata de las características y las prestaciones que presenta la nueva estructura del controlador adaptativo, mientras que en la segunda parte el principal aporte estriba en la cualidad de la señal generada por el controlador mismo, siguientemente detallaremos las dos partes:

#### **❖ *Primera parte:***

La nueva metodología adoptada en este trabajo permite controlar una planta sin disponer de un conocimiento completo del proceso físico, es decir, con muy poca

información, salvo información básica sobre el signo de la monotonía y el retardo de la planta. Con solo esta información podemos llevar el proceso de control de forma muy eficaz. La construcción del controlador adaptativo difuso se hace apoyándose sobre la información de entrada/salida obtenida del propio funcionamiento de la planta. Por la base de reglas del controlador, con la nueva metodología no es necesario asignar reglas ya que se puede empezar el proceso de control con reglas a priori aleatorias o incluso con una estructura vacía. Esto debido a que el controlador adaptativo, tal como indica su nombre, se irá adaptándose en tiempo real con la situación actual de la planta exigiendo la corrección adecuada para las reglas responsables del estado indeseado acercando cada vez más al punto de referencia exigido por el usuario, aprendiendo con el tiempo cómo reaccionar con el comportamiento de la planta.

Por otro lado, para proporcionar mayor robustez al método de aprendizaje, se procede a modificar la estructura del controlador, redistribuyendo las funciones de pertenencia. Dicha etapa se basa esencialmente en el análisis de la superficie de error a lo largo de todo el rango de operación del sistema, intentando igualar la contribución del error en este rango. Para ello se muevan las funciones de pertenencia a las zonas más necesitadas (las que producen mayor error) para garantizar el equilibrio en la contribución homogénea del error por toda la superficie.

De forma resumida, citamos las principales propiedades de la metodología de adaptación presentada en esta tesis:

- ✓ Con un conocimiento cualitativo sobre la planta (retardo y el signo de la monotonía) se puede iniciar el proceso de control adaptativo en tiempo real, garantizando la convergencia de la variable controlada hacia el punto de referencia, es decir, la estrategia propuesta no requiere un modelo de la planta, ni sus ecuaciones diferenciales, a diferencia de otros métodos propuestos en la literatura [Gao, 03; Phan, 08].
- ✓ Ausencia de cualquier tipo de conocimiento previo sobre la política de control. Tal y como se ha mencionado previamente, el controlador puede empezar a funcionar con reglas asignadas a cero y se auto-ajuste en tiempo real, mientras controla la planta.
- ✓ El controlador adaptativo presenta un alto nivel de robustez frente a cualquier tipo de perturbación ya que su capacidad de adaptación le permite entender y

aprender cómo reaccionar en situaciones imprevistas en tiempo real satisfactoriamente.

❖ **Segunda parte:**

Además de las valiosas características presentadas previamente, el controlador adaptativo, mediante su estrategia de corrección del estado de la planta, puede generar una señal de control que garantiza a la vez un control eficaz, preciso-robusto y un funcionamiento muy moderado del actuador, es decir, la señal generada por el controlador oscila casi siempre por el medio del rango del actuador, ofreciéndole la oportunidad de funcionar cómodamente sin afectar los principales objetivos del proceso de control, lo que se refleja directamente en el bien estar del actuador y también influirá positivamente sobre el consumo energético, el cual sería menos comparándolo con otros controladores clásicos o sistemas difusos en el mismo proceso de control y bajo las mismas condiciones. De hecho, nuestro controlador difuso adaptativo, además de garantizar las principales características de un control robusto y eficaz, puede ahorrar y economizar el coste energético durante el proceso de control. Una revisión de la literatura en las últimas décadas muestra que el tema del ahorro energético en procesos de control no ha sido excesivamente abordada, ya que muy pocos son los trabajos que han podido presentar sistemas de control que pueden garantizar un cierto nivel de ahorro energético en los procesos de control, utilizando en la mayoría de los casos los controladores como sistemas que administran el uso de los recursos para optimizar el coste energético [Reza, 02; Prag, 02; Yao, 05; Shuo, 06; Chi, 09; Bai, 10] a diferencia del caso presentado en esta tesis donde la salida directa del controlador propuesto se encarga de esta optimización [Lasri, 12].

### **I.3. Estructura de la tesis**

El trabajo realizado durante la elaboración de esta tesis se presenta en varios capítulos, cuyo contenido se resume de la forma siguiente:

**Capítulo I. Sumario de la tesis:** En este capítulo se presenta una introducción general sobre el control inteligente y los principales objetivos propuestos en la presente memoria, junto con las motivaciones del desarrollo de las políticas de control, destacando las principales aportaciones novedosas que se han realizado en el ámbito de sistemas de control adaptativos. Finalmente se presenta la estructura de la presente tesis, resumiendo brevemente cada uno de los capítulos que la componen.

**Capítulo II. Control y lógica difusa:** En este capítulo se presenta un enfoque histórico sobre la política de control, su origen y los principales avances hasta la fecha que se han realizado en el ámbito de sistemas de control difuso. Se procede a definir los controladores lógicos difusos explicando los pasos necesarios para implementar dichos controladores y discutiendo las distintas estructuras y tipos que puede tomar un controlador difuso usando los distintos operadores y mecanismos. Se presenta también, un amplio resumen del intensivo uso de los controladores difusos durante los diez últimos años, destacando su gran aporte en el área del control inteligente en diversos aspectos de la vida humana. Finalmente, se presentan algunos ejemplos que figuran en la literatura que han presentado modelos de control capaces de garantizar un cierto nivel de ahorro energético.

**Capítulo III. Sistema real utilizado Entorno experimental:** En este capítulo se muestra el sistema real utilizado para probar todos los algoritmos de control diseñados en esta tesis. Se presenta en detalle dando explicaciones sobre su funcionamiento y su modo operatorio, también se presentan algunas funciones especiales usadas en el proceso de programación de los controladores.

**Capítulo IV. Diseño e implementación de los controladores usados:** En este capítulo se abordará profundamente los pasos seguidos en el diseño e la implementación de cada uno de los controladores utilizados en la tesis. Especialmente, las diferentes etapas de la nueva metodología de control difuso adaptativo propuesta, explicando en detalle el proceso de adaptación de los consecuentes de las reglas del controlador adaptativo y el proceso de optimización de sus funciones de pertenencia.

**Capítulo V. Simulación real:** En este capítulo se procede a presentar todos los resultados obtenidos en tiempo real de cada algoritmo, mediante varios gráficos y tablas que recapitulan el rendimiento de los controladores durante el mismo proceso de control. También se presentan varios procesos de comparaciones cualitativas y cuantitativas que aclaran las diferencias que existen entre ellos en tema de precisión del control y del consumo energético durante el proceso de control. Seguidamente, se procede a identificar el comportamiento de los principales controladores frente a



distintos tipos de perturbaciones y frente a posibles cambios en los parámetros del proceso de control como por ejemplo el tiempo de muestreo.

**Capítulo VI. Análisis estadístico:** Después de presentar los resultados e interpretarlos, se procede a probar la validez de los mismos en este capítulo. Mediante el uso de la técnica de análisis de la varianza (ANOVA), se puede destacar si las conclusiones obtenidas a partir de las simulaciones reales son estadísticamente significativas para todos los futuros experimentos o han sido producto del azar. Repitiendo el proceso de control cinco veces para cada controlador y usando dos conjuntos diferentes de puntos de referencia nos garantiza un adecuado conjunto de datos que será utilizado como una muestra para el análisis estadístico inferencial que podrá destacar la validez de los resultados de la metodología propuesta, que son en este caso las conclusiones obtenidas de las distintas comparaciones realizadas en el capítulo anterior.

**Capítulo VII. Conclusiones y lista de publicaciones:** Este capítulo resume las principales aportaciones y conclusiones extraídas del trabajo presentado en esta tesis doctoral. El capítulo presenta también las publicaciones realizadas durante la elaboración del presente trabajo de investigación.

# Capítulo II

## “CONTROL Y LÓGICA DIFUSA”

### *Resumen:*

En este capítulo se presenta un enfoque histórico sobre la política de control, su origen y los principales avances hasta la fecha que se han realizado en el ámbito de sistemas de control difuso. Se procede a definir los controladores lógicos difusos explicando los pasos necesarios para implementar dichos controladores y discutiendo las distintas estructuras y tipos que puede tomar un controlador difuso usando los distintos operadores y mecanismos. Se presenta también, un amplio resumen del intensivo uso de los controladores difusos durante los diez últimos años, destacando su gran aporte en el área del control inteligente en diversos aspectos de la vida humana. Finalmente, se presentan algunos ejemplos que figuran en la literatura que han presentado modelos de control capaces de garantizar un cierto nivel de ahorro energético.

## II. CONTROL Y LÓGICA DIFUSA

### II.1. Enfoque histórico sobre la política de control

A lo largo de la historia, los seres humanos tenían la tendencia de facilitar y acomodar su nivel de vida mediante el uso de materias y sistemas naturales ó intentar crear otras nuevas que cumplen con sus necesidades, entre ellos podemos citar los mecanismos de control, el desarrollo de esta área ha sido estrechamente relacionado con la necesidad de los diferentes grupos humanos de controlar / manipular los diferentes sistemas con el objetivo de conseguir que la vida de cada persona sea más fácil y placenta. Los primeros intentos de controlar procesos son muy antiguos de lo que puede parecer, ya que la preocupación de los griegos y los árabes por controlar de forma precisa la evolución del tiempo empezó en el periodo comprendido entre los años 300 A.C hasta el 1200 D.C. Un primer intento de controlar el avance del tiempo con reloj fue por parte del filosofo Platón, se le ocurre la idea de controlar el tiempo porque los alumnos de su academia fundada en el 378 A.C tenían ciertas dificultades para levantarse por la mañana, de hecho se ha procesado a inventar un despertador para solventar este problema.

Durante los siglos XVIII y XX, el área de control conoció un avance muy grande, la motivación de la revolución industrial e la primera y la segunda guerra mundial empujó el desarrollo del control hacia nuevos objetivos que cumplen con los requisitos necesarios de aquella época. A principios del siglo XX, las exigencias de la industria y la necesidad de instrumentos capaces de medir, grabar y controlar las presiones, temperaturas y otras variables hizo del control una área muy decisiva en el avance industrial, ya que la mayoría de los controladores usados en esa época eran de tipo:

- Relé eléctrico con válvula operada por un solenoide que da una acción de ON/OFF.
- Relé eléctrico con válvula operada por un motor que da una acción proporcional de banda ancha.
- Relé neumático.

Con el rendimiento limitado de los antes citados, había la necesidad de otros mecanismos más fiables. En 1922 lo valioso de un controlador PID había sido mostrado por primera vez, la función proporcional se conocía desde el comienzo del relé. Sin embargo, la parte integral no se conoció hasta 1920 y la derivativa en 1930, de ahí se

dieron grandes avances en conceptos de control; el enfoque de Ed S. Smith sobre la importancia de usar controladores con parámetros ajustables - ya que antes los parámetros en los controladores eran fijos (1936) - y la salida del primer controlador PID por parte de J.G Ziegler y N.B Nichols (1942) [Zieg, 42].

Por otra parte, el avance industrial y el desarrollo de nuevos sistemas más complejos que los interiores han formado un verdadero reto para los ingenieros de control, lo que requiere nuevos mecanismos que serán capaces de llevar tales procesos de control, porque la descripción de un sistema moderno de control requiere una gran cantidad de ecuaciones (sistemas con varias entradas y salidas) lo que no es posible con la teoría de control clásica que pierde su solidez ante sistemas parecidos. La aparición y la amplia disponibilidad de las computadoras digitales añadió muchas ventajas en el desarrollo de controladores basándose sobre el análisis del dominio del tiempo y el uso de síntesis a partir de variables de estado para enfrentar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requerimientos limitativos respecto a la precisión, el peso y el coste en aplicaciones militares, espaciales e industriales.

A partir de los principios de los años 1960 hasta la fecha, se investigaron a fondo el control óptimo, tanto de sistemas determinísticos como estocásticos y el control adaptable mediante el aprendizaje de sistemas complejos, el uso de la nueva teoría de lógica difusa introducida por Lotfi A. Zadeh, profesor de la universidad de california en Berkeley (1965) en el área de control ha sido sin embargo uno de los saltos gigantes en las políticas de control usadas, ya que en 1974 y basándose sobre trabajos interiores de L. Zadeh [Zadeh, 73], Ebrahim Mamadani implementó el primer controlador lógico difuso “ Control of steam engine” [Mamad, 74] dando paso hacia una nueva era en la elaboración de controladores difuso estáticos y dinámicos que han formado una alternativa muy atractiva sobre todo en casos que presentan ciertas complejidades (sistemas no lineales, desconocer ó dificultad de establecer los modelos matemáticos de dichos sistemas).

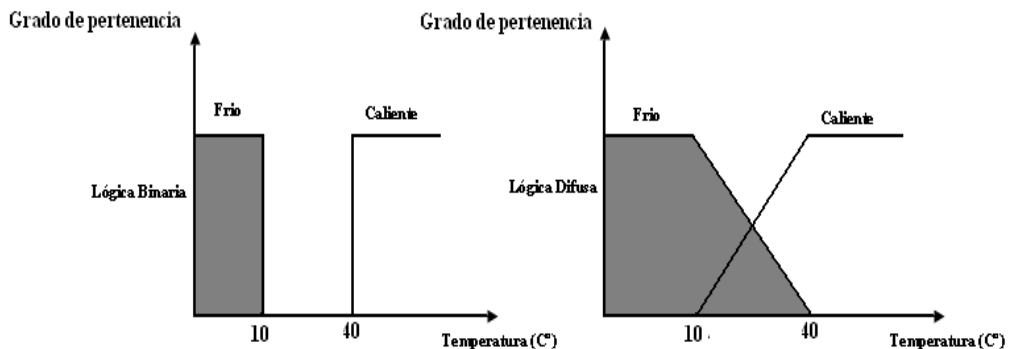
En las últimas décadas, los descubrimientos en la teoría de control moderna se centran principalmente en el control robusto, sistemas que presentan ciertos grados de independencia de las plantas, auto-aprendizaje y adaptación en tiempo real. Sin embargo, políticas de control basadas sobre conceptos de lógica difusa,  $H_\infty$  y temas asociados han formado una parte fundamental en el entorno del control moderno avanzado.

## II.2. El control por lógica difusa

### II.2.1. La lógica difusa

Los entendimientos del universo donde nos evolucionamos son generalmente imperfectos en sentido de que pueden estar contaminados con la incertidumbre y/o imprecisiones, aunque sólo sea a través de la percepción que tenemos. Sin embargo, podemos notar que los seres humanos integran estas imperfecciones en la vida diaria, especialmente en el razonamiento y decisión. La idea del profesor Lotfi A. Zadeh [Zadeh, 65] en 1965 a través del nuevo concepto de conjunto de pertenencia gradual de un elemento a un conjunto, fue para definir una lógica multi-evaluada que permite modelar estas imperfecciones, es decir tomar en cuenta los estados intermedios entre el todo y nada. La utilidad este enfoque puede ser ilustrado de la manera siguiente:

Para un ser humano, una temperatura de 10°C se considera como fría y una de 40°C será caliente. Supongamos que cada uno de esos valores pertenece a un conjunto definido, ¿Qué ocurre para valores intermedios? Una respuesta intuitiva consiste en afirmar que pertenecen a uno o dos de las categorías anteriores con distintos niveles o grados (normalizados) diferente. Esto evita transiciones bruscas entre las diferentes categorías, como es el caso de la lógica binaria (Figura II.1). En efecto, parece sorprendente considerar que una temperatura de 40 ° C es caliente, mientras que una temperatura de 39,9 ° C no lo es.



*Figura II.1:* Ejemplo de definición de conjuntos en el universo de discurso con lógica binaria y lógica difusa.

Este ejemplo ilustra el hecho de que la lógica binaria clásica en algunos casos está demasiado restrictiva. Por lo tanto, es necesario el uso de una lógica multi-evaluada que pueda ser visto como una extensión de la anterior, es la lógica difusa.

En cuanto al control de cualquier proceso, la lógica difusa permite una aproximación creativa comparándola con la automática convencional. Automáticamente, en general tratamos de modelar el proceso a través de una serie de ecuaciones diferenciales. Este modelo es difícil y a veces imposible de medir la complejidad de los procesos controlados que se aumenta de forma progresiva. De una manera radicalmente contraria, un controlador no va a describir el proceso sino va a controlarlo de la misma forma que un experto humano a través de un conjunto de reglas que describen el entorno natural con sus imprecisiones e incertidumbres.

En las últimas décadas, numerosas aplicaciones basadas sobre la lógica difusa han visto la luz, los investigadores y los industriales japoneses han llevado una gran parte de los trabajos realizados en esta área, ya que a partir de los años 80 han mostrado un gran interés hacia el área de control. Esas aplicaciones se basan esencialmente sobre los trabajos de [Mamd, 74; Mamd, 75] que fue el primero en darse cuenta de la gran utilidad que trae la teoría de conjuntos difusos a las políticas de control. Podemos citar otros en grandes áreas como el marketing, el tratamiento médico, el campo de procesamiento de imágenes, procesamiento de señales, robóticas, etc.

## **II.2.1. Controlador lógico difuso**

### ***II.2.2.1. Introducción***

A pesar de que la lógica difusa dispone de una amplia posibilidad de aplicarse en numerosos campos de investigación, nosotros vamos a concentrarnos en el área del control. De hecho, este método proporciona una política de control muy eficaz sin necesidad de hacer estudios avanzados del proceso controlado. El algoritmo de control consta de un conjunto de reglas difusas llamado base de reglas, en esta sección se presentan todos los elementos básicos generales de ajuste y de control por lógica difusa.

Ante el difícil problema de los sistemas de vigilancia y control no lineales complejos y de múltiples variables, las herramientas utilizadas son cada vez más sofisticadas. En los últimos años el entusiasmo se ha centrado alrededor de la lógica difusa, en paralelo con los avances en automática convencional.

La teoría de la lógica difusa trata dos problemas:

1. Teoría de conjuntos difusos.
2. Teoría de medida difusa.

La motivación primaria de la lógica difusa es la posibilidad de aprovechar la tolerancia de la imprecisión y de la inexactitud [Jamshidi et al., 93]. La idea de aplicar las técnicas difusas en el dominio del control de procesos ha sido propuesta por primera vez por parte de Change y Zadeh en 1972. Su planteamiento se basa en un enfoque basado en el modelo utilizando el concepto de la función difusa. Los principios de la lógica difusa se han aplicado en 1974 por E.H Mamdani construyendo el primer controlador difuso para controlar un motor [Mamd, 74].

El notable crecimiento en el uso de la lógica difusa fue hace una década, bien precisamente en Japón donde el uso de esta valiosa estrategia conoció un avance muy importante mediante su utilización en diversos campos de la industria y en la vida diaria (purificación de agua, fabricación de cemento, en el metro, etc...). [Barrat, 93; Bouj, 00].

La actitud de los automáticos con respecto al control difuso fue esencialmente reservada: ¿después de décadas, con la necesidad de identificar, lo mejor posible, un sistema para generar un control con un rendimiento satisfactorio, era necesario recurrir a este método, que pretendía sustituir a los controladores más o menos sofisticados, basados en la identificación, mediante técnicas basadas en la experiencia humana en lugar de las ecuaciones?

Actualmente, esta actitud ha cambiado, podemos pensar en que el control difuso esta poco a poco teniendo lugar en la panoplia de la ingeniería moderna, sin suplantarse los métodos tradicionales, y será una valiosa contribución en los casos donde la identificación del sistema resulta complicada, costosa ó incluso en sistemas cuyos parámetros sufren cambios brutales.

Numerosos trabajos han mostrado el gran éxito que presenta el uso de la lógica difusa en procesos de control. Estos trabajos muestran un notable rendimiento de este tipo de controladores comparándoles con los controladores convencionales PID [Barrat, 93; Lauch, 97].

#### ***II.2.2.2. Principio e implementación de un controlador difuso***

El proceso a seguir en el diseño de un controlador lógico difuso es muy diferente a la de un controlador convencional. Figura II.5 muestra los pasos principales. Generalmente, durante la concepción de un controlador lógico difuso empezaremos por un análisis avanzado del proceso a controlar, debe notar aquí que no se trata de





- La capacidad de controlar adecuadamente la mayoría de los sistemas con comportamiento dinámico complicado ó cuyos modelos matemáticos son difíciles a extraer.
- Conocimiento limitado de los parámetros del sistema a controlar.

La determinación de la estrategia de control forma la parte la más crítica en la implementación de un controlador difuso, a base de la estrategia elegida se determinan los parámetros decisivos del proceso de control como por ejemplo el numero y la forma de las variables lingüísticas de las entradas/salidas, elección de la lógica utilizada y el método de defuzzificación adoptado etc.

El análisis de esos parámetros no es una tarea fácil, ya que numerosos trabajos de investigación han intentado de cambiar ó modificar ciertos parámetros para mejorar la eficacia de los controladores ó para quitar estados indeseados en los procesos de control.

Las funciones de pertenencia y como forman parte esencial en la representación de la base de reglas han llamado la atención de varios investigadores respecto al número de las funciones de pertenencia, su forma y su emplazamiento [Mizu, 88; Drian, 93; Bühler, 94; Tso, 97; Li, 99; Zhou, 00; Lui, 01; Botz, 04], de otra parte, la base de reglas ha estado también dentro del centro de interés de los investigadores de esta área, importantes trabajos han tratado de estudiar el efecto directo y indirecto la base de reglas de un controlador difuso sobre el proceso de control mediante la modificación del aspecto clásico que suele tener [Wong, 99; Zap, 99; Yeh, 94; Zhou, 00; Shiq, 01; Chen, 02; Tao, 02; Pom, 04].

### ***II.2.2.3. Estructura de un controlador difuso***

El controlador lógico difuso consta de los cuatro elementos básicos siguientes [Lee, 90a; Lee, 90b; Bühler, 94; Passino, 98]:

- Interface de fuzzificación,
- Base de reglas,
- Motor de inferencia,
- Interface de defuzzificación.

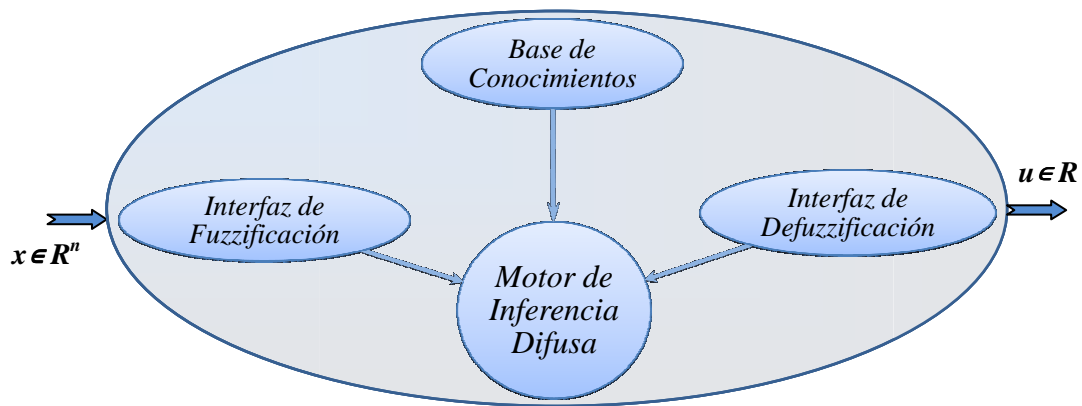


Figura II.3: Estructura de base de un controlador difuso.

### ❖ Interfaz de fuzzificación

La interface de fuzzificación consiste en transformar las entradas numérica (vectores precisos) en conjuntos difusos, la elección del operador de fuzzificación depende de la confianza que prestamos a las medidas efectuadas de forma que si la medida  $x_0$  es exacta, el subconjunto difuso  $A_x$  debe estar representado por su comportamiento específico. De hecho, utilizamos como operador de fuzzificación la transformación llamada singleton, así que la función de pertenencia del subconjunto difuso  $A_x$  será definida por:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

La figura II.4 muestra el aspecto de dicha función de pertenencia.

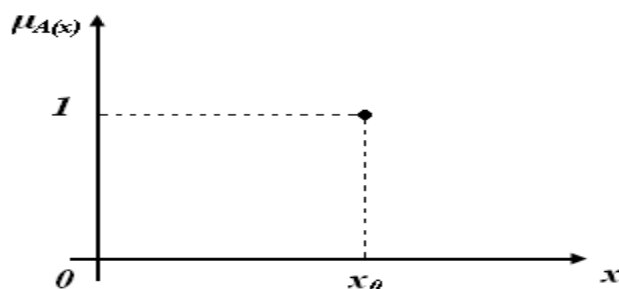


Figura II.4: Método de fuzzificación para medidas correctas.

En caso contrario donde la medida de la variable presenta asuntos de inexactitud, por culpa de ruido por ejemplo, el subconjunto difuso  $A_x$  se representa mediante un comportamiento inexacto, para ello se utiliza un método de fuzzificación que asocia la medida  $x_0$  a una función de pertenencia que traduzca su estado tales como:

$$\mu(x) = \max\left\{0; 1 - \frac{|x-x_0|}{\varepsilon}\right\} \quad (\text{II.2})$$

La figura II.5 muestra la representación gráfica de esta función. Este subconjunto difuso contiene el valor de la medida  $x_0$  con una pertenencia unitaria y los valores vecinos de  $x_0$  con pertenencias inversamente proporcional a la distancia que lo separa de  $x_0$ .

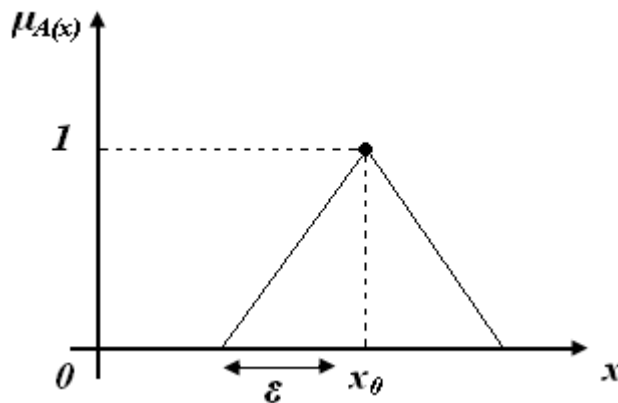


Figura II.5: Método de fuzzificación para una medida inexacta.

La base del triángulo ( $\varepsilon$ ) varía en función de la importancia relativa de los errores de las medidas, de hecho, un importante error de medida significa una base más extendida y un  $x_0$  más impreciso.

#### ❖ *Base de conocimientos*

La concepción de la base de conocimientos se considera como el núcleo de un controlador difuso, contiene la base de reglas difusas y la base de datos del controlador.

- *La base de datos:*

Contiene la definición de los subconjuntos difusos, los factores de escala para la normalización de los conjuntos de referencia y la partición del espacio difuso de entrada y de salida.

- *La base de reglas difusas:*

Contiene el conjunto de reglas difusas de tipo << Si ..... Entonces >> describiendo el comportamiento dinámico del sistema basándose sobre el previo conocimiento de un experto humano.

$R_l$ : Si  $x_l$  es  $A_l^l$  y .... Y  $x_n$  es  $A_n^l$  Entonces  $u_l$  es  $B^l$ .

Con:  $[x_l \dots x_n]$ , entradas del controlador.

### ❖ *Motor de inferencia difusa*

Es un mecanismo de decisión, permite tomar decisiones utilizando el razonamiento aproximado a partir del comportamiento del sistema previamente descrito en la base de reglas difusas. Los operadores AND y OR forman parte esencial en la inferencia de los controladores difusos, el operador AND se aplica a los variables internos de las reglas mientras que el operador OR conecta entre las reglas.

En una inferencia difusa estos operadores se aplican sobre las funciones de pertenencia mediante varios métodos, citamos por ejemplo:

- Método de inferencia max – min. (Mamdani)
- Método de inferencia min – prod. (Laren)
- Método de inferencia sum – prod. (Sugeno)

#### ➤ *Método de inferencia max – min*

El método de inferencia max – min utiliza los operadores AND y OR en la condición para formar un máximo y un mínimo respectivamente.

#### ➤ *Método de inferencia max - product*

Este método utiliza los operadores *AND* y *OR* en la condición para formar un mínimo y un máximo respectivamente, por otra parte, la conclusión de la regla introducida por *Entonces* que conecta el factor de pertenencia de la condición con la función de pertenencia de la variable de la salida  $x_R$  por el operador *AND* está formado por el producto (mínimo en el método de inferencia max-min).

#### ➤ *Método de inferencia sum – product*

A diferencia de los anteriores este método de inferencia utiliza los operadores AND y OR en la condición para formar un producto y la suma respectivamente.

### ❖ *Interfaz de defuzzificación*

La estrategia de control utilizada está descrita por un conjunto de declaración lingüística ó de reglas. El proceso exige a las entradas valores no difusos, así que el conjunto difuso de la salida del controlador tiene que ser defuzzificado. La defuzzificación es una operación que consiste en extraer del conjunto difuso un valor numérico considerado como valor significativo.

Recientemente [Jean, 00] han presentado una nueva propuesta de defuzzificación que permite mejorar las desventajas de los métodos clásicos mientras que en [Broe, 04] se ha presentado tres nuevos métodos de defuzzificación. En lo que viene podemos ver los métodos de defuzzificación los más utilizados, la figura II.6 presenta estos últimos gráficamente:

- *Método de centro de gravedad*

Es el método el más utilizado, la salida de este método es el centro de gravedad del conjunto difuso y se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$z = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_z(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_z(z_j)} \quad (\text{II.3})$$

- *Método del máximo más grande*

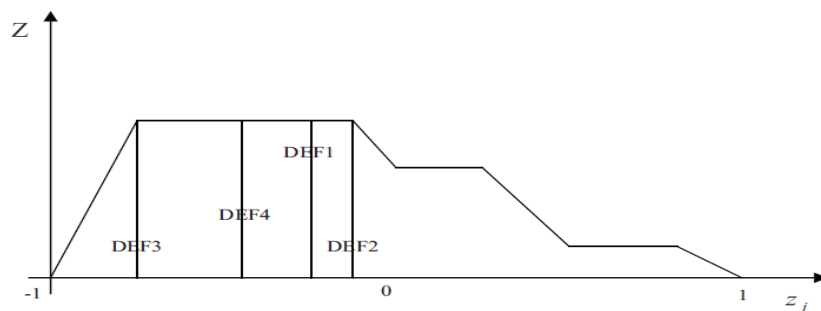
Consiste en dar como resultado el valor más grande cuya magnitud tiene el más alto grado de pertenencia.

- *Método del máximo más pequeño*

Consiste en dar como resultado el valor más pequeño cuya magnitud tiene el más alto grado de pertenencia.

- *Método de la media de máximos*

Consiste en dar como resultado la media de los valores cuyo grado de pertenencia es máximo.



**Figure II.6:** Diferentes métodos de defuzzificación.

#### II.2.2.4. Diferentes tipos de controladores difusos

##### ❖ Controlador de tipo Mamdani

En la mayoría de las aplicaciones que figuran en la bibliografía se utiliza este tipo de controlador para controlar la salida de un proceso usando el error  $e$  como única entrada ó usando el error y su variación  $\Delta e$  [Foul, 03]. En 1974 E.H Mamdani ha presentado por primera vez la técnica de control por lógica difusa, dicha técnica consiste en determinar un conjunto de reglas que describe el comportamiento dinámico del sistema controlado. La obtención de esas reglas se hace por un experto humano que conoce bien el sistema, se ha utilizado reglas con premisas y conclusiones simbólicas, inferencia de tipo (max, min) y defuzzificación por centro de gravedad. Figura II.7 presenta el modelo difuso de tipo Mamdani.

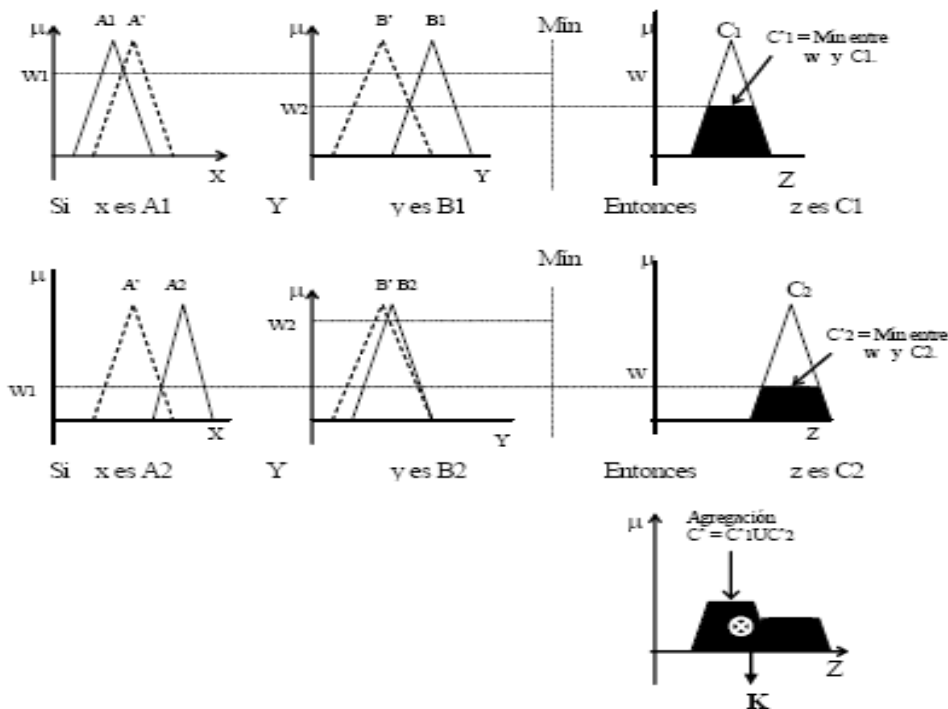


Figura II.7: Modelo difuso de tipo Mamdani.

Poco tiempo después, Macvicar y Whelan han observado que las bases de reglas propuestas por King y Mamdani eran incompletas, de hecho, se pusieron a analizar en detalle las bases de reglas y han propuesto una matriz de reglas con dos entradas, el error y su derivada basándose sobre los principios siguientes [Teng, 94; Bouj, 00]:

- Si la salida es igual al valor deseado y la variación del error es nula, la consigna se mantiene constante.

- Si la salida diverge del valor deseado, la acción será depende del valor del error y de su variación.

Si las condiciones son tales como el error puede ser corregida por sí misma, la consigna será fija, en caso contrario, la consigna será cambiada para lograr resultados satisfactorios.

$e \backslash \Delta e$	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	NB	NB	NB	NS	ZE
<b>NS</b>	NB	NB	NS	ZE	PS
<b>ZE</b>	NB	NS	ZE	PS	PB
<b>PS</b>	NS	ZE	PS	PB	PB
<b>PB</b>	ZE	PS	PB	PB	PB

**Tabla II.1:** Matriz de Macvicar-Whelan.

$e$ : La diferencia entre la salida del sistema y la consigna.

$\Delta e$ : La variación del error.

**NB**: Negativo grande “Negative Big”.

**NS**: Negativo pequeño “Negative Small”.

**ZE**: Cero “Zero”.

**PS**: Positivo pequeño “Positive Small”.

**PB**: Positivo grande “Positive Big”.

#### ❖ *Controlador de tipo Takagi - Sugeno*

En controladores de este tipo las conclusiones de las reglas no son simbólicas, es decir, se representan mediante una función numérica de entradas como:  $b^i = f(x_1, \dots, x_n)$  y no con subconjuntos difusos, las premisas siguen simbólicas. Figura II.8 presenta el modelo difuso de Takagi – Sugeno.

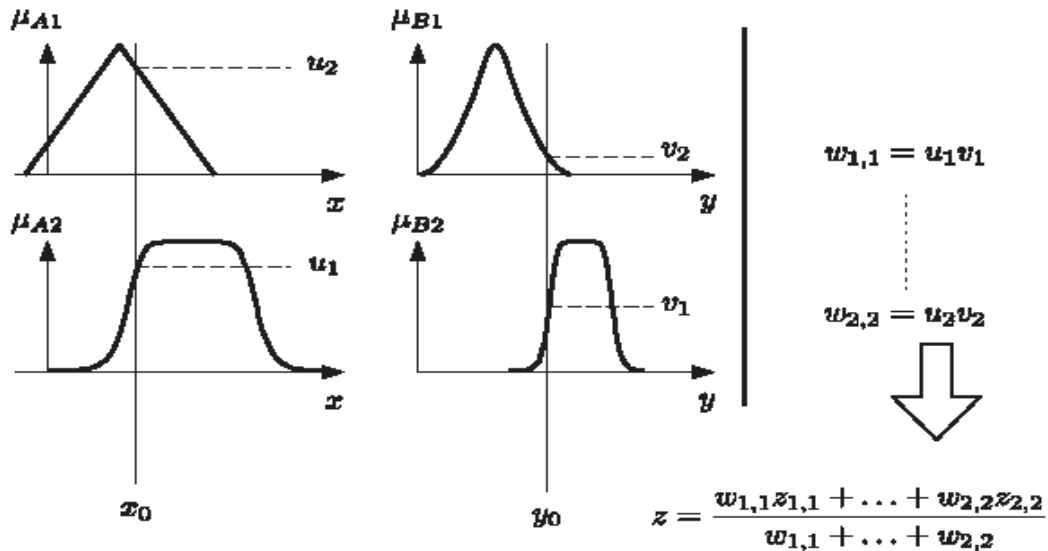


Figura II.8: Modelo difuso de Takagi – Sugeno.

La salida del controlador se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n b^i * \alpha_i(x)}{\sum_{j=1}^n \alpha_j} \quad (II.4)$$

Donde los  $\alpha_i$  presentan los valores de acierto para cada regla por  $i = 1 \dots K_n$ .

Notamos que la salida del controlador es la variación de la consigna.

#### II.2.2.5. Ventajas e inconvenientes del control por lógica difusa

Naturalmente e igual como todos los sistemas reales, el control por lógica difusa tiene ciertas ventajas e inconvenientes. En lo que viene citamos algunas ventajas esenciales:

- La ausencia de cualquier tipo de modelización ó identificación matemática del sistema controlado.
- Ofrece la valiosa oportunidad de provechar del conocimiento del experto humanos sobre el proceso en la implementación e el diseño del controlador.
- Un control notablemente robusto de sistemas que presentan alto grado de no linealidad y difíciles para modelar así que el aumento de la precisión y la rapidez del cálculo.

Y como inconvenientes de este tipo de sistemas, podemos citar:

- La ausencia de una estrategia clara y precisa en la concepción de un controlador difuso como por ejemplo: la elección de los variables para medir, la



determinación de los factores de normalización, la elección de las estrategias utilizadas como la fuzzificación, inferencia ó la defuzzificación.

- La consistencia de las inferencias no está garantizada (posible aparición de reglas difusas contradictorias).
- La posibilidad de aparición de ciclos limitados debido a la no linealidad del sistema.

## **II.3. Estado de arte: controladores lógicos difusos y consumo energético**

### **II.3.1. Introducción**

#### ***II.3.1.1. Control inteligente***

Las características de la inteligencia humana pueden ser emuladas con técnicas de control inteligente presentando una nueva política alternativa de control muy adecuada. Estas características incluyen el aprendizaje, la adaptación y la planificación bajo cualquier tipo de perturbación. En la actualidad, el área del control inteligente tiene como tendencia incluir a todos los que no se clasifican como control convencional.

La especificación del término “Control Inteligente” es diferente por cada área científica debido a que en realidad aún no existe definición ninguna de que es la inteligencia humana ó del comportamiento inteligente y el debate académico sobre lo que constituye la inteligencia está aún abierto, la discusión entre los investigadores académicos, psicólogos, informáticos e ingenieros sigue siendo un tema flotante. En los años 70 K.S Fu [Fu, 70] ha introducido por primera vez el término de control inteligente, la referencia [Antsa, 99] es la principal fuente de las numerosas descripciones del control inteligente que se aplica en diversos campos de la vida humana.

El control inteligente es una política de control que combina y extiende teorías y métodos de áreas tales como el control, aplicaciones de las computadoras y de la investigación operativa, de otra parte, trae las teorías de las matemáticas e inspira y emita algunos comportamientos de los sistemas biológicos.

Las metodologías del control inteligente tales como: redes neuronales, control difuso, algoritmos genéticos, sistemas de planificación, sistemas expertos y sistemas híbridos etc, están siendo aplicadas ampliamente en distintos campos, podemos

mencionar como ejemplo: la robótica, la automatización, control de tráfico, comunicaciones, etc. [Chen, 02; Chiu, 04; Khan, 08; Fei, 11].

Los campos de la ciencia de la computación e especialmente la inteligencia artificial proporcionan como prólogo ideas de representación del conocimiento, metodologías y herramientas tales como las redes semánticas, marcos, las técnicas de razonamiento y lenguas de programación [Jamshi, 03]. Los sistemas y algoritmos desarrollados en los campos del control adaptativo y el aprendizaje automático forman una parte esencial en las nuevas herramientas adquiridas por parte del control inteligente y los avances tecnológicos en herramientas como sensores, actuadores, tecnología de computadoras y redes de comunicaciones facilita la implementación real de un controlador inteligente. Entre todas esas metodologías y tecnologías que prestan una amplia gama de avances y herramientas en el área del control inteligente se pretende presentar un enfoque especial sobre los controladores lógicos difusos como buena alternativa y robusta estrategia de control inteligente.

### ***II.3.1.2. Controladores lógicos difusos***

Desde hace muchos años los controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo) fueron la estrategia de control la más utilizada en las plantas industriales. Según Åström y Hägglund [Åström, 06], más del 90% de los procesos a lazo cerrado han sido controlados por algoritmos de estructuras PID. La simplicidad del diseño y el buen rendimiento en los sistemas lineales fueron las principales características que han ilustrado el gran éxito de este tipo de controladores en la industria. No obstante, cuando se trata de sistemas que presentan un alto grado de complejidad como por ejemplo los sistemas con retraso de tiempo, parámetros variables con el tiempo y sistemas no lineales, el rendimiento de los controladores PID se vuelve insatisfactorio y deja de garantizar los requisitos principales en un proceso de control.

Los algoritmos y la teoría de control en general han conocido un gran avance y por su turno las plantas controladas también han vuelto más sofisticadas que antes, con modelos matemáticos complicados y difíciles a modelar e implementar lo que limita el uso de los controladores antiguos y convencionales como los PID. Por lo tanto, hay una necesidad de establecer una nueva estrategia de control inteligente fácil a implementar que puede controlar con eficacia una amplia variedad de plantas complicadas, en otras palabras, el control con lógica difusa, ya que los controladores lógicos difusos no solo

intentan imitar el comportamiento de los expertos humanos, sino este tipo de controladores no requiere ningún tipo de identificación del modelo matemático de la planta. De hecho, la teoría de lógica difusa presenta un buen remedio para varios tipos de problemas encontrados en el área del control inteligente debido a las distintas características únicas que dispone, como ejemplo podemos citar:

- Robustez y estabilidad, ya que no requiere mucha precisión, las entradas no presentan cierta sensibilidad al ruido y se puede programar para parar de modo seguro por si en algún momento el sensor de retroalimentación se cierra o se destruye.
- Las reglas del controlador son definidas por el usuario con la posibilidad de modificarlas y ajustarlas fácilmente con el fin de mejorar o alterar drásticamente el rendimiento del sistema.
- Un controlador lógico difuso ofrece un amplio grado de independencia de la planta controlada, puede tener tantas entradas y salidas de forma razonable sin necesidad de medir o calcular el rango de variación de los parámetros de la planta.
- Un controlador lógico difuso puede controlar sistemas cuyos modelos matemáticos sean difíciles o imposibles a presentar.

Numerosos trabajos de investigación donde se ha aplicado la teoría de control por lógica difusa han mostrado claramente que la elección del controlador lógico difuso como estrategia alternativa en sistemas no lineales y complejos ha presentado un alto rendimiento en comparación con los controladores convencionales clásicos. Sin embargo, tal como todos los algoritmos y las aplicaciones científicas, la presencia de ciertas limitaciones e incertidumbres es inevitable. De hecho, para superar esas limitaciones y compensar las incertidumbres, sería imprescindible modificar y mejorar la estrategia de control mediante técnicas de auto-organización de los parámetros internos del controlador o mediante la combinación entre varios algoritmos de control inteligente como por ejemplo: los algoritmos genéticos y redes neuronales, etc.

### **II.3.2. Control lógico difuso en diversos campos de la vida humana**

Como se ha dicho previamente, los controladores lógicos difusos han añadido al campo del control inteligente una gran flexibilidad para controlar fácilmente sistemas no lineales sin necesidad de entender y analizar sus modelos matemáticos complejos, sin olvidar por su puesto su precisión y su rapidez en actuar, lo que puede justificar el intensivo uso de este tipo de controladores por los ingenieros en varias aplicaciones cubriendo diferentes campos de la vida humana. Una exploración de los principales avances y contribuciones de la investigación en el campo del control inteligente durante la última década destacará la importancia y el gran efecto positivo que añadió el uso de este tipo de controladores [Lasri, 11a; Lasri, 11b].

En las secciones siguientes enfocaremos sobre la tendencia del control inteligente durante la última década mediante la presentación de varios ejemplos reales del uso de la teoría del control difuso en una amplia gama de aplicaciones humanas con diversos métodos y técnicas.

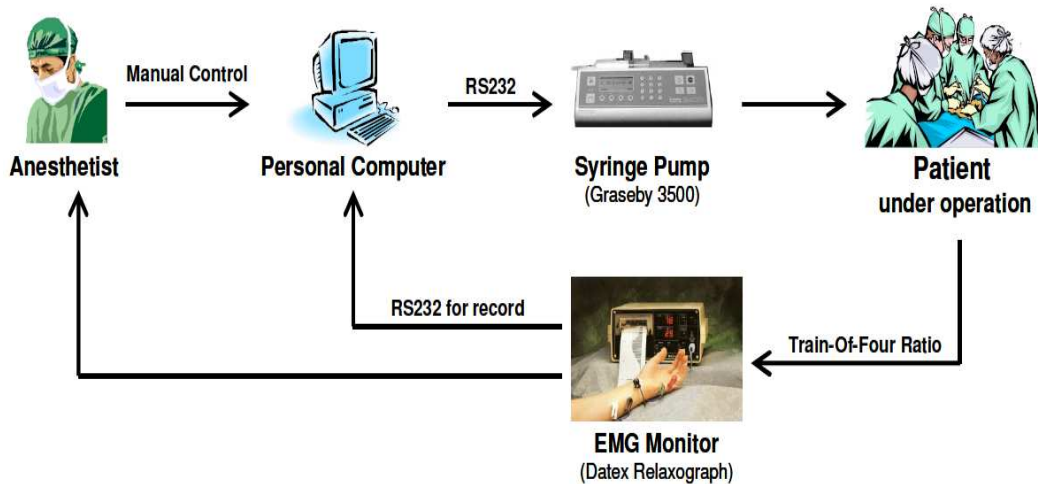
#### ***II.3.2.1. Aplicaciones biomédicas***

La medicina como disciplina independiente encargada de garantizar soluciones y dar propuestas para mejorar la salud forma una importancia vital para los seres humanos, por lo tanto, los intentos de mejorar las técnicas usadas en este campo o inventar otras nuevas siguen con la misma ambición, teniendo como objetivo alcanzar la máxima eficacia y la mejor precisión. Aunque parece que la medicina es una ciencia que no está relacionada con la ingeniería de control, los controladores lógicos difusos y gracias a sus notables cualidades se usan en aplicaciones específicas y sensibles de esta área, se usan en aplicaciones por donde se requiere una vigilancia permanente en tiempo real y durante las operaciones quirúrgicas o en las unidades de cuidados intensivos. Actualmente la ingeniería del control inteligente se aplica en la medicina de manera muy amplia, ya que podemos encontrar controladores integrados en sistemas básicos y sencillos como los de dosificación y en otros sistemas de alta precisión y complejidad como los de la cirugía cardiovascular. De hecho, debido a las grandes ventajas que han mostrado los controladores lógicos difusos, su uso se ha vuelto casi imprescindible en este campo.

El uso de los controladores difusos en la medicina es muy diverso, cubriendo distintas aplicaciones como el control de la inyección de dosis, la cirugía o la terapia física [Abbod, 98]. En [Kumar, 09] se puede ver un ejemplo muy claro de un controlador difuso que intenta imitar el sistema cardiovascular de un corazón natural. El controlador difuso fue diseñado para controlar dos variables, la media del presión arterial y el gasto cardiaco mediante la administración de tres medicamentos: Dopamine, Sodium Nitro Prusside y Phenylephrine que se encargan de aumentar el ritmo cardíaco y aumentar e disminuir la presión arterial, el controlador difuso maneja estas tareas mediante el control de la unidad de transporte de medicinas. Otra aplicación de los controladores difusos en relación con el mismo enfoque es el desarrollo de un corazón artificial capaz de sustituir un corazón real. En [Neat, 90] se presenta una discusión detallada sobre la implementación de un corazón artificial basándose sobre el control mediante la lógica difusa, este modelo está basado sobre el modelo simplificado desarrollado por Hassani et al. [Kwok, 89], el rendimiento del controlador difuso propuesto ha sido demostrado vía experimentos clínicos, el corazón forma parte del sistema circulatorio del cuerpo teniendo como misión repartir la sangre por el resto del cuerpo, por lo tanto, un corazón artificial tiene que ser suficientemente robusto y adaptable con las variaciones del cuerpo manteniendo un cierto grado de compatibilidad con el resto de los órganos porque un corazón natural tiene un sistema de retroalimentación muy complicado para regular la presión sanguínea y la circulación de la sangre a través del cuerpo. En [Basnet et al., 09] se ha podido demostrar que la creación de un sistema complejo tal como un corazón artificial es algo alcanzable mediante el uso de dos controladores lógicos difusos, uno para controlar el ventrículo izquierdo del corazón y el otro se encarga de obtener la frecuencia cardiaca a partir de varios parámetros, es un ejemplo sencillo que describe con bastante exactitud la dinámica de la circulación de la sangre en las arterias y venas principales, dicho controlador ha sido probado vía dos ejemplos separados.

Siempre dentro del bloque de las operaciones, el controlador lógico difuso sigue demostrando su gran contribución al campo de las aplicaciones médicas. En [Chuang, 06] encontraremos una aplicación de un controlador lógico difuso en una operación quirúrgica, este último se encarga de controlar la relajación muscular profunda usando el cisatracurium durante la cirugía, el algoritmo de control propuesto aquí ha podido demostrar que la estrategia del control difuso resulta muy útil debido a su robustez y

estabilidad, efectivamente los resultados obtenidos clínicamente han demostrado que usando un controlador lógico difuso se puede superar el problema del retraso del sistema manteniendo un alto nivel de relajación muscular del paciente y reduciendo el sobre carga de la anestesia durante la cirugía.



**Figura II.9:** Esquema del método de control clínico para el bloqueo neuromuscular, [Chuang, 06].

Generalmente, en los algoritmos de control biomédico, el controlador diseñado para algún caso se queda como una aplicación limitada, debido a que existen varias diferencias entre los seres humanos, por ejemplo: el tiempo de reacción ante diferentes dosis de medicamentos y otros aspectos [Linkens, 91; Shi, 08; Basnet, 09].

Durante una operación quirúrgica para los pacientes con traumatismo craneoencefálico grave y pérdida de conocimiento, se usa un controlador lógico difuso con una base de reglas que imita el conocimiento de un experto humano para lograr una sedación continua y estable del propofol que reduce el efecto de la presión intracraneal [Kelly, 96]. En este caso el problema de las diferencias que existen entre los pacientes sigue haciendo del controlador diseñado como caso particular especial de ese mismo modelo, la propuesta de [Hua, 06] ofrece una oportunidad para sobre pasar este obstáculo mediante el diseño de un controlador lógico difuso que esta capaz de auto-ajustarse, es decir, está capaz de cambiar su base de reglas para que sea compatible con el caso tratado, los resultados obtenidos demuestran que dicho controlador ha podido garantizar una sedación permanente y estable para varios pacientes compensando las diferencias que existen entre ellos mediante el auto-ajuste que realice en su base de reglas.

En los ejemplos previos, los controladores difusos han podido controlar sistemas que presentan varios aspectos de incertidumbre, tratar con imprecisiones y términos cualitativos tales como: baja, media y alta [Kumar, 09; Linkens, 91; Hua, 06; Boronic, 02; Shi, 08], también, han demostrado su capacidad de generar nuevas reglas que cumplen con los requisitos de los casos enfrentados. Sin embargo, la obtención de las reglas difusas es una tarea común para todos los controladores difusos, convencionalmente, estas reglas se derivan emulando el comportamiento del experto humano que es en este caso el médico. Numerosos trabajos en la bibliografía presentan distintas aplicaciones clínicas por donde el controlador difuso se encarga de regular la relajación muscular [Mason, 96; Shieh, 00], pero el uso de nuevos fármacos de bloqueo neuromuscular hacen de la creación de las bases de reglas una tarea más difícil de lo que era con los fármacos clásicos debido a los diferentes comportamientos inesperados que resultan de esas nuevas sustancias, dicha dificultad ha sido el principal motivo para elaborar controladores difusos capaces de reconstruir su base de reglas basándose sobre el caso tratado. En 1991, Linkens y Hasnain [Linkens, 91] han publicado un primer estudio sobre un controlador difuso capaz de auto-ajustar su base de reglas en un proceso de control de relajación muscular en una simulación numérica, no obstante, recientemente esta propuesta ha sido implementada en experimentos clínicos reales de la relajación muscular [Mason, 96] y de una anestesia profunda [Shieh, 99; Shieh, 06].

#### ***II.3.2.2. Aplicaciones en vehículos de transporte***

La industria es un aspecto crucial de la vida moderna, los avances en este campo tiene un notable impacto sobre la vida humana, de hecho, mejorar las aplicaciones industriales ha sido siempre un campo muy atractivo para los investigadores de distintas áreas. La introducción de la teoría de los conjuntos difusos en la industria a través el uso de los controladores lógicos difusos fue un intento de aprovechar de las ventajas que presenta este último en tema de precisión y robustez, sin embargo, garantizar un nivel de acierto más alto de lo que existía anteriormente tendrá positivas influencias sobre la calidad y el rendimiento de los servicios prestados.

Una de las industrias que requieren alto nivel de precisión y precaución es la industria aeronáutica debido a su complejidad y su alto riesgo. Por lo tanto, el control difuso se ha usado en distintos sistemas integrados de los aviones para mejorar el rendimiento y aumentar la precisión. Ioan Ursan y Felicia Ursan *et.al.* [Ioan, 03] han propuesto un nuevo algoritmo de control para el sistema de antibloqueo del freno (ABS)

para un avión militar rumano, efectivamente este nuevo sistema basado sobre lógica difusa ha mejorado notablemente su funcionamiento creando una nueva estrategia de control para el sistema de (ABS) teniendo como objetivo mantener los coeficientes de fricción entre el neumático y la carretera dentro del margen seguro para evitar la obstrucción de las ruedas y por consiguiente, la preservación de la estabilidad lateral del vehículo y la reducción de la distancia del frenado. Los resultados de la simulación muestran que el algoritmo propuesto asegura con mucha eficacia el antibloqueo de las ruedas incluso en las peores condiciones de la carretera y con perturbaciones aditivas. El algoritmo presentado forma parte de herramientas de libere uso que ofrece grandes facilidades de implementación prestando varias ventajas al sistema desde el punto de vista de la complejidad del diseño, anti-saturación y las propiedades de la robustez del sistema controlado.

Sin embargo, el uso de los controladores lógicos difusos en la industria aeronáutica ha demostrado sus ventajas, interviniendo en todas las aplicaciones por donde se requiere un controlador. En [Dob, 07] se ha controlado el entorno ambiental de la cabina del avión usando la lógica difusa, la propuesta del control se basa sobre la integración de varios bloques que representan los reguladores difusos que controlan la temperatura, la humedad y el flujo del aire acondicionado. Los resultados obtenidos son muy satisfactorios ya que cumplen los requisitos esenciales de un proceso de control: estabilidad y la robustez del rendimiento. En [Kur, 09] el controlador difuso está capaz de garantizar una autonomía total, el sistema de auto-piloto implementada ha podido emular el comportamiento del piloto humano satisfactoriamente.

Por otro lado, los vehículos también han disfrutado de los beneficios ofrecidos por el control mediante la lógica difusa para mejorar el rendimiento de ciertas tareas específicas. Numerosos trabajos ilustran los avances realizados utilizando dicha política de control, por ejemplo, la reducción del consumo del combustible y las emisiones de carbono en los vehículos ha sido optimizada mediante un controlador lógico difuso, este último tenía que controlar varias variables tales como la velocidad del motor, el par motor, la chispa de encendido, sincronización de la inyección de combustible y la relación aire-combustible entre otros [Ghaf, 08] y en otras aplicaciones el controlador difuso optimiza el consumo del motor mediante una combinación controlada del uso del combustible e de la energía eléctrica dando lugar a un consumo muy moderado [Y.Lee, 06; Niels, 02]. Por otra parte, la autonomía de los vehículos y el sistema de frenos



también han sido abordadas, [Sug, 85] usando un controlador difuso como conductor del vehículo, este último puede aparcarse sin recibir ninguna ayuda por parte de los humanos. [Mama, 09] y [Wang, 07] demuestran el gran efecto del uso de los controladores difusos en sistemas de frenado de los vehículos respecto al tiempo necesario para frenar y la cualidad general de los frenos.

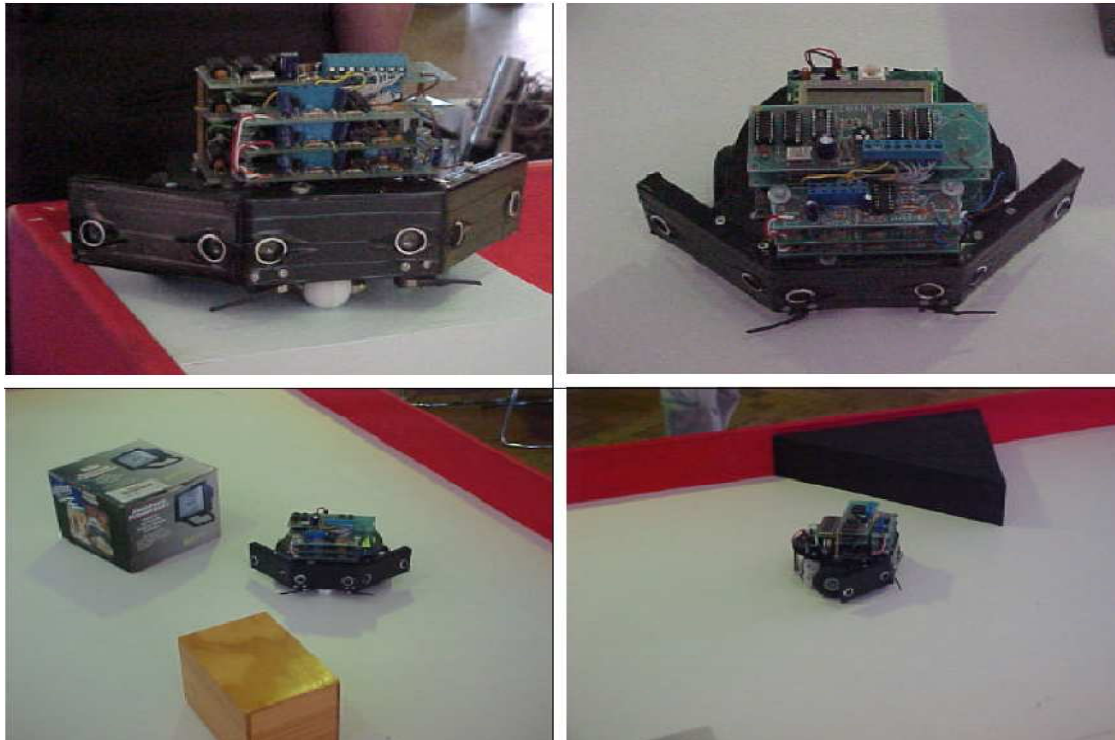
### ***II.3.2.3. Aplicaciones en la robótica***

El desarrollo científico juega un papel primordial en facilitar la vida de los humanos, de hecho, el progreso humano en la ciencia se refleja en la cualidad y el nivel de vida. Las máquinas inteligentes son fruto de muchos años de investigación, combinando varias tecnologías y técnicas se ha podido inventar máquinas que pueden sustituir los humanos en varias tareas que antes eran parte de las actividades humanas. Sin embargo, una máquina inteligente tendrá que disponer de un cierto grado de libertad para tomar decisiones y actuar de forma libre.

Los controladores lógicos difusos presentan una herramienta muy potente debido a su rígida estrategia de control y del hecho que actúa basándose sobre la base de reglas previamente definida por un experto humano ofreciéndole la posibilidad de emular el comportamiento de los humanos, un ejemplo simple de una máquina que puede incorporar un controlador difuso es la lavadora, al tener un sistema de control difuso esta última puede garantizar un funcionamiento mejor que las clásicas optimizando el uso de la energía y conservando el tiempo [Luc, 06], en [Hur, 05] se presenta otra aplicación por donde una máquina inteligente usa el control por lógica difusa para mejorar su funcionamiento, se trata de un robot que se encarga de evitar obstáculos de su trayecto, aquí el controlador difuso se usa para minimizar la incertidumbre de los sensores y garantizar que dicha incertidumbre no tenga efecto sobre el progreso del programa.

Otras aplicaciones de robots inteligentes han utilizado el control por lógica difusa en tareas más especificadas, en [Rez, 09] el robot dotado con un controlador lógico difuso de cinemática y otro para el par motor, los resultados de la simulación muestran que la manipulación de este robot y el seguimiento de los trayectos predefinidos se hace con alta precisión mediante la introducción de la lógica difusa en su funcionamiento. Aplicaciones parecidas de lo que se ha presentado en [Rez, 09; Ast, 07] tendrá una gran importancia y utilidad en la vida humana, ya que disponer de un robot de alto grado de

libertad y autonomía en moverse y tomar ciertas decisiones sería sin embargo herramienta muy valiosa en casos de exploración de edificios en zonas de catástrofes ó en la búsqueda de explosivos y incluso en tareas sencillas como ayudar en la repartición del correo entre las oficinas, etc.



*Figura II.10:* Robot inteligente con lógica difusa incorporada, [Hur, 05].

#### ***II.3.2.4. Aplicaciones en ingeniería eléctrica***

En la ingeniería eléctrica, mejorar el rendimiento de los motores eléctricos, precisión y rapidez en la reacción de los aparatos eléctricos etc., es el objetivo principal de todos los ingenieros. Los controladores lógicos difusos como política y estrategia de control han sido ampliamente utilizados en muchas aplicaciones de optimización en el campo de la energía eléctrica. El modelado del modo de funcionamiento de la resistencia e de la inductancia fue la aplicación la más abordada por el control difuso debido al importante papel que desempeña en el rendimiento y la eficiencia de los motores eléctricos, numerosos trabajos [Vij, 07; Hoss, 07; Tu, 07; Chit, 06; Aiss, 07] presentan varios ejemplos del intensivo uso del control mediante la lógica difusa en este campo. El [Kum, 08] presenta un ejemplo donde se controla un motor eléctrico mediante el ajuste de los parámetros de alimentación y de la excitación de las reluctancias o las inductancias, los resultados demuestran la gran contribución ofrecida por el controlador difuso: robustez, precisión superior y un aumento de la eficiencia. En

[Hoss, 07] un sistema de frenado eléctrico se ha desarrollado a base del control difuso, dicho sistema presenta ventajas en el mantenimiento de los frenos ya que economiza su uso de forma eficaz comparando con los frenos clásicos.

Otro aspecto del uso de la lógica difusa en la ingeniería eléctrica estriba en los convertidores, estos últimos forman parte esencial en cualquier proceso eléctrico, en ciertas aplicaciones la conversión de la energía eléctrica requiere un alto nivel de precisión debido a la sensibilidad de algunos componentes. De hecho, los controladores lógicos difusos han sido utilizados en este campo para provechar de sus altas prestaciones en tema de precisión y robustez [Alex, 05], varios trabajos son que han tratado de utilizar la flexibilidad de la lógica difusa en esta área mediante la modelación de la señal de salida del convertidor y la regulación del modo de frecuencia de la señal de entrada del convertidor [Siva, 05; Kesk, 97; Ofo, 05; Alex, 07].

#### ***II.3.2.5. Aplicaciones en procesos químicos***

Aunque la química puede parecer como una ciencia que no requiere muchas tecnologías, pero la regulación y el control son realmente técnicas muy solicitadas en esta área ya que casi la mayoría de las aplicaciones químicas lo necesitan. Citamos por ejemplo la necesidad de tener un control en tiempo real del tratamiento de aguas residuales, este sistema ha demostrado que está capaz de reaccionar adecuadamente a fin de establecer las condiciones favoritas de operación que condujo a recuperar de manera eficiente y en el tiempo oportuno las tasas de extracción [Pires, 06]. Algunos procesos químicos requieren ciertas condiciones para llevar a cabo la aplicación como el proceso de fermentación donde un grado fijo de la temperatura es imprescindible para la operación [Phi, 07], el diseño de un controlador lógico difuso para mantener la temperatura fija muestra que la estrategia del control difuso ofrece el mejor rendimiento global con exceso de subimpulsos mínimos o ningunos. Las pilas de combustible forma otro aspecto del uso del control difuso en procesos químicos, varios trabajos se centran en las mejoras obtenidas en este campo al usar la lógica difusa [Sah, 07; Chan, 08; Zha, 05] y muestran el efecto significativo logrado en cargar las pilas de combustible mediante la realización de experimentos reales.

Lo que hemos citados arriba era un intento de hacer un enfoque sobre la importancia y la enorme contribución realizada por la utilización del control por lógica difusa en varios campo de la vida humana. Sin embargo, las ventajas y los avances que

esa técnica añadió al campo del control inteligente están muy claros en todas las áreas que hemos visto, por consecuencia, el intensivo uso que conoce esta técnica en la mayoría de las aplicaciones por donde se requiere regulación e control está justificado. Numerosos son los campos que usan los controladores lógicos difusos, ya que actualmente este tipo de controladores presenta una herramienta muy fiable se puede encontrar en distintos procesos que requieren un algoritmo de control, citamos por ejemplo: los sistemas de seguimiento (GPS mapa de seguimiento [Jos, 04], Láser para el seguimiento de un robot y el seguimiento de la posición [Jia, 06; Luc, 06]) o los sistemas de semáforos [Gri, 07; Chiu, 05; Gao, 00] y muchas otras aplicaciones.

#### ***II.3.2.6. Aplicaciones con sistemas híbridos***

Un escaneo rápido sobre los artículos que abordan el tema del control inteligente en los últimos diez años, podría reflejar el gran efecto de los controladores lógicos difusos como estrategia de control, especialmente en casos de procesos no lineales. El uso de los controladores difusos tenía como objetivo mejorar el rendimiento y superar las limitaciones de los controladores clásicos. A pesar de los excelentes resultados obtenidos mediante el uso de los controladores lógicos difusos como controladores principales, la ambición de los investigadores aún sigue exigiendo más precisión y estabilidad en los procesos de control. De hecho, la combinación de diversas técnicas de control inteligente demostró que es una operación fructuosa, ya que ofrece a los expertos humanos la valiosa oportunidad de disfrutar de los beneficios de todas las técnicas usadas en esa combinación para superar las limitaciones que sufre cada algoritmo, el cumplimiento de este requisito también es posible mediante la modificación del propio controlador difuso adoptando una política de adaptación [Jos, 04; Luc, 06; Gri, 07] o de aprendizaje [Hua, 06; Chiu, 04] que controla los procesos mientras que el controlador mismo se encarga de adaptar sus parámetros internos y aprender del comportamiento real de la planta controlada.

En numerosos trabajos donde se adopta una política de control híbrido usan algoritmos tales como: Algoritmos genéticos, redes neuronales, controladores PID, etc. dependiendo del caso tratado. Numerosos son los trabajos que han demostrado la eficacia de los sistemas híbridos, en [Willy, 01] el diseño de un controlador lógico difuso proporcional y derivativo óptimo usando un algoritmo genético (PD-FLC) e implementándolo en un proceso de control de temperatura demuestra que la combinación entre varios algoritmos resulta fructuosa, prestando rendimiento más alto

de lo que se puede tener usando solo un algoritmo de control clásico (controlador PID convencional). La combinación entre los controladores difusos y algoritmos PID fue objeto de muchos trabajos de investigación que han ilustrado las ventajas de esta hibridación [Gao, 00; Willy, 01; Raj, 08; Yu, 09; Park, 95; Gao, 02; Khan, 08; Nar, 07].

Valorizar el rendimiento de un algoritmo de control inteligente es realmente algo relativo debido a que la noción del control es también relativa, los controladores lógicos difusos dependen de forma directa con su usuario y este último tiene la responsabilidad de precisar el grado de acierto requerido. Los científicos y los investigadores en este campo están siempre con la misma ambición de desarrollar e inventar nuevos algoritmos de control y acercar aún más a los límites de la perfección.

### **II.3.3. Consumo energético y control lógico difuso**

Una breve revisión del estado de arte del control inteligente y el control por lógica difusa deja claro el intensivo uso de esos últimos en diversos campos de la vida humana, sin embargo, este uso está justificado por las características y las facilidades que disponen los controladores difusos. Motivado por la ambición humana de alcanzar el mejor rendimiento posible, el uso del control difuso ha sido siempre un área de investigación y desarrollo muy prometedor, presentando una alternativa muy atractiva en casos por donde otras técnicas presentan rendimiento limitado o insuficiente, ya que podemos encontrar los controladores difusos en casi todas las aplicaciones por donde se requiere una política de control, el párrafo anterior lo demuestra de forma amplia.

Hoy en día, la vida moderna cada vez está más relacionada con la energía que forma un recurso vital, la producción, comercialización y la explotación de la energía son temas de mayor importancia, de hecho, el uso moderado y adecuado de la energía ha sido siempre un objetivo a lograr. Sin embargo, la energía forma un factor determinante para la industria, el desarrollo y la productividad que crecen día tras otro hacen del uso moderado de la energía objeto de numerosos debates científicos.

La electricidad es el principal tipo de la energía consumida por la industria, de hecho, la conciencia de las posibilidades de reducir el consumo de la energía ha motivado los investigadores para desarrollar y inventar técnicas capaces de ahorrar la energía eléctrica en diversos procesos como por ejemplo en la electrónica de potencia [Bose, 00]. El control inteligente como herramienta muy potente, ha sido poco utilizado por los sistemas que pueden garantizar un ahorro energético. Sabiendo que los

controladores marcan una gran presencia en la industria, presentar modelos de controladores capaces de ahorrar la energía sería una contribución muy valiosa debido a las consecuencias de este ahorro. En la literatura pocos trabajos que han presentado métodos capaces de optimizar y ahorrar la energía utilizando políticas de control inteligente [Reza, 02; Parg, 02; Yao, 05; Shuo, 06; Chiou, 09; Bai, 10]. En la mayoría de los estudios realizados sobre el ahorro energético usando técnicas de control inteligente utilizan los controladores como administradores del sistema de alimentación del actuador del proceso y muy pocos los que han presentado modelos de control directo del actuador como es el caso en la metodología propuesta en la presente tesis.

- Control directo: casos donde el controlador se encarga de alimentar directamente el actuador de la planta controlada, es decir, el controlador se encarga de calcular y estimar la alimentación adecuada para alimentar el actuador del proceso (mediante su salida) usando varios parámetros del sistema como variables de entrada.
- Control y administración del sistema: casos donde el controlador se encarga de organizar y optimizar el uso de la energía para limitar o evitar el sobre uso de la energía garantizando una alimentación adecuada del proceso, es decir, administrar el modo de funcionamiento del sistema de alimentación y organizar la alteración entre los actuadores del proceso si hay más de uno.

En [Shuo, 06] se propone un controlador PID difuso con auto-ajuste capaz de garantizar una conducción estable del Semi-Truck Air-Cushion Vehicle (STACV) con el mínimo consumo de energía y en [Li, 07] el controlador difuso se usa para modelar y economizar el consumo eléctrico de la inducción de un motor eléctrico. Gracias a sus características que no dependen de los parámetros del proceso, el controlador difuso ha sido capaz de ahorrar la cantidad de energía utilizada por el motor sin afectar el rendimiento general del proceso, mientras el [Chiou, 09] presenta un proceso de control del sistema de calificación de un hospital mediante tres controladores diferentes (FLC, PI/PID, ON/OFF), los resultados obtenidos muestran que el controlador difuso presenta los mejores resultados (el mejor precisión y el consumo eléctrico el más bajo) durante el proceso de control, en [Reza, 02] el controlador difuso se encarga de administrar el uso de la energía mediante la alteración de los actuadores según la necesidad del proceso controlado garantizando un control robusto y un consumo de energía muy moderado para el sistema del aire-acondicionado. [Parg, 02] presenta otro ejemplo donde se usa la

política de control inteligente para garantizar el ahorro energético y el confort de los usuarios dentro de un edificio mediante la administración del sistema eléctrico de alimentación del edificio.

Generalmente, en los pocos trabajos que figuran en la bibliografía, los controladores usados han podido garantizar un cierto ahorro energético a diferencia del modo de uso del controlador (control directo o como administrador del sistema). De hecho, contribuir en esta área con una nueva metodología capaz de realizar un importante ahorro energético simultáneamente con una notable precisión fue uno de los objetivos del presente trabajo de investigación.

# Capítulo III

## *“SISTEMA REAL UTILIZADO: Entorno Experimental”*

### *Resumen:*

En este capítulo se muestra el sistema real utilizado para probar todos los algoritmos de control diseñados en esta tesis. Se presenta en detalle dando explicaciones sobre su funcionamiento y su modo operatorio, también se presentan algunas funciones especiales usadas en el proceso de programación de los controladores.



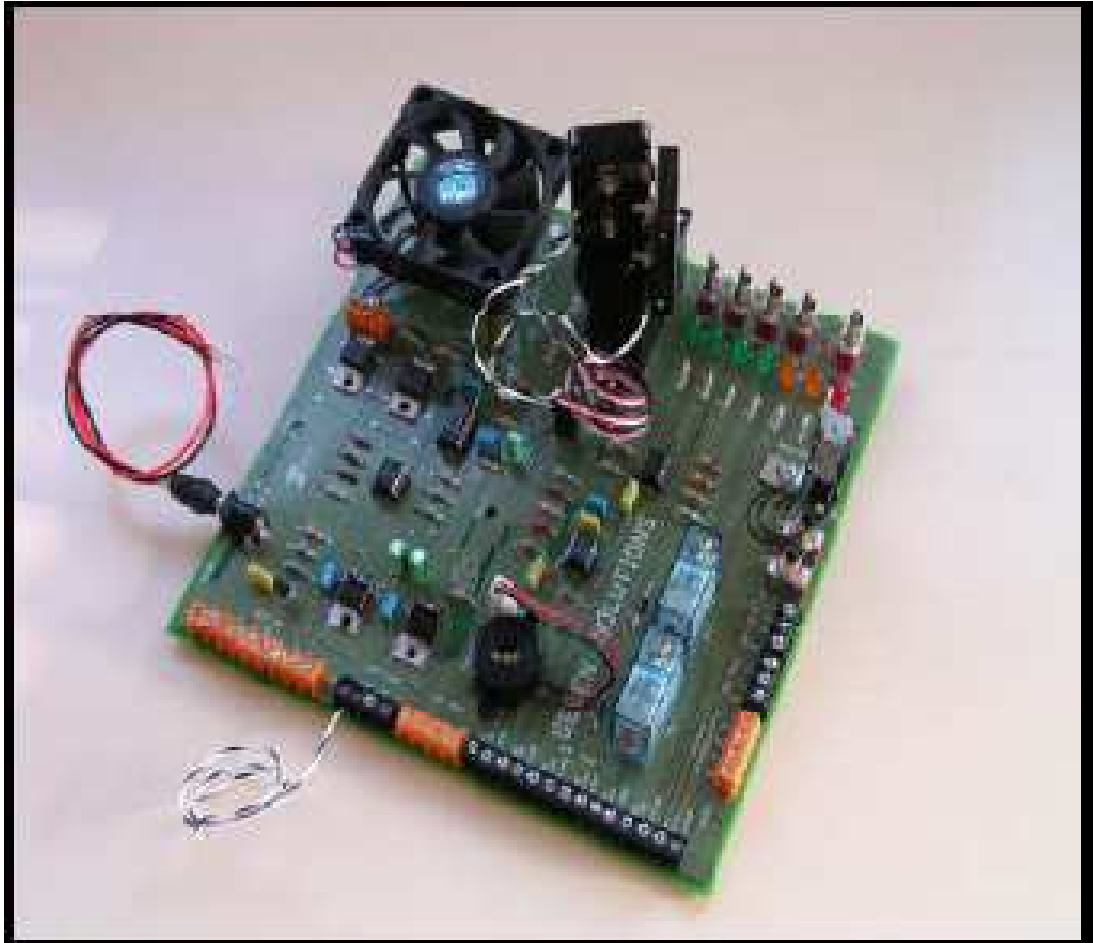
### **III. SISTEMA REAL UTILIZADO -ENTORNO EXPERIMENTAL -**

El principal objetivo de esta tesis era ilustrar y demostrar la eficacia de la política del control adaptativo difuso propuesta, dicha demostración se basa esencialmente sobre la comparación del comportamiento del algoritmo propuesto frente al comportamiento de otros algoritmos de control en el mismo proceso de control y bajo las mismas condiciones, de hecho, se ha elegido un proceso de control de temperatura como entorno experimental para este estudio. La maqueta entrenadora llamada SENSONYC V1.0 fue el principal entorno experimental. Basándose sobre los resultados obtenidos de los experimentos realizados se ha procedido a analizar y comparar el rendimiento de cada uno de los algoritmos utilizados en esta tesis.

En lo que viene se presentan en detalle las características de la maqueta entrenadora utilizada como entorno experimental en este estudio.

#### **III.1. Descripción general de la maqueta utilizada**

La plataforma Sensonyc proporciona todas las facilidades esenciales necesarias para investigar una selección de experimentos de control automático industrial de manera interactiva e intuitiva. Para ello, esta plataforma contiene una serie de módulos sensor-actuadores de sencillo uso. En conjunto, la plataforma, se ha desarrollado con el propósito de ser interconectada, bien con módulos tipo ICP-CON, bien con PLC (autómatas programables).



*Figura III.1:* La plataforma Sensonyc utilizada en el experimento.

La plataforma utilizada tiene incorporado varios dispositivos que permiten efectuar diversos procesos de control como por ejemplo: control de temperatura, control de seguimiento solar, control de velocidad proporcional y control todo-nada con realimentación y disponiendo de varios tipos de indicadores que permiten visualizar y seguir los procesos realizados en tiempo real tales como: sistema de visualización de Leds, conmutadores e relés y un Zumbador piezo-eléctrico.

### **III.2. Dispositivos incorporados en la maqueta**

La plataforma Sensonyc ofrece la oportunidad de efectuar distintos experimentos de control automático disponiendo de varios dispositivos que son capaces de llevar a cabo dichos procesos. La alimentación de la maqueta se hace mediante un Kit que incluye una fuente conmutada modelo: AC/CC PSU, SM 2-PIN 15 Volt y 1.25 Amp con conector (tipo Jak) de positivo central.

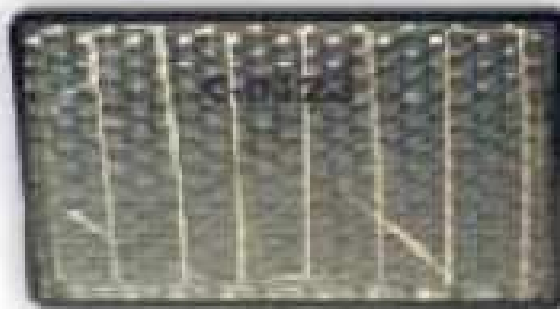
Los principales componentes de la maqueta son los siguientes:

- Servomotor (1 unidad) con codificación de posición mediante PWM o PCM modelo Futaba S3003. El servomotor se utiliza esencialmente en el control de la posición de las placas solares en el proceso del seguimiento solar.



*Figura III.2:* Servomotor modelo Futaba S3003.

- Micro-placas solares (2 unidades), Tensión nominal 0.45V. Corriente 100 mA. Se trata de unas células solares encapsuladas y montadas en unas carcasas de policarbonato de color negro. Estas placas solares están conectadas a un circuito adaptador de nivel suministrando una salida entre 0 y 10V o -5 y 5V para salidas diferenciales proporcional a la luz recibida.



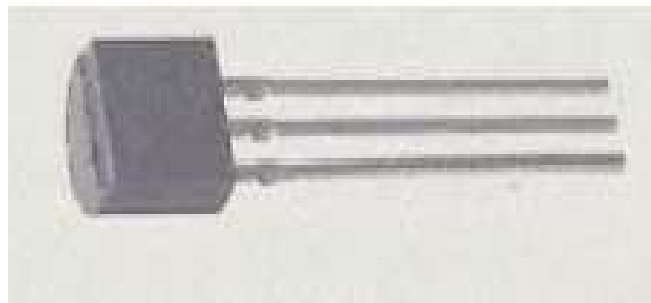
*Figura III.3:* Micro-placas solares.

- Ventilador de corriente continua (1 unidad) con sensor de velocidad de giro modelo CMP-FAN15 de dimensiones 60 x 60 x 15 mm.



*Figura III.4:* Ventilador de corriente continúa.

- Sensor digital de temperatura (1 unidad) LM335. Proporciona una tensión de salida lineal con la temperatura de 10mV/°C. -40/+110°C.



*Figura III.5:* Sensor de temperatura.

- Bombilla (1 unidad) con encendido electrónico ajustable. 12V 5W.



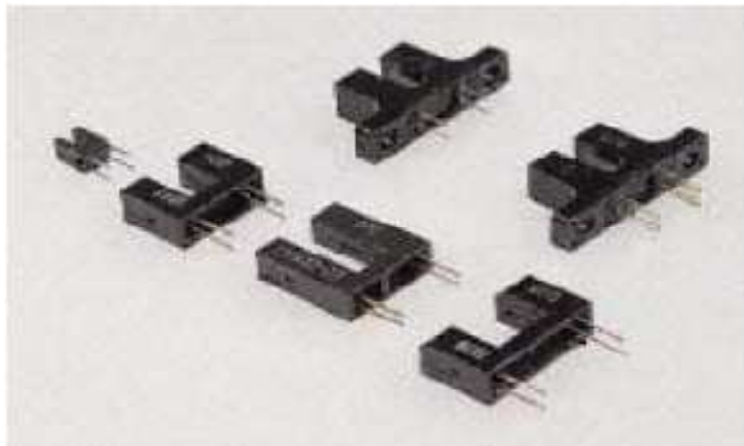
*Figura III.6:* Bombilla con encendido electrónico ajustable.

- Solenoide/electroimán (1 unidad) 12Vdc. Electroimán de armadura abierta.



*Figura III.7:* Solenoide/electroimán de armadura abierta.

- Sensor óptico de ranura. Interruptor, fotoeléctrico de ranura, abertura de 5mm. Consta de una fuente luminosa LED infrarrojo y de un fototransistor montados en una moldura ranurada. En este dispositivo se establece un haz directo entre el emisor y el receptor, con un espacio entre ellos que puede ser ocupado por un objeto. Al interceptar el haz se activa la detección.



*Figura III.8:* Sensor óptico de ranura.

- Zumbador piezo-eléctrico de estado sólido. Es un dispositivo electrónico que emite un sonido audible cuando se aplica una corriente continua (DC) entre sus terminales (“+” positivo al rojo y “-” negativo al negro). Este dispositivo utiliza un oscilador interno que hace vibrar un elemento piezoeléctrico a una frecuencia de entre 3 y 4 kHz. que se corresponde con la máxima sensibilidad del oído humano.



**Figura III.9:** Zumbador piezo-eléctrico de estado sólido.

- Conmutadores de configuración. Conmutador 1 Circuito 2 Posiciones 250V/3A 13x7 mm. Mediante estos conmutadores se configura la plataforma para utilizar los distintos actuadores y sensores según se prefiera ya que, por ejemplo, la bombilla y el servo motor comparten la misma señal de control.



**Figura III.10:** Conmutadores de configuración.

- Conmutadores digitales. Conmutador 1 Circuito 2 Posiciones 250V/3A 13x7 mm. Estos conmutadores permiten generar señales digitales TTL.



**Figura III.11:** Conmutadores digitales.

- Conmutadores de configuración. Conmutador 1 Circuito 2 Posiciones 250V/3A 13x7 mm. Mediante estos conmutadores se configura la plataforma para utilizar los distintos actuadores y sensores según se prefiera ya que, por ejemplo, la bombilla y el servo motor comparten la misma señal de control.



*Figura III.12:* Conmutadores de configuración.

- Escala de leds: 7 leds 4 verdes 2 amarillos 1 rojo.



*Figura III.13:* Escala de leds.

### **III.3. Experimentos de control incorporados**

Los dispositivos incorporados en la plataforma utilizada ofrecen la oportunidad de realizar varios experimentos de control automático y observar y registrar los resultados obtenidos. En lo que viene se presenta en breve dichos experimentos.

#### ➤ Control de seguimiento solar:

Montado sobre el servomotor hay dos pequeñas placas solares orientadas a 45° y conectadas al eje vertical del servo. Comparando la diferencia de luz entre ambas placas solares es posible orientar el servomotor hacia la zona de mayor índice lumínico. Por ejemplo se puede implementar un sistema que se oriente siguiendo la luz de una linterna o se puede utilizar como disparador de forma que a partir de cierto umbral lumínico se desencadenen otros procesos. El servomotor codifica la posición mediante una entrada analógica ajustando el ángulo de giro entre 0 y 200°.

➤ Control de velocidad proporcional:

Utilizando el ventilador es posible ajustar y medir la velocidad de rotación. Por ejemplo se puede ajustar la velocidad en función de la luminosidad recibida por las placas solares e introducir perturbaciones para ver la respuesta del sistema simplemente tapando una de las placas solares con la mano.

➤ Control todo-nada con realimentación:

Mediante el electro-imán y el sensor óptico de ranura, se pueden hacer experiencias de activación de actuadores todo-nada con comprobación de la acción realizada mediante la realimentación del sensor de ranura.

➤ Sistema de visualización de leds:

Mediante la barra de indicadores luminosos formada por 7 leds es posible mostrar el valor de una consigna, la medida de un sensor o cualquier otro parámetro que se desee. Los leds se pueden encender de forma individual o en escalera. Por ejemplo se podría mostrar la velocidad del ventilador o la temperatura

➤ Conmutadores y relés:

Mediante 2 pulsadores con salida digital filtrada antirrebotes se pueden mandar señales digitales que desencadenen acciones en procesos, como por ejemplo incrementar o decrementar una consigna. La placa también permite la activación de elementos externos mediante dos relés de media potencia de forma manual o automática.

➤ Zumbador piezo-eléctrico

Accesible desde un controlador externo, puede ser activado para generar una alarma en cualquier momento del ciclo de control.

➤ Control de temperatura

Utilizando la bombilla, el sensor de temperatura y el ventilador de corriente continua, se puede ajustar la temperatura del entorno del sensor para mantenerla en una consigna dada. El ajuste se realiza controlando la velocidad de rotación del ventilador, mediante la variación de la intensidad de alumbrado de la bombilla o con los dos mecanismos a la vez. Incluso se puede mantener uno de los dos elementos fijo y ajustar el otro para conseguir la estabilidad térmica de consigna.



### III.4. Control de temperatura: preparación de la plataforma

La plataforma Sensonyc está capacitada para simular varios experimentos de control inteligente, disponiendo de varios circuitos de entrada y de salida que se usan en común por sus dispositivos incorporados. De hecho, antes de abordar un proceso de control habrá que configurar las entradas y las salidas para funcionar según el modo requerido.

En este trabajo el objetivo era el control de la temperatura alrededor del sensor incorporado, para ello la configuración de la maqueta en el modo control de temperatura es imprescindible.

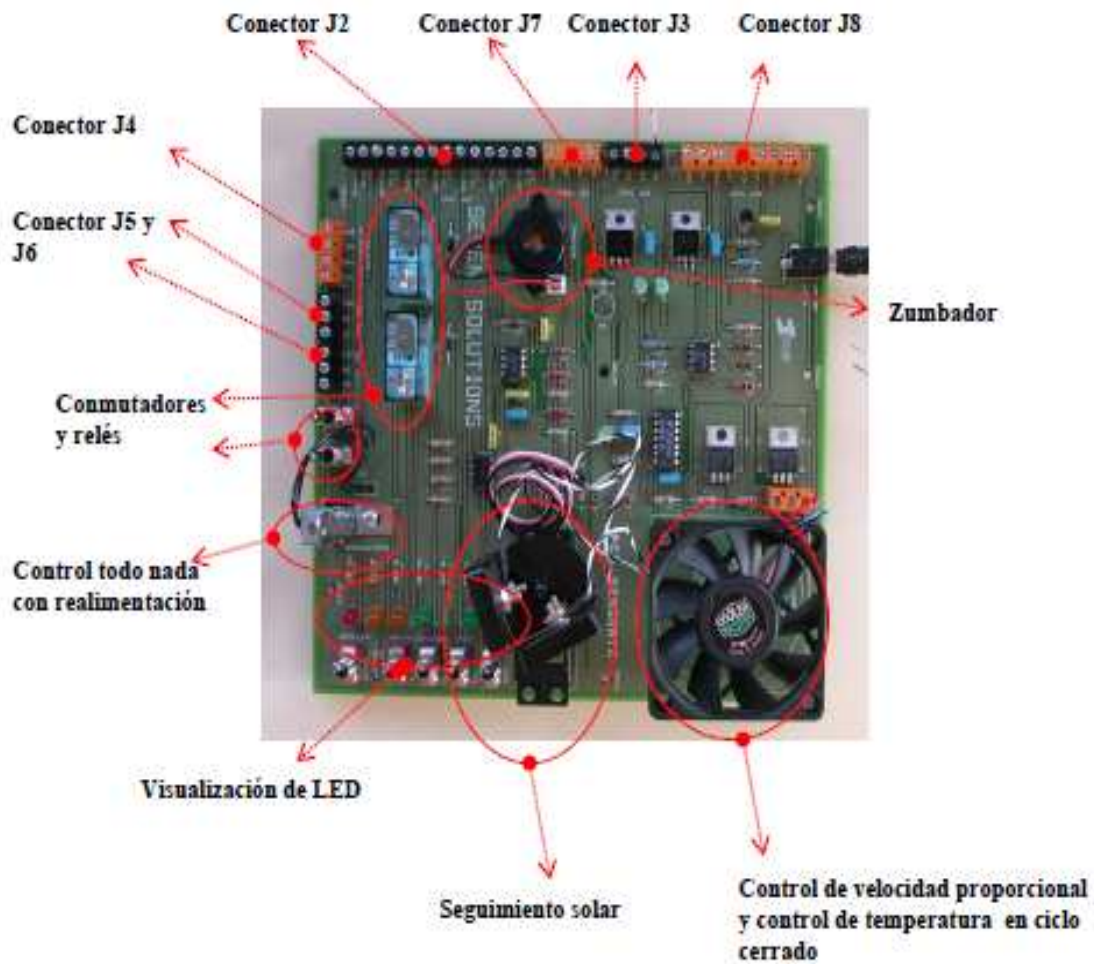


Figura III.14: Conexión general de entradas y salidas de la plataforma.

La interconexión entre la maqueta y la computadora se establece mediante los módulos ICP que sirven como interfaz de comunicación y de conversión digital-analógica/analógica-digital. El uso del kit de herramientas software DCON\_Utility nos facilita tanto la búsqueda de la red de conexión como la configuración y prueba de los módulos ICP. La conexión se realiza a través del puerto serie (RS 232/485), USB o vía Ethernet (usando el puerto virtual COM port). En nuestro caso la conexión se ha establecido mediante un cable USB.



*Figura III.15:* Módulo ICP utilizado.

Las salidas analógicas de esta plataforma tienen un rango comprendido entre 0-10V. Las entradas analógicas a los módulos ICP son diferenciales, con rango de tensiones negativas (-10 a +10V, -5 a +5V). Nuestra plataforma internamente sólo trabaja con rangos positivos. Si se conectase directamente las salidas analógicas al ICP solo trabajarían con la mitad del rango posible (0-10V en lugar de utilizar -10 a 10V perdiendo resolución). La solución que se ha implementado consiste en utilizar una tensión de precisión de 5V en -V. Estos 5V serán la tensión que utilice el ICP como referencia de 0V de la entrada diferencial, manteniendo el rango de medida sin pérdida de resolución. (El módulo ICP con entradas analógicas ha de configurarse para rangos [-5V, +5V]).

En este caso se ha usado dos módulos ICP, de entrada y de salida (ICP 7022, ICP 7017), La conexión de la tarjeta con los elementos de control se realiza mediante clemas con tornillo de ajuste. Se hará entonces necesario utilizar algunos cables para conectar la tarjeta según la experiencia a realizar. La salida de cada sensor y entradas de cada

actuador proporcional se conectan directamente a entradas o salidas analógicas entre 0-10V o entre -5 y 5V para entradas diferenciales o entradas digitales del módulo de control (depende del tipo de sensor).

En la maqueta los conectadores J3 y J8 son realmente las entradas y salidas de la bombilla y del ventilador. Conectando los pines de esos dos conectadores podemos empezar a controlar el funcionamiento de los dos dispositivos.

➤ **Conexión entre el conector J3 y el módulo ICP 7022**

Se necesita configurar el switch S3 de configuración en la posición BOMBILLA.

- PIN2                      BOMBILLA (0-10V)
- PIN4                      VENTILADOR (0-10V)

**Tarjeta Sensonyc**

**ICP**

- PIN 1 V0-                -VOUT0
- PIN 2 V0+                (BOMBILLA)+VOUT0
- PIN 3 V1-                -VOUT1
- PIN4 V1+                (VENTILADOR)+VOUT1

➤ **Conexión entre el conector J8 y el módulo ICP 7017**

- PIN1                      VENTILADOR
- PIN3                      BOMBILLA

**Tarjeta Sensonyc**

**ICP**

- PIN 1 V1+                VENTILADOR Vin0+
- PIN 2 V1-                Vin0-
- PIN 3 V2+                BOMBILLA Vin1+
- PIN 4 V2-                Vin1-
- PIN 9 GND                GND de ICP

### **III.5. Proceso de programación y de comunicación con la plataforma**

La conexión entre la plataforma y la computadora está garantizada mediante el uso de los módulos ICP de la familia I7000. El software DCON\_7000UTILITY presenta un Kit de herramientas que permiten la configuración de los módulos ICP de serie 7000/8000. Las principales funciones del 7000UTILITY son:

1. La selección del RS-232 Com port.
2. Búsqueda y detección de los módulos ICP de serie 7000 conectados con la computadora.
3. Configurar la instalación de los módulos ICP de serie 7000.
4. Calibración de los módulos.
5. Entradas y salidas analógicas (analog Input/Output).
6. Entradas y salidas digitales (digital Input/Output).
7. Configuración de alarma.

Después de instalar el DCON\_7000UTILITY y configurar todos los módulos conectados es necesario incorporar varias librerías de enlace dinámico (Dynamic Link Library, DLL) que sirven para garantizar la comunicación entre los módulos ICP y la computadora mediante un lenguaje de programación, este software soporta varios tipos de lenguajes que pueden ser utilizados para manejar los módulos ICP, podemos citar por ejemplo: VC++, BC++, BC++ Builder, VB y Delphi. Las dos principales librerías son: UART.DLL e I7000.DLL.

La librería UART.DLL sirve en la configuración del puerto utilizado de la computadora mientras que la librería I7000.DLL está designada para las aplicaciones de los módulos ICP 7000/8000, llamando a la librería UART.DLL. La librería I7000.DLL puede enviar comandos y recibir los resultados desde los módulos ICP. El funcionamiento de cualquier aplicación programada con algún lenguaje de programación de los antes citados se han de añadir diversos ficheros de inclusión (Include file) y archivos de cabecera (Header file) en los programas. El fichero de cabecera del UART.DLL es el I7000.H y su fichero de importación de librería es el UART.LIB.

En este trabajo se ha utilizado el BC++Builder como lenguaje de programación, así que para garantizar el funcionamiento del proceso y la comunicación es imprescindible incluir el conjunto siguiente de ficheros de inclusión:

1. \NAP7000P\Driver\uart.dll DLLs ..... Relacionados con el RS232.
2. \NAP7000P\Driver\I7000.dll DLLs ..... Relacionados con el ICP 7000 series.
3. \NAP7000P\Demo\BCB\uartbc.lib ..... Librería de importación del uart.dll.
4. \NAP7000P\ Demo\BCB\I7000bc.lib .... Librería de importación del I7000.dll.
5. \NAP7000P\ Demo\BCB\I7000.h ..... Fichero de declaraciones para el uart.dll & I7000.dll.
6. \NAP7000P\ Demo\BCB\I7000U.cpp ... Algunas funciones para el BCB.

La UART.DLLs consiste en seis funciones exportadas, las dos principales que se van a usar son:

- Open\_Com: Esta DLL se encarga de inicializar y abrir el COM port. Se usa siempre antes de llamar a las otras DLLs.
- Close\_Com: Esta DLL libera todos los recursos usados por Open\_Com.

La I7000.DLLs consiste en varios tipos de funciones exportadas, cada uno de los cuales incorpora una serie de funciones que sirven para manejar los módulos ICP según el modo requerido.

### **III.5.1. Funciones principales del ICP usadas en la programación del proceso**

Los módulos de interfaz ICP ofrecen una variedad de librerías que disponen de distintos tipos de funciones compatibles con los lenguajes de programación admitidos por esos módulos. Mediante esas funciones los módulos pueden manejar y comunicarse con los componentes externos que se encuentran incorporados en las plataformas con las cuales se establece una conexión. Las principales funciones usadas en este trabajo son las siguientes:

#### *Test Functions:*

Conjunto de funciones de test para probar la disponibilidad de las librerías DLLs.

*Analog Input/Output Functions:*

Funciones utilizadas para enviar/recibir valores analógicos hacia/desde la plataforma.

*Digital Input/Output Functions:*

Funciones utilizadas para enviar/recibir valores digitales hacia/desde la plataforma.

*Alarm Functions:*

Función de configuración y de control de la alarma.

*Event Counter Functions:*

Funciones que administran el uso del contador de eventos del sistema.

*Dual Watchdog Functions:*

Funciones de configuración del módulo Watchdog.

Durante el experimento se ha usado varios tipos de funciones para comunicar y configurar las entradas y salidas de la plataforma. En lo que viene presentaremos las principales funciones utilizadas.

➤ ***Open\_Com:***

• *Sintaxis:*

WORD                      Open\_Com (char cPort, DWORD dwBaudRate, char cData, char cParity, char cStop)

• *Parámetros de entrada:*

cPort:                      1 = COM1, 2 = COM2 .... , 255 = COM255

dwBaudRate:              50/75/110/134.5/150/300/600/1200/1800/2400/4800/7200/9600/  
19200/38400/57600/115200/230400/460800/921600

cData:                      5/6/7/8 data bit

cParity:                    0=NonParity, 1=OddParity, 2=EvenParity

cStop:                      0=1-stop, 1=1.5-stp, 2=2-stop

Se debe notar aquí que para los módulos de serie 7000 algunos parámetros toman sus valores por omisión: cData = 8, cParity = 0, cStop = 0.

➤ **Close\_Com:**

• *Sintaxis:*

WORD                      Close\_Com (char cPort)

• *Parámetros de entrada:*

cPort:                      1 = COM1, 2 = COM2 .... , 255 = COM255.

➤ **AnalogIn:**

• *Descripción:*

Lee el valor de la entrada analógica de los módulos 7000.

• *Sintaxis:*

AnalogIn (WORD w7000[], float f7000[], char szSendTo7000[], char  
szReceiveFrom7000[])

• *Parámetros de entrada (Input):*

w7000:                      variable de tipo WORD presenta la tabla de los  
argumentos de Input/Output.

f7000:                      variable de tipo float presenta la tabla de los  
argumentos de Input/Output.

szSendTo7000:              cadena de comando para enviar a los módulos 7000.

szReceiveFrom7000:        cadena de resultado de lectura de los módulos 7000.

• *W7000:*                      *Tabla tipo WORD de los Input/Output.*

w7000[0]:                    numero del Puerto utilizado de 1 hasta 255.

w7000[1]:                    dirección del módulo, de 0x00 hasta 0xFF.

w7000[2]:                    ID del módulo, 0x7011/7012/7013/7014/7017/7018/7033.

w7000[3]:                    0 = checksum habilitado, 1 = checksum deshabilitado.

w7000[4]:                    constante del TimeOut, normal=100.

w7000[5]:                    número del canal para los módulos 7017/7018/7033.

w7000[6]:                    0 → no se guarda en szSendTo7000&szReceiveFrom7000  
1 →szSendTo7000 = cadena de comando enviada al 7000  
→szReceiveFrom7000 = cadena de resultado recibida.

• *F7000:*                      *Tabla tipo Float de los Input/Output.*

f7000[0]:                    valor de entrada analógica recibida (Input).

## ➤ *AnalogOut*

- *Descripción:*

Envía el comando del valor de la salida analógica a los módulos 7000.

- *Sintaxis:*

AnalogOut (WORD w7000[], float f7000[], char szSendTo7000[], char szReceiveFrom7000[])

w7000: variable de tipo WORD presenta la tabla de los argumentos de Input/Output.

f7000: variable de tipo float presenta la tabla de los argumentos de Input/Output.

szSendTo7000: cadena de comando para enviar a los módulos 7000 (para depuración).

szReceiveFrom7000: cadena de resultado de lectura de los módulos 7000 (para depuración).

- *W7000:* *Tabla tipo WORD de los Input/Output.*

w7000[0]: número del puerto usado de 1 hasta 255.

w7000[1]: dirección del módulo, de 0x00 hasta 0xFF.

w7000[2]: ID del módulo, 0x7021/ 0x7024.

w7000[3]: 0 = checksum habilitado, 1 = checksum deshabilitado.

w7000[4]: constante de TimeOut, normal=100.

w7000[5]: número del canal. (0 a 3) si ID módulo es 7024;  
// No se usa si el ID del modulo es 7021.

w7000[6]: 0 → no se guarda en szSendTo7000&szReceiveFrom7000  
1 →szSendTo7000 = cadena de comando enviada al 7000  
→szReceiveFrom7000 = cadena de resultado recibida.

- *F7000:* *Tabla tipo Float de los Input/Output.*

f7000[0]: valor de salida analógica enviada (Input).



### **III.6. Resumen del entorno experimental**

La preparación y la configuración de la maqueta pasa por varios procesos antes de estar lista para ser utilizada. Primero habrá que elegir el proceso de control que se propone utilizar mediante la configuración de los Swiches de las entradas y las salidas de los sensores y los actuadores. En este trabajo y para proceder al control de la temperatura se ha elegido el ventilador y la bombilla como actuadores y el sensor de la temperatura como entrada. El principio fundamental del experimento estriba en controlar la temperatura ambiental alrededor del sensor incorporado en la plataforma. Para ello se fija la consigna que alimenta la bombilla en un valor fijo para establecer un cierto grado de temperatura y mediante el control del ventilador se procede a llevar la temperatura medida a un grado definido que es el Setpoint predefinido por el usuario en el programa del controlador. Fijando la alimentación de la bombilla se puede tener una temperatura estable en el entorno del sensor: bajar dicha temperatura sin cambiar la alimentación de la bombilla necesita una intervención del ventilador. La variación de la señal de alimentación del ventilador implica una variación en el número de giros efectuados por este último y por lo tanto influye sobre el grado de refrescamiento. De hecho, la entrada de alimentación del ventilador es la salida del controlador que se genera para llegar al grado de temperatura requerido.

La conexión entre la maqueta y la computadora se hace mediante el uso de los módulos de interfaz ICP que ofrecen mediante el uso del Software DCON la oportunidad de calibrar y probar el funcionamiento de los actuadores y las salidas de forma independiente antes de empezar el proceso de control. El uso de los módulos de interfaz ICP da la opción de elegir entre distintos lenguajes de programación para programar los algoritmos de control que se pretende probar, Borland C++ Builder fue el lenguaje de programación elegido en este trabajo para todos los experimentos realizados, de hecho, después de diseñar e implementar los controladores objeto de este estudio se ha procedido a programarlos usando el BC++Builder y probar el comportamiento de cada uno de ellos sobre la plataforma en un proceso de control real. En el capítulo V se presentan los algoritmos de control utilizados en este estudio. El diseño, la implementación/configuración y la comparación entre el comportamiento real de cada uno de los algoritmos sobre la plataforma en tiempo real se abordarán en detalle.

# Capítulo IV

## “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES USADOS”

### *Resumen:*

En este capítulo se abordará profundamente los pasos seguidos en el diseño e la implementación de cada uno de los controladores utilizados en la tesis. Especialmente, las diferentes etapas de la nueva metodología de control difuso adaptativo propuesta, explicando en detalle el proceso de adaptación de los consecuentes de las reglas del controlador adaptativo y el proceso de optimización de sus funciones de pertenencia.

## **IV. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES USADOS**

El estudio comparativo presentado en esta tesis se basa sobre la comparación de los resultados y el comportamiento de cada algoritmo usado en el mismo proceso de control y bajo las mismas condiciones en tiempo real. Mediante el control de la temperatura utilizando la plataforma previamente presentada, varios tipos de algoritmos intentarán controlar la temperatura presentando sus mejores cualidades en el proceso de control. La comparación entre los resultados obtenidos en tema de precisión, rapidez entre otras características destacará las diferencias que existen entre ellos.

El conjunto de algoritmos de control utilizado en esta tesis contiene algoritmos de control convencional que se ponen en prueba frente al algoritmo de control adaptativo difuso propuesto. Los controladores convencionales son de dos tipos: controladores a base de estructuras P (Proporcional), I (Integral) y D (Derivativo) y un controlador difuso estático. Mediante varios niveles de comparación del rendimiento de estos últimos frente al rendimiento del controlador difuso adaptativo se puede destacar las principales ventajas y aportaciones añadidas por la nueva estrategia de control inteligente propuesta en este trabajo.

### **IV.1. Diseño e implementación de controladores de tipo P, I y D**

El control Proporcional, Integral e Derivativo, se considera como una de las políticas de control las más antiguas en el área del control y que presenta un buen rendimiento, sobre todo en procesos que no presentan alto nivel de complejidad. Según Åström y Hägglund [Åström, 06], más del 90% de los procesos a lazo cerrado han sido controlados por algoritmos de estructura PID. El amplio uso de este tipo de controladores viene justificado por los buenos resultados obtenidos mediante el uso de este tipo de controladores.

Tal como indica su nombre, el controlador PID suma las tres acciones (Proporcional, Integral e Derivativo) para obtener la acción de control. La ecuación (IV.1) describe el algoritmo de control PID:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{IV.1})$$

Siendo que:

$K_p e(t)$ : La acción Proporcional.

$\frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$ : La acción Integral.

$K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$ : La acción Derivativa.

$e(t)$  es el error de la señal y  $u(t)$  es la entrada de control del proceso.  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es la constante de tiempo integral y  $T_d$  es la constante de tiempo derivativa.

Cada una de las tres acciones tiene un efecto bien determinado sobre el proceso de control. La acción proporcional se encarga de reducir el error en régimen permanente, la acción integral disminuya y elimina el error en estado estacionario y la acción derivativa actúa cuando se detectan cambios en el valor absoluto del error.

#### **IV.1.1. Sintonización del controlador PID**

La sintonización del controlador que se pretende utilizar se considera como un paso muy importante, ya que los parámetros obtenidos de la sintonía son responsables del futuro comportamiento del controlador. La sintonización de los primeros modelos del controlador PID se basaba únicamente en la propia experiencia del usuario o en métodos analíticos [Ben, 00]. En 1942, Ziegler y Nichols [Zieg, 42] propusieron nuevas técnicas empíricas, que han sido desarrolladas y mejoradas por varios investigadores.

Las dificultades de obtener la descripción analítica de ciertos procesos hace de la sintonización empírica una buena alternativa, sobre todo en la industria. La sintonía empírica se hace mediante dos pasos esenciales, son:

- Estimar las principales características del comportamiento del proceso a controlar en lazo abierto o en lazo cerrado.
- Obtención de los parámetros del controlador diseñado mediante las fórmulas de ajuste predefinidas.

Una vez se ha establecido los parámetros del controlador, se requiere un último ajuste fino. Se hace mediante la observación del comportamiento del controlador al controlar el proceso en lazo cerrado.

#### IV.1.2. Sintonización real de los controladores de estructura P, I y D

Numerosos son los mecanismos de sintonización de los controladores PID, generalmente se puede determinar los parámetros del controlador mediante la identificación del modelo matemático o vía métodos experimentales, la obtención del modelo matemático de una planta permite aplicar distintas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. Sin embargo si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, debemos recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID. El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño se conoce como sintonización del controlador. En [Zieg, 42] se propone sintonizar los controladores PID, determinando los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  que componen los parámetros de las acciones del controlador diseñado.

En un proceso de control de temperatura tal como el presentado en esta tesis, la obtención del modelo matemático de la planta no presenta seria complicación pero, sin embargo, la sintonización del controlador basándonos sobre la identificación matemática del modelo resulta más complicada que la sintonización experimental así que la determinación de los parámetros del controlador experimentalmente fue adoptada en este caso [Zieg, 42]. Para ello se establece  $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ . Usando sólo la acción de control proporcional, se incrementa  $K_p$  de 0 a un valor crítico o último  $K_u$  en donde la salida exhiba primero oscilaciones sostenidas (Figura IV.1). En función de los valores de  $K_u$  y  $P_u$  obtenidas se establecieron los valores de los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo con las fórmulas que aparecen en la Tabla IV.1.

Estructura del controlador	Parámetros		
	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Controlador P	$0.5K_u$	$\infty$	0
Controlador PI	$0.45K_u$	$P_u/1.2$	0
Controlador PID	$0.6K_u$	$P_u/2$	$P_u/8 = T_i/4$

Tabla IV.1: Formulas para la sintonización del controlador en lazo cerrado.

En este proceso de sintonización del controlador PID la entrada del controlador será el error del sistema controlado, es decir, la diferencia entre la temperatura de referencia ( $T_{sp}$ ) y la temperatura actual ( $T_{act}$ ) detectada por el sensor, la ecuación de la señal de entrada viene dada por:  $e = T_{sp} - T_{act}$ .

La Figura IV.1 muestra la respuesta del sistema tras aumentar la ganancia  $K_p$ , la aparición de las primeras oscilaciones sostenidas permite determinar los parámetros utilizados en la Tabla IV.1 para obtener los parámetros del controlador según la estructura requerida, a partir de la respuesta representada en la figura se puede calcular el periodo crítico o último  $P_u$  de las oscilaciones sostenidas obtenidas tras aplicar la ganancia  $K_u$ .

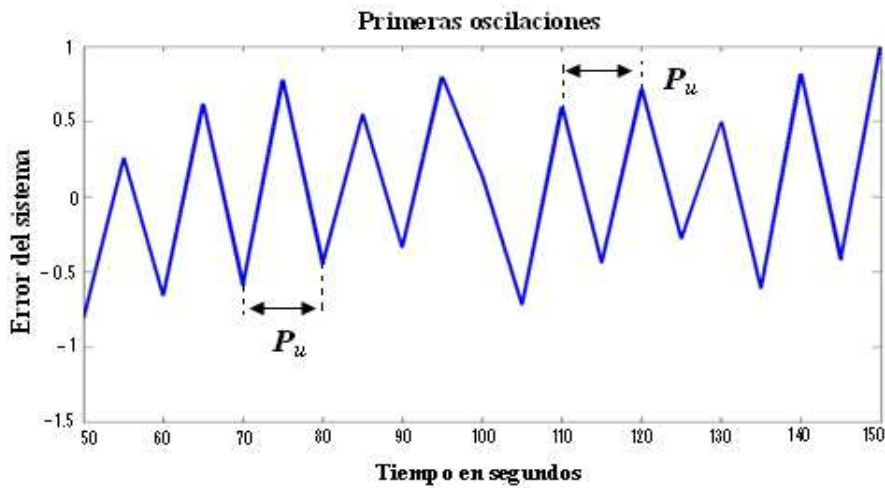


Figura IV.1: Primeras oscilaciones reales del sistema usando la ganancia  $K_{pu}$ .

El  $P_u$  en este caso es de 10s y la ganancia por la cual se ha obtenido esas oscilaciones es  $K_u = 32$ . Seguidamente se procede a calcular el resto de los parámetros para cada controlador usando las fórmulas de la tabla IV.1. Después de sintonizar todos los controladores y sobre el proceso real se procede a una última sintonización fina basándose sobre el comportamiento real de cada controlador.

### IV.1.3. Algoritmo del controlador PID

La ecuación (IV.1) del controlador PID, se presenta en el dominio de la frecuencia como:

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \quad (IV.2)$$

y la función de transferencia puede ser presentada como [Oga, 96]:

$$U(z) = K_p \left[ 1 + \frac{T}{T_i(1 - z^{-1})} + T_d \frac{(1 - z^{-1})}{T} \right] E(z) \quad (IV.3)$$

para simplificar de la ecuación (IV.3), se puede presentarla como [Gar, 08]:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = a + \frac{b}{1 - z^{-1}} + z(1 - z^{-1}) \quad (IV.4)$$

Donde:

$$a = K_p, \quad b = \frac{K_p T}{T_i}, \quad c = \frac{K_p T_d}{T} \quad (IV.5)$$

El diagrama en bloques que suma las tres acciones del controlador PID se puede presentar de la forma siguiente:

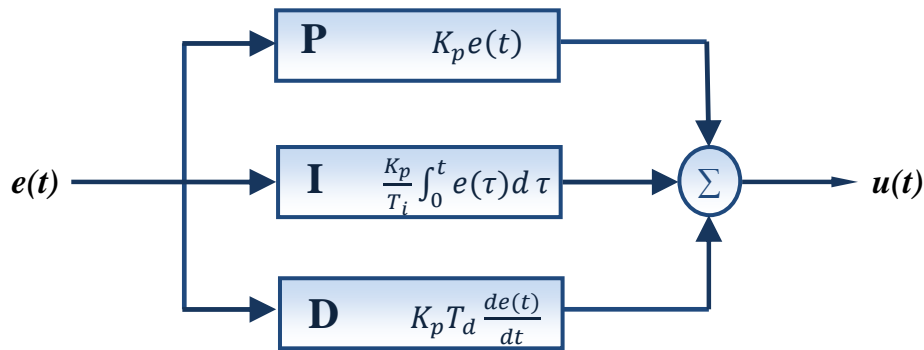


Figura IV.2: Diseño paralelo de un controlador PID.

El algoritmo utilizado para programar el PID digital se muestra en la Figura IV.3.

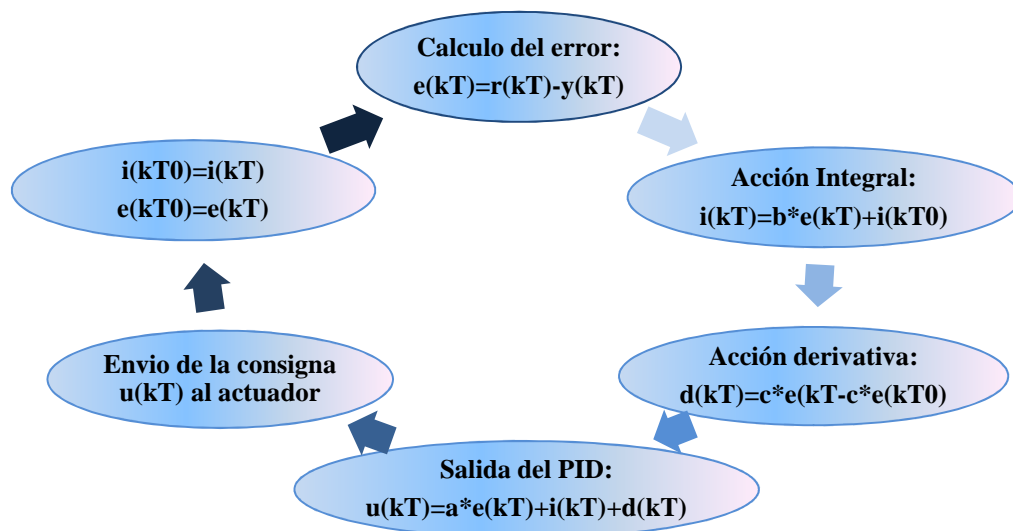


Figura IV.3: Algoritmo de programación del PID digital.

## **IV.2. Diseño e implementación real del controlador lógico difuso estático**

A diferencia de los controladores convencionales, el controlador difuso se apoya más sobre la información de los expertos del área, admite más un cierto tipo de heurística y no se limita en la modelación matemática del sistema físico. El control lógico difuso forma un soporte físico para sistemas informáticos o electrónicos que pueden realizar inferencia con lógica difusa. Estos sistemas juegan el mismo papel que el control PID convencional, presentando varias ventajas y un amplio grado de independencia del modelo de la planta a controlar. Se aplican fácilmente a procesos complejos que presentan cierta dificultad en la modelación matemática. Generalmente, el funcionamiento de los controladores lógicos difusos requiere varios bloques decisivos para inferir una salida que puede ser utilizada, son: una interface fuzzificación, Base de reglas, Motor de inferencia y la interface de defuzzificación. La *Figura.II.6* en el *capítulo II*, sección *II.3.3* lo presentan en detalle.

Existen varios métodos para diseñar un controlador lógico difuso, por lo tanto, su diseño no depende de ningún procedimiento estándar, pero se puede establecer un conjunto de medidas para tener un controlador lógico difuso bien diseñado. La metodología adoptada aquí sigue generalmente la política expuesta por [Lee, 98] aunque con algunas modificaciones. El diseño de un controlador difuso se basa esencialmente sobre el conocimiento del experto humano que a partir de la interacción con la planta puede describir el proceso a realizar y definir los parámetros a utilizar.

Para ciertos controladores difusos, la sintonía se hace de forma automática mediante el uso de algoritmos genéticos o redes neuronales para lograr un controlador óptimo. Otro aspecto de la sintonía de los controladores difusos y que ha mostrado un notable comportamiento en tiempo real es la auto-sintonización. Una vez empieza el control de la planta, empieza también el proceso de la auto-sintonía y el controlador adapta sus parámetros internos de forma autónoma para satisfacer al requerimiento del estado actual de la planta. Dichos controladores se denominan adaptativos.

### **IV.2.1. Selección de las variables y del universo de discurso**

El paso fundamental en el diseño de todos los controladores es precisar de forma clara cuáles son las variables de entrada y de salida que se relacionan mediante el controlador y dentro de qué rango se mueven esas variables. Básicamente, el



controlador difuso se desarrolla basándose sobre el conocimiento previo del experto humano. Siempre antes de empezar el desarrollo, habrá que precisar cuál son las variables que tienen una influencia directa sobre la variable controlada, en la mayoría de los casos se usa el error o alguna función del error. Mediante sencillas maniobras, se puede identificar los rangos de las entradas. En este caso, mover la variable controlada entre los extremos de su rango reflejará libremente la evolución del proceso y medir la salida puede dar una noción de la amplitud del error y su derivada.

En el proceso de control presentado en esta tesis, la temperatura alrededor del sensor se controla mediante un ventilador que se encuentra directamente encima de la bombilla (fuente de la temperatura) y del sensor. La variación de la temperatura registrada por el sensor tendrá que ser analizada para ver si el proceso requiere una intervención por parte del ventilador que es el actuador del sistema. Este análisis se hace mediante la comparación entre el valor de la temperatura detectada actualmente que es  $T_{act}$  y el valor de la temperatura exigida por el usuario que es  $T_{sp}$ , de hecho, la diferencia entre esos dos valores representa el error del sistema, en función de este error y de su derivada el controlador tomará la decisión adecuada. Por otra parte, la evolución del error con el tiempo puede describir el estado del sistema controlado tras la última intervención del actuador, es decir, mediante la diferencia entre el error actual ( $e_{act}$ ) y el error en el instante anterior ( $e_{ant}$ ) se puede precisar en qué medida la corrección aportada por el actuador fue adecuada.

En realidad, el uso del error y su derivada como variables de entrada del controlador pueden aportar informaciones muy valiosas sobre la evolución del proceso de control y por lo tanto proceder a un control más robusto.

El error del sistema se presenta de la forma:  $e = T_{act} - T_{sp}$ .

La derivada del error se presenta de la forma:  $\Delta e = e_{act} - e_{ant}$ .

La plataforma utilizada en este proceso permite manejar temperaturas que no superan los +/- 5°C de la temperatura ambiental por donde se realice el experimento, es decir, no podemos exigir al sistema un valor de temperatura fuera de este intervalo lo que limita el rango de control del proceso. Por lo tanto, el rango de las variables de entrada sería [-1,1] para el error y [-2,2] para su derivada, ya que la variación del error tras la intervención del actuador no puede ser muy grande. La temperatura no puede

bajar más de 2°C después de una iteración porque el tiempo de muestreo usado es de 5 segundos y no es suficientemente largo para tener grandes cambios de la temperatura.

#### **IV.2.2. Selección de la estrategia de fuzzificación**

En esta etapa se presenta el grado de pertenencia de cada variable de entrada, cada conjunto difuso tiene asociado una función de pertenencia. Se desarrolla el bloque que relaciona entre los valores numéricos de las variables de entrada y los valores de la salida asociados a conjuntos difusos con sus correspondientes funciones de pertenencia. La definición de estos conjuntos se hace mediante la repartición del universo de discurso. La elección de la cantidad de conjuntos difusos del universo forma parte del diseño del controlador. Elegir una cantidad relativamente grande, significa tener un poder descriptivo grande y por lo tanto un lenguaje más flexible. Por otro lado, estos conjuntos difusos son también las etiquetas lingüísticas con que se refiere a las variables de entrada y de salida. Se debe notar aquí que elegir una cantidad grande de conjuntos difusos entraña mayor complejidad, ya que las reglas crecen proporcionalmente.

El controlador difuso que se intenta diseñar tiene como entradas el error de la temperatura y su derivada, durante la evolución del proceso de control esas dos variables toman varios valores moviéndose en el rango predefinido de forma libre, la descripción lingüística de los diferentes estados que tomen esas variables requiere una repartición del rango de las entradas según el número de estados establecidos. Cada estado se representa en su repartición adecuada mediante una función de pertenencia que a su vez describe el grado de este estado. Las funciones de pertenencia pueden tener diversas formas (triangulares, trapezoidales, gaussianas, sigmoideas, etc.), ya que los resultados de control demuestran que el tipo de las funciones de pertenencia influya sobre la calidad de la salida inferida. La mayoría de los controladores que existen en el mercado industrial manejan las trapezoidales, entendiendo la triangular como un caso particular, ya que son de más fácil implantación, de hecho, se han usado en este caso como funciones de pertenencia para las variables de entrada. Por otra parte, la partición de los universos de discurso de las salidas se apoya sobre la misma estrategia y lógica usada en particionar los universos de discurso de entradas. La validez de lo antes dicho por las entradas se extiende a las salidas del controlador difuso con la diferencia de que las salidas del controlador serán siempre números reales, ya que a partir de estos se generarán los valores que manejen los actuadores del sistema de control bajo diseño.

A continuación se presenta la abreviación de las etiquetas lingüísticas que toman las variables de entrada y salida usadas en el presente proceso de control.

Entrada N°1 ( $e$ ) :	Entrada N°2 ( $\Delta e$ ) :	Salida $z$ :
<b>NG:</b> Negativo Grande	<b>DR:</b> Diminución Rápida	<b>MR:</b> Muy Rápido
<b>NP:</b> Negativo Pequeño	<b>DL:</b> Diminución Lenta	<b>R:</b> Rápido
<b>N:</b> Negativo	<b>Cst:</b> Constante	<b>Md:</b> Mediano
<b>NL:</b> Nulo	<b>AL:</b> Aumentación Lenta	<b>L:</b> Lento
<b>P:</b> Positivo	<b>AR:</b> Aumentación Rápida	<b>Pr:</b> Parado
<b>PP:</b> Positivo Pequeño		
<b>PG:</b> Positivo Grande		

#### IV.2.3. Construcción de la base de reglas

Como es bien sabido, el controlador difuso almacena el conocimiento en forma de reglas “IF... THEN” y en función de estas reglas se formará un único conjunto difuso de salida. Generalmente, no existe ningún procedimiento estándar para construir la base de reglas, por tanto, es posible obtenerlas mediante numerosas alternativas. La fuente principal del conocimiento necesario es sin embargo el experto humano que mantiene un contacto directo con el sistema a controlar. Este conocimiento se expresa mediante el lenguaje natural que asigna a los variables las etiquetas lingüísticas y relaciona entre los diferentes conceptos.

En un proceso de control tal como el control de la temperatura en una plataforma similar a la usada, la obtención de la base de reglas que puede gobernar y precisar el comportamiento adecuado/necesario para controlar la temperatura se establece mediante un sencillo estudio del comportamiento del proceso, un control manual del ventilador podrá reflejar informaciones profundas sobre la evolución de la variable controlada. El análisis de esas informaciones conduce a construir un conjunto de conclusiones sobre el comportamiento del proceso que luego se puede traducir y expresar mediante un conjunto de reglas difusas, cada regla relaciona entre las dos entradas en un tal estado, dando una propuesta de corrección de dicho estado que se utiliza por el actuador del sistema para acercar el proceso de control al punto requerido tal como lo demuestran los ejemplos de las reglas siguientes:

**IF**  $e$  is NG **AND**  $\Delta e$  is DR **THEN**  $z = \text{Md}$   
**IF**  $e$  is NP **AND**  $\Delta e$  is DL **THEN**  $z = \text{L}$   
**IF**  $e$  is N **AND**  $\Delta e$  is Cst **THEN**  $z = \text{L}$   
**IF**  $e$  is Z **AND**  $\Delta e$  is AL **THEN**  $z = \text{L}$

$\Delta e$  es la derivada del error que representa la variación del error respecto al tiempo y  $e$  representa el error del control. La tabla IV.2 recapitula todas las reglas difusas que forman la base de conocimiento del controlador difuso implementado en esta tesis.

$e$	$\Delta e$				
	DR	DL	Cs	AL	AR
NG	Md	L	L	Pr	Pr
NP	Md	L	L	Pr	Pr
N	Md	L	L	Pr	Pr
NL	MR	R	Md	L	L
P	MR	MR	R	R	R
PP	MR	MR	MR	R	Md
PG	MR	MR	MR	R	R

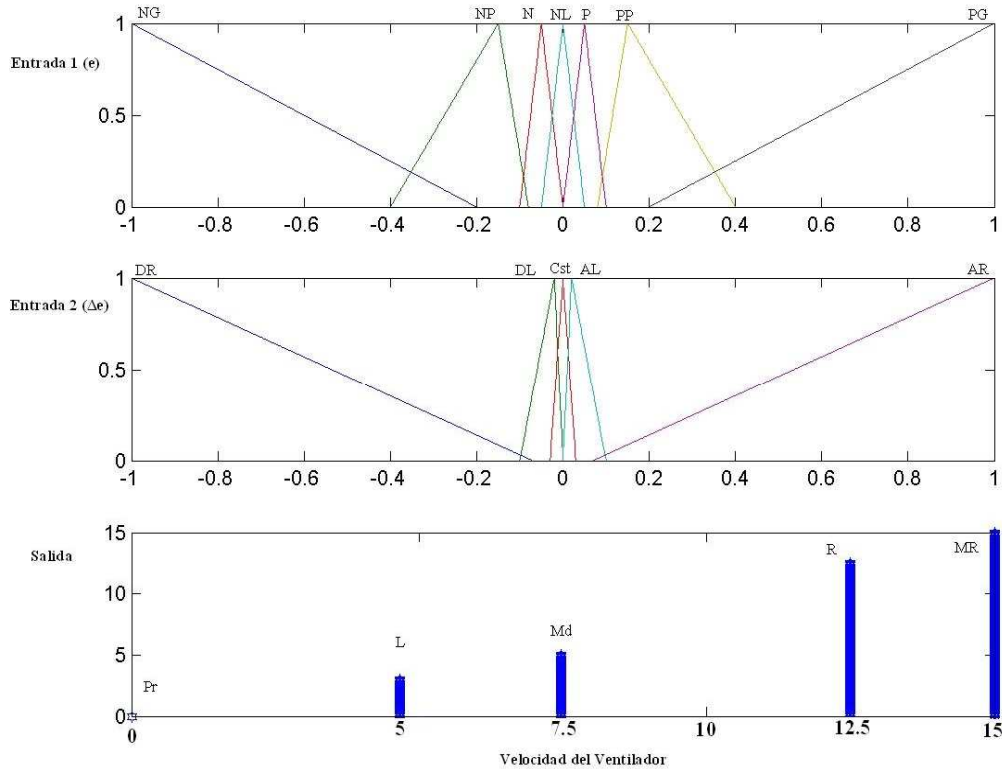
*Tabla IV.2:* Reglas difusas del controlador lógico difuso diseñado.

#### IV.2.4. Selección de la estrategia de defuzzificación

Después de establecer las reglas difusas y empieza el proceso de la agregación de las reglas para tener un conjunto de resultados que presentan la salida difusa deseada para aquellas reglas que se han activado, será necesario transformar el conjunto difuso resulta de esta agregación a un valor real que pueda ser utilizado por el actuador, ya que generalmente los actuadores no pueden manejar valores difusos, para se usa un bloque que se encargará de dar una salida determinada “Crisp Value” frente a entradas difusas, y que refleja adecuadamente la distribución de posibilidades de la acción de control inferida. En este caso se ha adoptado el producto T-norma como estrategia de fuzzificación y el método del centro de gravedad con el operador sum-product como mecanismo de defuzzificación, por tanto la salida del controlador se presenta de la forma siguiente:

$$\hat{F}(\vec{x}^k) = \frac{\sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \cdots \sum_{i_N=1}^{n_N} \left( R_{i_1 i_2 \cdots i_N} \cdot \prod_{v=1}^N u_{x_v^{i_v}}(x_v^k) \right)}{\sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \cdots \sum_{i_N=1}^{n_N} \left( \prod_{v=1}^N u_{x_v^{i_v}}(x_v^k) \right)} \quad (\text{V.8})$$

La figura IV.4 presenta la distribución de las variables de entrada y salida del controlador difuso implementado dentro de su rango de variación con sus etiquetas lingüísticas que describen el estado de cada partición.



**Figura IV.4:** Distribución de variables de entrada y salida dentro de sus rangos de actuación presentados con las etiquetas lingüísticas.

El rango de la primera entrada que es el error del sistema contiene siete funciones de pertenencia, la elección de las funciones de pertenencia triangulares fue por la facilidad de programación y por el moderado tiempo de cálculo que presentan estos últimos. El número de las funciones de pertenencia se ha establecido mediante el estudio de cómo varía el error dentro de su rango expresando los posibles estados que se puede tomar mediante las etiquetas lingüísticas.

Utilizando la misma estrategia, el rango de la segunda entrada que es la derivada del error se presenta mediante cinco funciones de pertenencia de forma triangular. Por la salida, el controlador difuso implementado es de tipo TSK de orden cero por lo tanto la salida sería un escalar. El rango del actuador que es el ventilador es  $[0,15V]$ , en este caso se han elegido cinco valores dentro de este rango describiendo el estado del ventilador por cada valor.

Se debe notar aquí que en la ficha técnica del ventilador el rango de actuación era [0,10V] pero experimentalmente se puede demostrar que el rango real es de 0 a 15 Voltios, además de que el rendimiento del ventilador en el rango [0V, 5V] está muy bajo y no satisface la necesidad del proceso de control, por lo tanto, usar el rango sugerido en el manual entraña una pérdida en la eficacia del ventilador además de perder precisión al generar salidas menores de 5V. A continuación se resume la estructura general del controlador diseñado:

**TIPO DEL CONTROLADOR: “SUGENO”**

Número de las entradas: “2”

Número de las salidas: “1”

Número de las reglas: “35”

Método de implicación: “prod“

Método de agregación: “sum”

Método de defuzzificación: “Centro de gravedad”

<b>Entrada N°1: error del sistema (e)</b>	<b>Entrada N°2: derivada del error del sistema (<math>\Delta e</math>)</b>
Rango: [-5 5]	Rango: [-2 2]
Número de funciones de pertenencia: “7”	Número de funciones de pertenencia: “5”
N°1=“NG”: “triangular”, [-5 -2 -0.2]	N°1=“DR”: “triangular”, [-2 -1.5 -0.07]
N°2=“NP”: “triangular”, [-0.4 -0.15 -0.08]	N°2=“DL”: “triangular”, [-0.1 -0.02 0]
N°3=“N”: “triangular”, [-0.1 -0.05 0]	N°3=“Cst”: “triangular”, [-0.03 0 0.03]
N°4=“NL”: “triangular”, [-0.05 0 0.05]	N°4=“AL”: “triangular”, [0 0.02 0.1]
N°5= “P”: “triangular”, [0 0.05 0.1]	N°5=“AR”: “triangular”, [0.07 1.5 2]
N°6=“PP”: “triangular”, [0.08 0.6 1.2]	
N°7=“PG”: “triangular”, [0.9 2 5]	

**Salida N°1:**

Rango: [0 15]

Número de funciones de pertenencia: “5”

N°1=“MR”: “Singleton”, 15

N°2=“R”: “Singleton”, 12.5

N°3=“Md”: “Singleton”, 7.5

N°4=“L”: “Singleton”, 5

N°5=“Pr”: “Singleton”, 0

### **IV.3. Diseño e implementación real del controlador lógico difuso adaptativo**

La sección IV.3 ha sido escogida textualmente de la referencia [Héctor, 99].



En 1975, E. H. Mamdani y S. Assilian [Mamd, 75] implementaron por primera vez un controlador difuso, desde entonces, los controladores difusos han demostrado ser herramientas considerablemente eficaces para controlar aquellos procesos dinámicos donde obtener un modelo matemático es una tarea ardua, si no imposible. De entre los distintos tipos de algoritmos de control, los controladores difusos adaptativos presentan además la característica de poder ajustar los parámetros que los definen en tiempo real sin la ayuda externa de un operador.

En esta sección se presenta el diseño de un controlador difuso adaptativo capaz de auto-organizarse y de aprender de forma automática en tiempo real para controlar la temperatura. Tras la introducción y el planteamiento del problema, en las secciones IV.3.3 a la IV.3.5 se presenta la arquitectura de control utilizada y las principales características del algoritmo de control. En la sección IV.7 se presentan las conclusiones y posibles mejoras del algoritmo.

#### **IV.3.1. Introducción**

La implementación de controladores capaces de adaptarse y auto-aprender en tiempo real es una de las cuestiones fundamentales en el área de control [Ant, 94]. Mientras que el control difuso no adaptativo ha demostrado su valía en algunas aplicaciones, en aquellas situaciones en las que pueden existir incertidumbres o en las que el sistema a controlar pueda presentar variaciones con el tiempo, el control adaptativo juega un papel fundamental ya que es, en principio, capaz de adecuarse a cambios imprevistos significativos. En [Ord, 97] se realiza un análisis comparativo de diversas técnicas de control tanto adaptativo como no adaptativo donde se pone de manifiesto que los métodos adaptativos son mucho más robustos y estables cuando trabajan sobre la implementación real (no simulada) de la planta.

Históricamente, los controladores difusos se han diseñado a partir de la extracción del conocimiento de expertos directamente en forma de reglas difusas. Sin embargo, hay situaciones en las que este conocimiento no está disponible. Además, las reglas difusas generadas de esta forma suelen ser imprecisas e incompletas.

Otro método común para llevar a cabo el diseño de controladores es a partir de un conjunto de datos de E/S que pueden pertenecer a acciones de control reales o a un modelo de la planta a controlar. En el primer caso se requiere que el sistema sea controlado de antemano para poder obtener dichos datos. En el segundo, necesitamos conocer generalmente las ecuaciones diferenciales de la planta o tener un modelo aproximado de la misma. En cualquier caso, cuando se tiene un modelo de la planta en forma de datos de E/S existe otro inconveniente: a partir de esos datos no sabemos qué regiones de operación son más importantes que otras e incluso puede haber datos que cubran estados en los que la planta nunca se encontrará cuando ésta se controle en tiempo real, desperdiciándose así algunos de los parámetros utilizados por el controlador.

Es por todo esto por lo que el método más fiable y óptimo de diseñar un controlador consiste en adaptar sus parámetros en tiempo real según el comportamiento actual de la planta sin la necesidad de intervención externa, es decir, utilizar controladores adaptativos y/o auto-organizativos.

Dos son las políticas principales de control comúnmente utilizadas en el campo de control adaptativo:

- Control adaptativo **directo**: en el que los parámetros del controlador son ajustados utilizando directamente la información aportada por las variables de entrada y salida de la planta.
- Control adaptativo **indirecto**: en el que se realiza una estimación en tiempo real del modelo de la planta y, basándose en este modelo, los parámetros del controlador son optimizados.

Cuando un controlador difuso está trabajando en tiempo real, hay tres alternativas principales para su adaptación: factores de escala (tanto en la entrada como en la salida), funciones de pertenencia y reglas difusas.

El ajuste de los factores de escala proporciona una mejor sintonización de los dominios de entrada y/o de salida de la función difusa ya que modifican los soportes de cada uno de los valores lingüísticos en igual proporción para cada una de las funciones de una variable. La alteración del factor de escala de la salida proporciona una modificación en el rango del actuador a la planta. El ajuste de los factores de escala ha sido ampliamente estudiado en la bibliografía tanto para ajustar las variables de entrada



como la de salida aunque en la mayoría de las veces no se realiza en tiempo real. Como muestra más significativa, en [Mae, 92] se evaluaba, una vez concluido el proceso de control, variables importantes como el sobre-disparo, el tiempo de subida y el error en el estado estacionario para adaptar los factores de escala según un conjunto de reglas difusas definidas por el autor. Otro método notable que sí realiza el ajuste de los factores en tiempo real es el que se presenta en [Cho, 94] donde los factores son regulados de tal forma que la respuesta del sistema ante un escalón en el espacio de las fases tenga forma helicoidal.

La modificación de las funciones de pertenencia suele ir casi siempre acompañada de la modificación de los consecuentes de las reglas difusas por lo que ambos métodos serán tratados conjuntamente. Igualmente, existen numerosos trabajos en la bibliografía donde se adaptan conjuntamente los factores de escala junto con las reglas [Mae, 92; Roj, 99; Pom, 00]. El primer controlador adaptativo difuso fue propuesto por Procyk y Mamdani [Pro, 79] en 1979. En este trabajo se proponía un algoritmo de aprendizaje capaz de generar y modificar las reglas difusas según unos valores de premio o castigo para cada acción de control basándose en el estado actual del sistema. Desde entonces, el método propuesto por estos autores ha sido utilizado con ciertas modificaciones por una gran cantidad de autores [Sugiy, 88; Sha, 88, Mae, 92, Sin, 98; Roj, 99; Jamal, 10; Linda, 11].

Un notable trabajo sobre controladores difusos tanto directos como indirectos fue el que realizó Li-Xin Wang [Wan, 94] para un determinado tipo de sistemas. Basándose esencialmente en el conocimiento de ciertas acotaciones sobre las ecuaciones diferenciales del sistema y en una trayectoria deseada, Wang extrae una política de control en tiempo continuo capaz de seguir la trayectoria deseada de forma razonable y demostrando además la estabilidad del sistema completo de lazo cerrado. Un trabajo relativamente parecido al control indirecto realizado por Wang pero para control discreto fue presentado en [Che, 95] donde el lazo cerrado se utiliza para linealizar el sistema (feedback linearization) y en el que los términos desconocidos de la ecuación diferencial se aproximan en tiempo real mediante descenso en gradiente (de la misma forma que hacía Wang pero para el caso discreto).

Otro método bastante utilizado y que no es ni directo ni indirecto es el control adaptativo basado en un modelo de referencia (MRAC) [Lay, 92; Fon, 93]. La principal ventaja de este procedimiento es que no requiere un conocimiento explícito del modelo

de la planta sino que se basa en un modelo de referencia de la misma, es decir, cómo queremos que ésta se comporte.

En 1997, H.C. Andersen et al. [And, 97] propusieron un método de sintonización directa de los parámetros del controlador basado en el error en la salida del controlador en lugar de en la salida de la planta. Para ello, necesitaban la existencia previa de un sistema de control que fuera capaz de controlar la planta de forma relativamente satisfactoria y posteriormente utilizar valores reales de la función inversa de la planta en tiempo real para realizar un ajuste fino de los parámetros.

Finalmente, existen también otros algoritmos de adaptación para arquitecturas híbridas como los controladores neuro-difusos [Ber, 92; Jan, 95; Lin, 96; Orlow, 10; Fei, 11] y genético-difusos [Hom, 95; Lin, 97; Chen, 02; Chiu, 04; Khan, 08].

En definitiva, existen numerosas metodologías dirigidas al control adaptativo pero la mayoría de ellas necesitan un pre-entrenamiento y/o el conocimiento de las ecuaciones diferenciales de la planta. Además, ningún método propuesto en la bibliografía es capaz de modificar la estructura del controlador en tiempo real.

En este capítulo se propone una nueva metodología para el diseño automático de controladores difusos en tiempo real. Dicho método es capaz de optimizar, durante el propio proceso de control, tanto las funciones de pertenencia como los consecuentes de las reglas difusas sin la necesidad de un modelo de la planta (control directo). Además, la topología del controlador podrá ser modificada a través de un análisis global de la política de control, todo ello en tiempo real y sin apenas la necesidad de un conocimiento previo cuantitativo de la planta a controlar.

#### ***IV.3.1.1. Enfoque sobre la estabilidad del proceso de control***

Siempre que se habla del control de un proceso hay que tener en cuenta el problema de la estabilidad del sistema total en lazo cerrado (controlador + planta). Cuando el sistema a controlar es lineal, la teoría clásica proporciona una gran cantidad de métodos para el diseño de sistemas de control estables (lugar de las raíces, criterio de estabilidad de Nyquist, diagramas de Bode, etc.). Para procesos no lineales, la demostración de que el sistema final en lazo cerrado vaya a ser estable es mucho más compleja y hay que echar mano del teorema principal de estabilidad de Lyapunov [Lya, 92] que se basa en el conocimiento de las ecuaciones diferenciales que rigen el sistema y de la búsqueda de una función escalar del estado del sistema con primeras derivadas

parciales continuas con la propiedad de que sea definida positiva y su derivada definida negativa. Existen métodos en la bibliografía que utilizan el teorema de Lyapunov para demostrar la estabilidad del proceso de control [Wan, 94; Che, 95; Das, 06; Shar, 10] pero siempre basados en el conocimiento de la forma de las ecuaciones diferenciales y en acotaciones de sus términos.

En el nuevo método adoptado en el diseño de nuestro controlador adaptativo se suponen desconocidas las ecuaciones diferenciales del proceso a controlar y sólo se requiere un conocimiento mínimo en términos de la monotonía existente entre la salida de la planta y la señal de control y el retraso de la planta. Es por ello, que el algoritmo que se presenta tiene un rango de aplicación mucho mayor que los métodos anteriormente comentados pero asimismo, aunque se demuestra la estabilidad local de cada una de las partes del algoritmo, no se puede realizar ningún análisis global de la estabilidad del sistema final al no conocerse las ecuaciones que rigen el sistema a controlar.

#### IV.3.2. Planteamiento del problema

Nuestro objetivo será lograr el control en tiempo real de un sistema cuyas ecuaciones desconocemos y la optimización de dicho control. En nuestro planteamiento, trataremos de optimizar las reglas del controlador y los parámetros que las definen con el propósito de poder llevar el estado de la planta al valor deseado en el menor tiempo posible.

El sistema o planta a controlar se expresa generalmente por sus ecuaciones diferenciales o, equivalentemente, por sus ecuaciones en diferencias siempre que éstas sean obtenidas de aquéllas usando un periodo de muestreo suficientemente pequeño. Matemáticamente tendremos:

$$\dot{x}^{(n)} = f(\vec{x}, u) = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, u) \quad y = h(\vec{x}) \quad (\text{IV.9})$$

donde  $\vec{x}$ , es un vector que representa el estado de la planta,  $y$  es la salida de la misma,  $u$  es la señal de control y  $f$  y  $h$  son funciones continuas. Equivalentemente, si discretizamos las ecuaciones diferenciales tenemos:

$$y(k) = f'(y(k-1), \dots, y(k-p'), u(k-d), \dots, u(k-d-q')) \quad (\text{IV.10})$$

que siempre se puede expresar como (ver Apéndice A)

$$y(k+d) = f(y(k), \dots, y(k-p), u(k), \dots, u(k-q)) \quad (\text{IV.11})$$

donde  $d$  es el retraso de la planta y  $f$  es una función continua.

Las restricciones mínimas y evidentes que se suelen imponer a estos sistemas es que sean controlables, es decir, que siempre exista una política de control capaz de llevar la salida hacia el valor deseado (dentro del rango de operación). Esto se traduce en que no debe existir ningún estado en el que la variable de salida no dependa de la entrada de control. Como consecuencia de ello, por ser las plantas continuas respecto a todas sus variables, la salida variará de forma monótona con la señal de control  $u$ . Si esto no ocurriera, por continuidad, habría siempre al menos un estado en el que la salida no dependiera de la entrada de control. De esta manera, suponemos que existe una función  $F$  tal que la señal de control dada por:

$$u(k) = F(\vec{x}(k)) \quad (\text{IV.12})$$

con  $\vec{x}(k) = (r(k), y(k), \dots, y(k-p), u(k-1), \dots, u(k-q))$ , siendo  $r(k)$  la salida deseada en el instante  $k$ , que hace que  $y(k+d) = r(k)$ .

En el algoritmo propuesto no necesitamos información sobre las ecuaciones que rigen la planta aunque sí es necesario conocer el signo de su monotonía y el retardo que presenta, es decir, cuánto tiempo tiene que pasar para que la entrada de control actual  $u(k)$  influya en la salida.

Al igual que en el controlador difuso estático, utilizaremos los mismos mecanismos de inferencia y defuzzificación. De esta forma, la salida de nuestro controlador difuso viene dada por la ecuación IV.8, que aquí recogemos de nuevo:

$$u(k) = \hat{F}(\vec{x}^k) = \frac{\sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \dots \sum_{i_N=1}^{n_N} (R_{i_1 i_2 \dots i_N} \cdot \prod_{v=1}^N u_{x_v^{i_v}}(x_v^k))}{\sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \dots \sum_{i_N=1}^{n_N} (\prod_{v=1}^N u_{x_v^{i_v}}(x_v^k))} \quad (\text{IV.13})$$

Así pues, nuestro objetivo se puede resumir en diseñar un algoritmo de control capaz de auto-diseñar un controlador que aprenda en tiempo real a controlar un determinado sistema y optimice sus parámetros de tal modo que, para un estado actual de la planta dado, encuentre la señal de control  $u(k)$  capaz de hacer que, tras el retardo de la planta, la salida  $y(k+d)$  se aproxime al valor deseado  $r(k)$  dentro de los límites que el usuario especifique. Dependiendo de dichos límites se necesitarán más o menos funciones de pertenencia en el controlador y, consecuentemente, mayor o menor número de parámetros.

### IV.3.3. Arquitectura de control

En la figura IV.5 se muestra el diagrama de bloques de la arquitectura de control utilizada en el controlador adaptativo. El bloque marcado en gris es el controlador principal donde se han resaltado los sub-bloques que contienen los parámetros que definen las funciones de pertenencia y los consecuentes de las reglas. El resto de los bloques son sistemas o controladores auxiliares encargados de la adaptación de dichos parámetros.

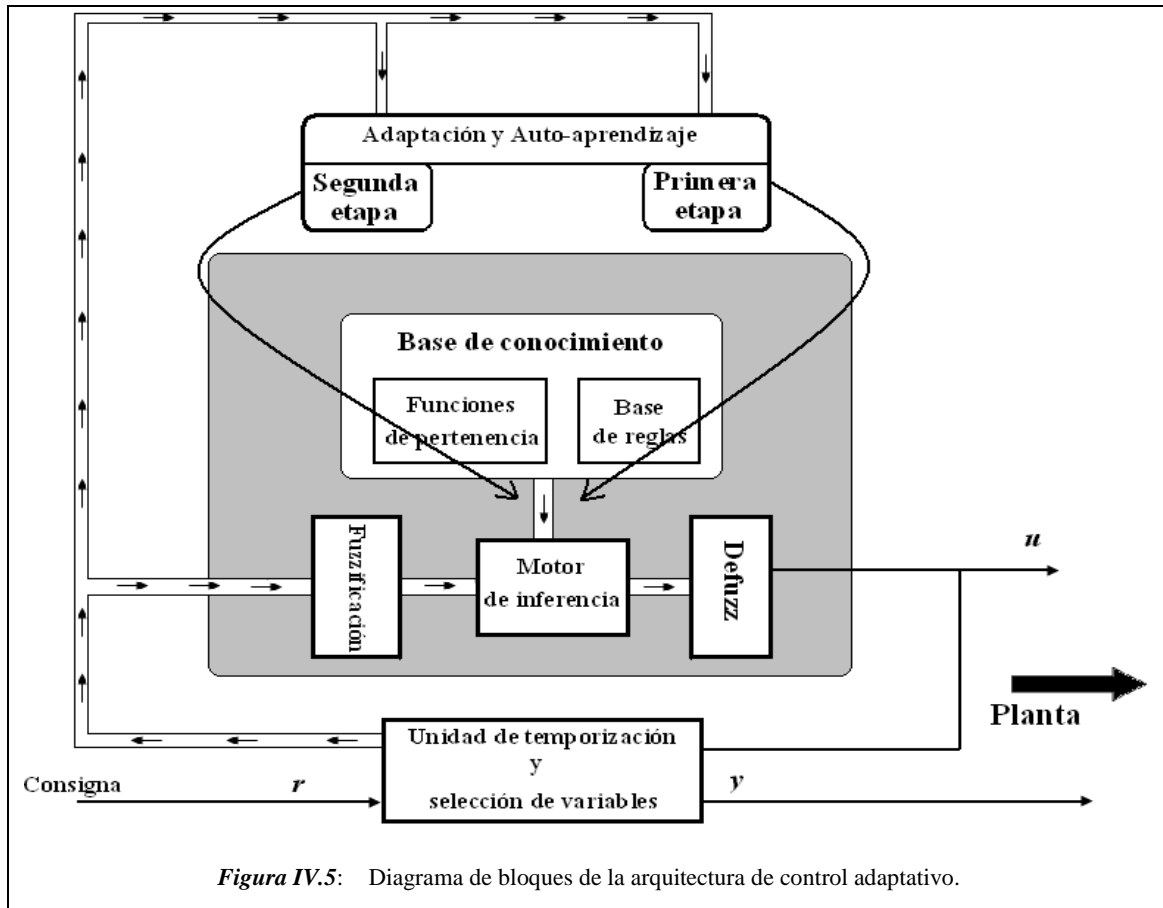


Figura IV.5: Diagrama de bloques de la arquitectura de control adaptativo.

- En la primera etapa del control se procede a la adaptación de los consecuentes de las reglas utilizando como información el error en la salida de la planta.
- En la segunda etapa del control se procede a re-organizar las funciones de pertenencia para compensar el error en aquellas zonas que han registrado mayor contribución del error.
- La unidad de temporización y selección de variables se encargará de conmutar entre las diversas etapas del algoritmo y será la encargada de suministrar las variables de entrada al controlador.

En la figura IV.6 se muestra un organigrama del algoritmo de control adaptativo propuesto en este trabajo. El algoritmo comenzará con una estructura inicial del controlador principal muy sencilla (incluso vacía) y se encargará de modificar los parámetros del controlador en tiempo real. El periodo global de control  $T'$  indicará cada cuanto tiempo la unidad de temporización comprobará si se ha llegado a la condición necesaria para conmutar entre las diversas etapas del algoritmo. Dicho periodo dependerá principalmente del periodo de muestreo y de la variación de las consignas. A diferencia de muchos otros métodos de control propuestos en los que sólo se tiene en cuenta el comportamiento ante un escalón simple, en este trabajo la consigna puede variar incluso aleatoriamente, indicando  $T'$  una estimación de cada cuanto tiempo se puede evaluar el proceso de control completo. Más adelante se comprobará que la influencia de este parámetro no es significativamente crítica en la obtención del diseño final del controlador principal siempre y cuando dicho parámetro sea lo suficientemente alto.

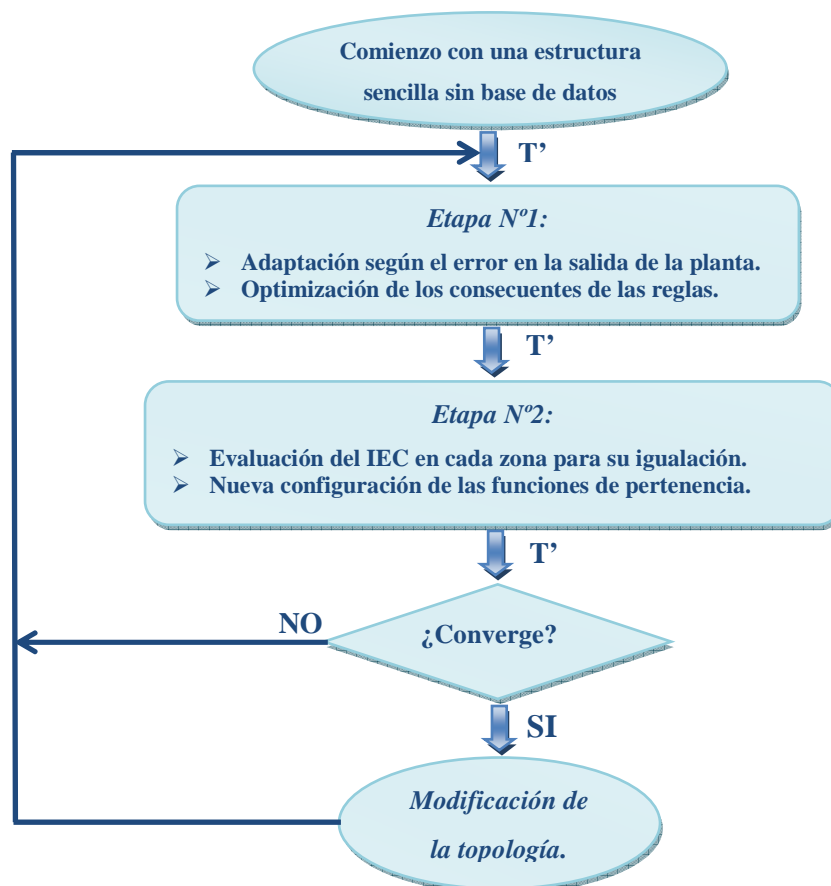


Figura IV.6: Organigrama del algoritmo propuesto.

#### IV.3.4. Primera etapa: Adaptación de los consecuentes de las reglas

El problema principal en los algoritmos de control en tiempo real estriba en que, al desconocer el funcionamiento interno del sistema a controlar, no sabemos cómo modificar los parámetros del controlador a partir del error de salida. Si quisiéramos usar un algoritmo de descenso en gradiente necesitaríamos computar la derivada parcial de la salida de la planta con respecto a la señal de control para un estado dado  $(\frac{\partial y}{\partial u})$ , derivada que desconocemos. Además, en el caso de periodos de muestreos relativamente altos no se puede aproximar dicha derivada por  $\frac{\Delta y}{\Delta u}$  por lo que el problema se vuelve complejo.

Sin embargo, como se comentó en la sección IV.3.2, sabemos que para que la planta sea controlable dicha derivada parcial debe tener un signo definido constante. De esta forma podemos hacer uso de la información sobre la monotonía de la planta para poder obtener una dirección adecuada en la que mover los consecuentes de nuestras reglas utilizando un procedimiento cualitativamente similar al ya propuesto inicialmente por Procyk y Mamdani en 1979. Así, en una planta con retardo menor que el tiempo de muestreo (es decir, en la que la salida en el instante  $k+1$  es consecuencia directa de la entrada de control en el instante anterior), si la señal de control  $u(k)$  nos ha proporcionado una salida  $y(k+1) > r(k)$ , sabemos que se debería haber usado una señal menor, en el caso de que la salida crezca con la entrada de control (alternativamente, deberíamos haber usado  $u(k)$  mayor si la monotonía tuviera el signo contrario).

De esta forma, la monotonía de la planta nos da la información valiosa de en qué dirección adaptar los consecuentes de nuestras reglas. Para modificar dichos consecuentes, como es lógico, sólo se deben tener en cuenta los de aquellas reglas que hayan intervenido para la obtención de  $u(k)$  como salida del controlador. Debido al carácter local de las reglas difusas, esta adaptación implica auto-aprendizaje.

De ello se deduce de forma natural la necesidad de un controlador auxiliar, que denotaremos por  $ca_1$ , que se encargue de evaluar el estado actual de la planta y cuya salida sea la corrección de las reglas responsables de dicho estado a modo de premio/castigo. Matemáticamente, si llamamos  $F_{ca1}$  a la salida de dicho controlador auxiliar, la variación de la regla  $i$ -ésima en el instante  $k+d$  vendrá dada por:

$$\Delta R_i(k+d) = \alpha_i(k) \cdot F_{ca1}(e(k+d)) \quad (IV.14)$$

donde  $\alpha_i(k)$  es el grado de activación de la regla en el instante  $k$ , y  $e_y(k+d)$  es el error cometido en la salida en el instante  $k+d$  y viene dado por:

$$e(k+d) = r(k) - y(k+d) \quad (\text{IV.15})$$

ya que  $r(k)$  es el valor deseado en el instante  $k$ . Se debe hacer notar que sería incorrecto considerar  $r(k+d)$  en la expresión anterior ya que las reglas que se activaron en el instante  $k$  lo hicieron para conseguir el valor deseado  $r(k)$  y no  $r(k+d)$ . Un factor muy importante a tener en cuenta es que la modificación impuesta por el sistema auxiliar  $ca_1$  debe ser proporcional al grado de activación de cada una de las reglas responsables. De esta forma, cuando el estado de la planta cambie a una región vecina, aquellas reglas antes activadas en mayor grado ya no lo estarán tanto, evitando de esta forma la pérdida de información obtenida en el instante anterior. Por ello, se ha utilizado en la expresión (IV.14) el grado de activación  $\alpha_i(k)$  de la regla  $i$ -ésima en el instante  $k$ .

Debido a que hay que esperar hasta el instante  $k+d$  para poder evaluar la señal de control  $u(k)$ , para poder implementar este método de adaptación es necesario definir una cola de tamaño igual al retardo de la planta donde almacenaremos los grados de activación de las reglas.

A continuación se hará un análisis de las características que debe reunir tal sistema auxiliar para proporcionar un cambio que provoque una disminución en el error de la salida de la planta y, de esta forma, su convergencia a cero.

#### **IV.3.4.1. Requisitos exigidos al sistema auxiliar $ca_1$**

Supongamos un sistema a controlar regido, de forma genérica, por la ecuación en diferencias dada por la ecuación (IV.11) y un controlador difuso de la forma descrita en (IV.13). En el instante  $k$ , la salida de dicho controlador será (ver (IV.12)):

$$U_k(1) = \hat{F}(\vec{x}_k, \Theta_k(1)) \quad (\text{IV.16})$$

donde  $\Theta_k$  es el conjunto de parámetros del controlador principal en el instante  $k$ . De esta forma, la salida de la planta  $d$  instantes de tiempo después será:

$$y_{k+d}(1) = f(\vec{x}_k, u_k(1)) \quad (\text{IV.17})$$

obteniéndose un error en la salida de la planta en el instante  $k+d$ :

$$e_{k+d}(1) = r_k - y_{k+d}(1) \quad (\text{IV.18})$$

Dicho error es el que evalúa el controlador auxiliar  $ca_1$  para modificar las reglas responsables de la obtención de la señal de control  $u_k$ . Es lógico pensar que la corrección dada por dicho sistema auxiliar sea proporcional al error actual de la planta. De este modo, inicialmente supondremos que:



$$F_{ca1}(e(k+d)) = C \cdot e(k+d) \quad (IV.19)$$

siendo  $C$  un valor que puede depender de otros factores pero cuyos límites debemos determinar con el fin de asegurar que el proceso de adaptación nos dirija a una disminución del error en la salida. Lo que sí sabemos es que si la monotonía de la planta es creciente, el valor de  $C$  debe ser positivo ya que la corrección debería tener el mismo signo que el error en este caso. Inversamente,  $C$  debe ser negativo en el caso de monotonía decreciente. En adelante, supondremos, sin pérdida de generalidad, que la monotonía es creciente dejando para el final la extracción de conclusiones para el caso contrario.

Tras la adaptación aconsejada por el sistema auxiliar  $ca_1$ , las reglas del controlador principal sufren, por lo tanto, el siguiente cambio:

$$\Delta R_i(k+d) = \alpha_i(k) \cdot C \cdot e(k+d) \quad (IV.20)$$

Para evaluar si dicho cambio ha mejorado el comportamiento del controlador principal, volvamos a las mismas condiciones que había en el instante  $k$  pero ahora utilizando los nuevos valores de las reglas. En ese caso tendríamos que la nueva señal de control sería:

$$U_k(2) = \hat{F}(\vec{x}_k, \Theta_k(2)) \quad (IV.21)$$

donde  $\Theta_k(2)$  simboliza los nuevos parámetros del controlador principal (los adaptados por el sistema auxiliar  $ca_1$ ). Esta nueva señal de control produciría una nueva salida en la planta  $d$  instantes de tiempo después:

$$e_{k+d}(2) = f(\vec{x}_k, u_k(2)) \quad (IV.22)$$

Pues bien, el problema que queremos ahora resolver es entre qué valores puede oscilar el valor de  $C$  para asegurarnos la convergencia del proceso de adaptación, es decir, para que:

$$|e_{k+d}(2)| \leq |e_{k+d}(1)| \quad (IV.23)$$

verificándose la igualdad si y sólo si  $e_{k+d}(2) = e_{k+d}(1) = 0$ .

Suponiendo que  $f(\vec{x}_k, u_k)$  es continua y derivable con respecto a  $u_k$  y teniendo en cuenta que el intervalo  $[u_k(1), u_k(2)]$  es cerrado y acotado, por el teorema del valor medio sabemos que existe un valor  $\tilde{u}$  en dicho intervalo tal que:

$$y_{k+d}(2) = y_{k+d}(1) + \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \cdot (u_k(2) - u_k(1)) \quad (IV.24)$$

de modo que

$$e_{k+d}(2) = e_{k+d}(1) - \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \cdot (u_k(2) - u_k(1)) \quad (\text{IV.25})$$

Siendo  $\left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}}$  un número real positivo (distinto de cero) ya que hemos supuesto que la monotonía de la planta era creciente.

Por otro lado, tendremos que:

$$\text{Si } e_{k+d}(1) > 0 \quad \rightarrow \quad u_k(1) \leq u_k(2) \leq u_k(1) + C \cdot e_{k+d}(1) \quad (\text{IV.26})$$

$$\text{Si } e_{k+d}(1) < 0 \quad \rightarrow \quad u_k(1) + C \cdot e_{k+d}(1) \leq u_k(2) \leq u_k(1)$$

ya que el máximo cambio en la salida del controlador tras el proceso de adaptación se producirá cuando una regla se active con grado máximo con lo que en la salida se verá reflejada la corrección completa del sistema auxiliar  $ca_1$ . De esta forma

$$\text{Si } e_{k+d}(1) > 0 \quad \rightarrow \quad 0 \leq u_k(2) - u_k(1) \leq C \cdot e_{k+d}(1) \quad (\text{IV.27})$$

$$\text{Si } e_{k+d}(1) < 0 \quad \rightarrow \quad C \cdot e_{k+d}(1) \leq u_k(2) - u_k(1) \leq 0$$

Finalmente, extrayendo valores absolutos de (IV.25)

$$|e_{k+d}(2)| = \left| e_{k+d}(1) - \left( \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \right) \cdot (u_k(2) - u_k(1)) \right| \quad (\text{IV.28})$$

Por ser el signo de la parcial existente en la expresión anterior constante, los valores extremos que se obtendrán corresponden a los valores límite de  $u_k(2) - u_k(1)$ . En el caso en el que  $u_k(2) = u_k(1)$  tendremos que  $|e_{k+d}(2)| = 0$ , es decir, un error cero en la salida. Pero esto sólo se dará si  $e_{k+d}(1) = 0$ , ya que, en caso contrario, el controlador auxiliar propondría un cambio distinto de cero y la salida ya no podría ser igual si se repitieran las mismas condiciones.

En el otro caso límite ( $u_k(2) - u_k(1) = C \cdot e_{k+d}(1)$ ) tendríamos:

$$\begin{aligned} |e_{k+d}(2)| &= \left| e_{k+d}(1) - \left( \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \right) \cdot C \cdot e_{k+d}(1) \right| \\ &= |e_{k+d}(1)| \cdot \left| 1 - \left( \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \right) \cdot C \right| \end{aligned} \quad (\text{IV.29})$$

y se cumpliría la condición (IV.23) si y sólo si

$$\left| 1 - \left( \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \right) \cdot C \right| \leq 1 \Leftrightarrow -1 \leq 1 - \left( \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \right) \cdot C \leq 1 \quad (\text{IV.30})$$

es decir

$$\left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \cdot C \geq 0 \quad (\text{IV.31})$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}} \cdot C \geq 2$$

La primera condición nos dice que el parámetro  $C$  debe tener el mismo signo que la monotonía de la planta. En el caso de monotonía creciente,  $C$  debe ser positivo, extremo al que ya habíamos llegado anteriormente de forma razonada. La segunda condición es la realmente restrictiva y nos dice que si el sistema auxiliar  $ca_1$  viene definido por la expresión (IV.19) y las reglas se modifican según (IV.20), la condición (IV.24), que nos garantiza la bondad del cambio realizado, se cumplirá siempre que

$$C \leq \frac{2}{\left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\vec{x}_k, \tilde{u}}} \quad (\text{IV.32})$$

Como queremos que esto suceda para cualquier estado de la planta deberemos imponer que:

$$C \leq \frac{2}{\left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\text{máx}}} \quad (\text{IV.33})$$

El caso de monotonía descendente tiene un tratamiento prácticamente idéntico al utilizado con la única diferencia ahora de que tanto  $C$  como el valor de la parcial son negativos. En el caso general tendremos que la condición que debe reunir  $C$  para la convergencia del proceso es que

$$|C| \leq \frac{2}{\left| \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\text{máx}}} \quad (\text{IV.34})$$

Evidentemente los casos límite obtenidos pertenecen a las situaciones en las que:

$$e_{k+d}(2) = e_{k+d}(1) \text{ y } e_{k+d}(2) = -e_{k+d}(1).$$

Aunque el sistema puede ser fuertemente alineal, es lógico optar por un valor medio:

$$|C| \leq \frac{1}{\left| \left. \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\text{máx}}} \quad (\text{IV.35})$$

Hallar dicho valor, sin embargo, no es fácil pero si se conoce el proceso físico que se está tratando se podría hacer una estimación de su valor calculando cuál es el cambio

máximo que se podrá obtener en la salida  $d$  instantes de tiempo después ante un cambio pequeño en la señal de control. Recordemos que siempre que se realiza un proceso de control se debe tener una estimación del rango de variación de la variable a controlar y del rango del actuador que se vaya a utilizar. Utilizando estos valores siempre se podrá obtener una estimación por exceso del valor de dicha parcial.

#### **IV.3.5. Segunda etapa: Optimización de las funciones de pertenencia**

Durante la primera etapa del algoritmo, el controlador se encarga de adaptar los consecuentes de las reglas pero con la metodología introducida no se pueden modificar también las funciones de pertenencia. En esta sección se abordará una forma de realizar este último utilizando como información el error en la salida de la planta. Recordemos que al no tener información de cómo varía ésta con respecto a la señal de control en cada región de operación, no podremos utilizar ningún algoritmo basado en el gradiente para acometer esta tarea.

La idea básica que usaremos ahora es que *no debe existir ninguna región de operación peor controlada que otras*. Al actuar el controlador en tiempo real, algunas regiones de operación serán más importantes que otras por lo que, aunque el error sea pequeño en ellas, debido a su mayor uso el error acumulado podría llegar a ser alto y, por tanto, indeseable. De esta manera, la información que usaremos para mover los centros de las funciones de pertenencia será la del criterio del error cuadrático durante un periodo global de control completo  $T'$ .

La idea que se propone para ello, es encontrar una configuración de funciones de pertenencia que equidistribuya un determinado criterio de evaluación (como la integral del error cuadrático, IEC) en cada una de las zonas delimitadas por las funciones de pertenencia (regiones de operación) teniendo en cuenta el comportamiento real de la planta, es decir, sin realizar ninguna media en cada zona. Las zonas activadas más veces sufrirán mayores contribuciones que deberán ser compensadas por los errores mayores de las regiones menos utilizadas. Si existen estados en los que la planta nunca se encuentre, la contribución de su zona asociada será cero por lo que el algoritmo tenderá a desplazar las funciones de pertenencia a otras zonas más necesitadas e importantes.

De esta forma, podemos asociar al centro  $c_v^j$  una “pendiente”  $p_v^j$  que será la diferencia entre la contribución al criterio de la integral del error cuadrático del tramo que le precede y la del tramo que le sigue<sup>1</sup>:

$$p_v^j = \frac{1}{r_y} \left( \int_t^{t+T'} e^2(\vec{x}^k) / x_v^k \in [c_v^{j-1}, c_v^j] - \int_t^{t+T'} e^2(\vec{x}^k) / x_v^k \in [c_v^j, c_v^{j+1}] \right) \quad (\text{IV.36})$$

Para que los parámetros que se utilicen en esta parte del algoritmo sean generales y no dependan de factores de escala, se ha normalizado los valores de las pendientes por el rango de la variable de salida  $r_y$  valor que conocemos ya que sabemos el rango de variación de las consignas que vamos a introducir en el sistema. Así, un valor positivo de esta pendiente indica que la contribución del tramo de la izquierda es mayor que el de la derecha por lo que el centro debe moverse a la izquierda para contrarrestar este efecto. Como no se debe permitir que el orden de los centros varíe, una posible forma de realizar este movimiento sería:

$$\Delta c_v^j = \begin{cases} \frac{c_v^{j-1} - c_v^j}{b} \frac{p_v^j}{p_v^j + \frac{1}{T_v^j}}, & \text{si } p_v^j \geq 0 \\ \frac{c_v^{j+1} - c_v^j}{b} \frac{|p_v^j|}{|p_v^j| + \frac{1}{T_v^j}}, & \text{si } p_v^j < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.37})$$

donde se han introducido dos nuevos parámetros: El “radio de acción”  $b$  que nos delimita la distancia máxima que se puede recorrer (un valor típico es  $b=2$  indicando que, como mucho, un centro se puede mover hasta el punto medio entre éste y el contiguo) y la “temperatura”  $T_v^j$  asociada al centro  $c_v^j$  que nos indica cuánto vamos a mover el centro dentro del rango de acción posible. Así, para temperaturas muy altas los centros se van a mover, en general, grandes distancias mientras que para temperaturas bajas, estos movimientos serán muy pequeños, siempre dependiendo del valor de las pendientes.

Se comenzará con temperaturas altas para todos los centros (100-1000 típicamente) aunque esto no es muy crítico ya que en la evolución del algoritmo se irán ajustando adaptativamente las temperaturas de los mismos. De esta forma, independientemente de los valores iniciales de las pendientes, los centros se irán

---

<sup>1</sup>En la metodología presentada, los centros de las funciones de los extremos están fijados a los valores mínimo y máximo de cada variable, por lo que esta expresión sólo se aplica para los centros interiores.

moviendo inicialmente grandes distancias aumentándose las temperaturas de los que se muevan en un cierto número de iteraciones siempre en la misma dirección y reduciéndose cada vez que cambien de sentido, mejorándose así la velocidad de convergencia del proceso, que finalizará cuando todas las temperaturas o todas las pendientes sean lo suficientemente bajas como para desprestigiar el movimiento de los centros. En ese momento, la superficie del error cuadrático estará lo más homogéneamente distribuida que sea posible.

El proceso de la realización de esta etapa se hace en tiempo real, los movimientos de los centros no tienen para que ser demasiado grandes por lo que el radio de acción deberá ser más alto (por ejemplo  $b = 5$  indicando que, como mucho, nos desplazaremos hasta una quinta parte de la distancia que nos separa del centro vecino).

El periodo global de control  $T'$  debe ser lo suficientemente alto como para poder evaluar globalmente la política de control completa, esto no es suficiente como para asegurar una convergencia. De esta forma, en el algoritmo se irán adaptando las temperaturas de forma que cuando haya un cambio de pendiente éstas decrezcan pero sin permitir el proceso inverso. Así, siempre llegará un momento en el que, o bien los errores serán todos lo suficientemente parecidos o las temperaturas serán lo suficientemente bajas como para que los centros apenas se muevan y el proceso finalice.

#### **IV.3.6. Temporización del proceso de adaptación**

En el organigrama de la figura IV.6 se puede observar la temporización de esta primera etapa. Como ya se comentó anteriormente, hay que tener en cuenta que cada vez que se realiza un cambio en las funciones de pertenencia, los consecuentes de las reglas no se pueden obtener en un solo paso sino que deben ir ajustándose a los nuevos valores de forma progresiva. De esta forma, no es lógico contabilizar en la integral del error cuadrático los errores pertenecientes a los instantes inmediatamente posteriores al cambio de las funciones ya que los consecuentes todavía no se han ajustado a dicho cambio. Por ello, en el algoritmo se utiliza la evaluación del error cuadrático de forma alternada dejando siempre un periodo  $T'$  completo para la adaptación de las reglas a los nuevos valores de las funciones de pertenencia.

#### **IV.3.7. Resumen y mejoras en el proceso de adaptación**

En la figura IV.6 se mostró un organigrama del algoritmo adaptativo presentado en esta tesis donde se indican cada uno de los pasos analizados en las secciones

anteriores. El punto de partida será un controlador difuso principal relativamente simple, es decir, un sistema donde la mayoría de las variables de entrada tienen asignadas una sola función de pertenencia, lo que es equivalente a no seleccionarlas. El conjunto inicial de reglas será vacío (valores fijos o aleatorios) excepto en los casos donde el conocimiento del sistema permita dar un primer valor cuantitativo a las mismas.

Inmediatamente el controlador comenzará a operar en tiempo real. En la primera etapa de control, el controlador se encargará de adaptar los consecuentes de las reglas evaluando el estado actual de la planta y el grado de responsabilidad de cada una de las reglas sobre dicho estado. En la segunda etapa, se irán ajustando los valores centrales de las funciones de pertenencia con el fin de equidistribuir la contribución de cada zona a la integral del error cuadrático durante un periodo global de control  $T'$ .

Al cumplirse el criterio de convergencia, se habrán encontrado unos valores adecuados tanto de los consecuentes de las reglas como de los centros de las funciones de pertenencia capaces de controlar de forma razonable el sistema, según el número de parámetros con los que contemos.

#### ***IV.3.7.1. Mejoras generales: el rango del actuador***

En muchos casos prácticos, el rango del actuador no es todo lo holgado que se desearía para un cierto periodo de muestreo por lo que aparece un problema adicional:

Sea  $u(k) = F(\vec{x}(k))$  la señal de control óptima en el instante  $k$ . Dicho control es el que precisamente consigue que  $y(k+d) = r(k)$ . Supongamos que nuestro actuador sólo admite un rango entre  $-5$  y  $5$  voltios. Si en un cierto instante  $u(k) = 7V$ , sería imposible, aun en el caso óptimo, llevar la salida de la planta al valor deseado,  $d$  iteraciones más tarde. En ese caso, la salida de control óptima de nuestro controlador no sería  $u(k) = F(\vec{x}(k))$  sino:

$$u(k) = \text{sat}(F(\vec{x}(k)); u_{\min}, u_{\max}) \quad (\text{IV.38})$$

Donde la función de saturación  $\text{sat}(x; a, b)$  está definida por:

$$\text{sat}(x; a, b) = \begin{cases} a & x < a \\ x & x \geq a \text{ y } x \leq b \\ b & x > b \end{cases} \quad (\text{IV.39})$$

Todo esto hay que tenerlo en cuenta en nuestro algoritmo de adaptación y auto-aprendizaje.



# Capítulo V

## “SIMULACIÓN REAL”

### *Resumen:*

En este capítulo se procede a presentar todos los resultados obtenidos en tiempo real de cada algoritmo, mediante varios gráficos y tablas que recapitulan el rendimiento de los controladores durante el mismo proceso de control. También se presentan varios procesos de comparaciones cualitativas y cuantitativas que aclaran las diferencias que existen entre ellos en tema de precisión del control y del consumo energético durante el proceso de control. Seguidamente, se procede a identificar el comportamiento de los principales controladores frente a distintos tipos de perturbaciones y frente a posibles cambios en los parámetros del proceso de control como por ejemplo el tiempo de muestreo.



## V. SIMULACIÓN REAL

Por último, después de diseñar todos los controladores y preparar la plataforma sobre la cual se realizan todas las simulaciones, se procede a comprobar el rendimiento de cada uno de los controladores en tiempo real. Usando dos conjuntos diferentes de puntos de referencia se puede visualizar claramente el comportamiento de cada uno de los controladores en el proceso de control de temperatura. Los resultados obtenidos serán objeto de varios procesos de análisis y comparaciones que podrán destacar de forma clara las principales diferencias que existen entre esos controladores.

El presente proceso de control de temperatura consiste en fijar la temperatura en los alrededores del sensor, cual se encuentra al lado de la fuente de calor que es en nuestro caso es una bombilla. Mediante un ventilador que está justamente arriba de este dispositivo se puede enfriar este ambiente según la necesidad del sistema. Para el proceso de calentamiento, la bombilla se encarga de calentar el entorno mientras que el ventilador se encuentra parado: por lo tanto, el proceso de calentamiento podrá ser un poco lento comparado con el proceso de enfriamiento ya que en este caso el sistema está pendiente del rendimiento de la bombilla. Es importante aclarar aquí que el rango de control permitido está limitado, ya que debido a las características de la bombilla y del ventilador no se puede manejar temperaturas que superan un máximo de 8°C de la temperatura ambiente del experimento. Por otro lado y debido a que la fuente de calor está muy cerca del sensor, los cambios de la temperatura en los casos donde el ventilador deja de funcionar son relativamente más grandes de lo que suele pasar en el proceso contrario, es decir, cuando el ventilador toma el control para bajar la temperatura. En ese último caso, los cambios se realizan con más suavidad. De hecho, la apariencia de pequeños saltos de temperatura son resulta de la naturalidad del sistema y no de la política de control.

El error registrado en todas las simulaciones que se proceden a realizar será presentado mediante el Error Cuadrático Medio expresado en  $(c^\circ)^2$  (ECM). Se debe notar aquí que el error cuadrático medio usado en este trabajo no es el error cuadrático medio de la aproximación de la función del controlador sino es el ECM entre el punto de referencia y la salida del controlado medida  $d$  instantes después, siendo  $d$  el retardo de la planta.

$$\mathbf{ECM} = \frac{\sum_{k=1}^{\text{Num\_Iteraciones}} (r(k)-y(k+d))^2}{\text{Num\_Iteraciones}} \quad (\text{V.1})$$

En las secciones V.1 hasta V.3 el índice del error cuadrático medio ECM se calcula en los últimos 40 minutos de las simulaciones. Sin embargo, no se puede realizar una comparación correcta apoyándose solo sobre dichos índices, ya que no representan todo el proceso de control y usar índices de ECM de todo el proceso de control tampoco sería suficiente para realizar comparaciones decisivas porque si se considera que el índice ECM de todo el proceso de control es válido para los controladores convencionales no lo será para el controlador adaptativo debido a que el controlador adaptativo empieza el control sin conocimiento previo del sistema. Por lo tanto, el error cometido al principio del proceso de control sería relativamente grande y contabilizar dicho error para destacar la precisión del controlador adaptativo sería injusto, ya que el buen funcionamiento de un controlador adaptativo requiere el aprendizaje en tiempo real y sería muy conveniente contabilizar el error registrado después de que el controlador aprenda el comportamiento real del sistema controlado. De esta forma, el uso del ECM en los últimos 40 minutos servirá para dar una idea sobre la precisión de todos los controladores usados porque la representación grafica de los resultados del control no ofrece una visión clara del rendimiento real de los controladores y luego en la sección VI.5 se presentarán más índices que podrán ser objeto de varias comparaciones más fructuosas.

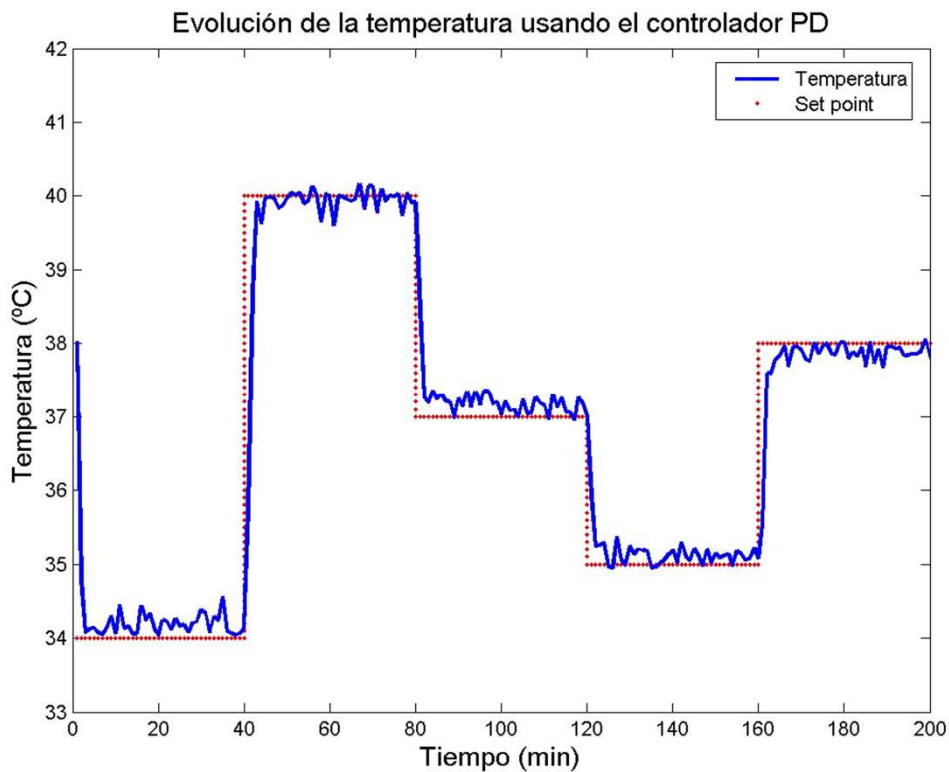
## **V.1. Control de temperatura usando controladores de tipo PID**

Los controladores PID durante muchos años han formado una gran parte de los controladores industriales. Sin embargo, este intensivo uso no ha sido fruto de la casualidad sino por varios motivos que han hecho de estos controladores los favoritos en la industria, ya que según Åström y Hägglund [Åström, 06], más del 90% de los procesos a lazo cerrado han sido controlados por algoritmos de estructuras PID. La simplicidad del diseño y el buen rendimiento en los sistemas no lineales fueron las principales características que han ilustrado el gran éxito de este tipo de controladores en la industria. De hecho, la primera simulación se realizará usando controladores convencionales de tipo PID. A partir de la sintonización realizada en la sección IV.1.4 se puede establecer distintas configuraciones para este tipo de controladores y mediante

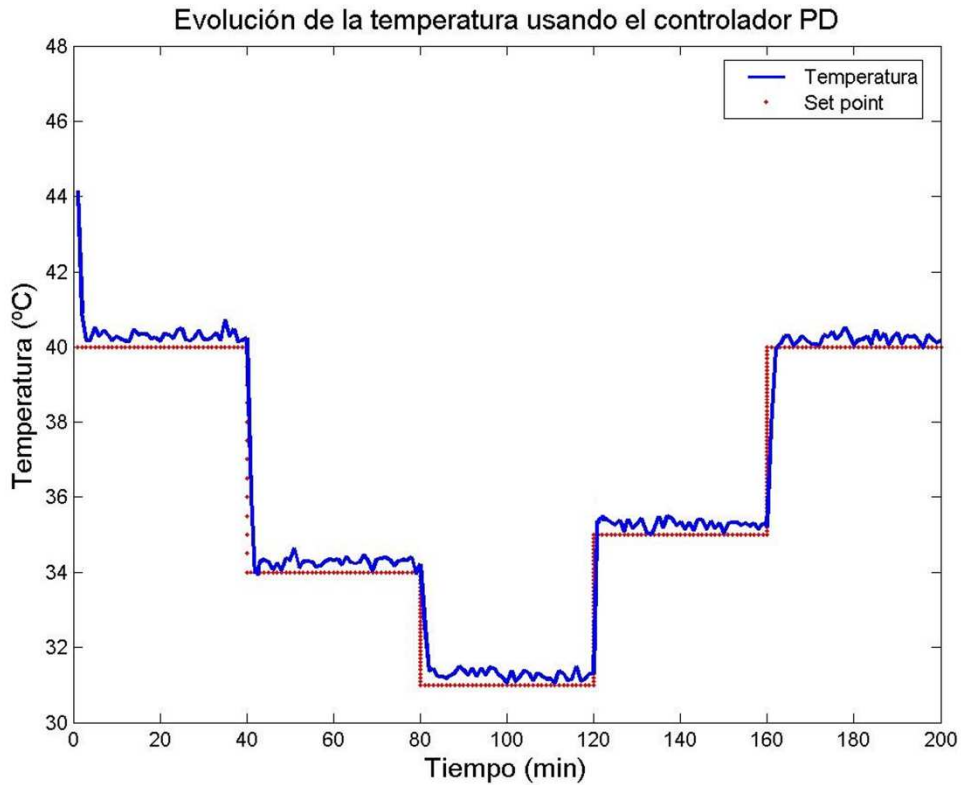
la tabla IV.1 se puede proceder a manejar los controladores PD, PI y PID. En lo que viene se visualiza la respuesta del sistema para cada uno de ellos.

➤ **Control de temperatura usando un controlador PD**

Las dos figuras siguientes V.1 y V.2 presentan el comportamiento del controlador PD en el proceso de control de temperatura durante 200 minutos para diferentes valores de puntos de referencia. Se aprecia claramente que el controlador usado ha podido controlar la temperatura durante todo el periodo del control, ya que cada vez que se cambia el punto de referencia el controlador exige al sistema la corrección necesaria para lograr la temperatura deseada. En realidad lo que hace diferencia entre las políticas de control y entre los controladores es el error cometido durante la corrección de la variable controlada. En este caso el controlador PD ha podido controlar la temperatura para el primer conjunto de puntos de referencia cometiendo un error cuadrático medio en los últimos 40 minutos en alrededor de  $ECM_1 = 0.63$  y  $ECM_2 = 0.57$  para el segundo conjunto.



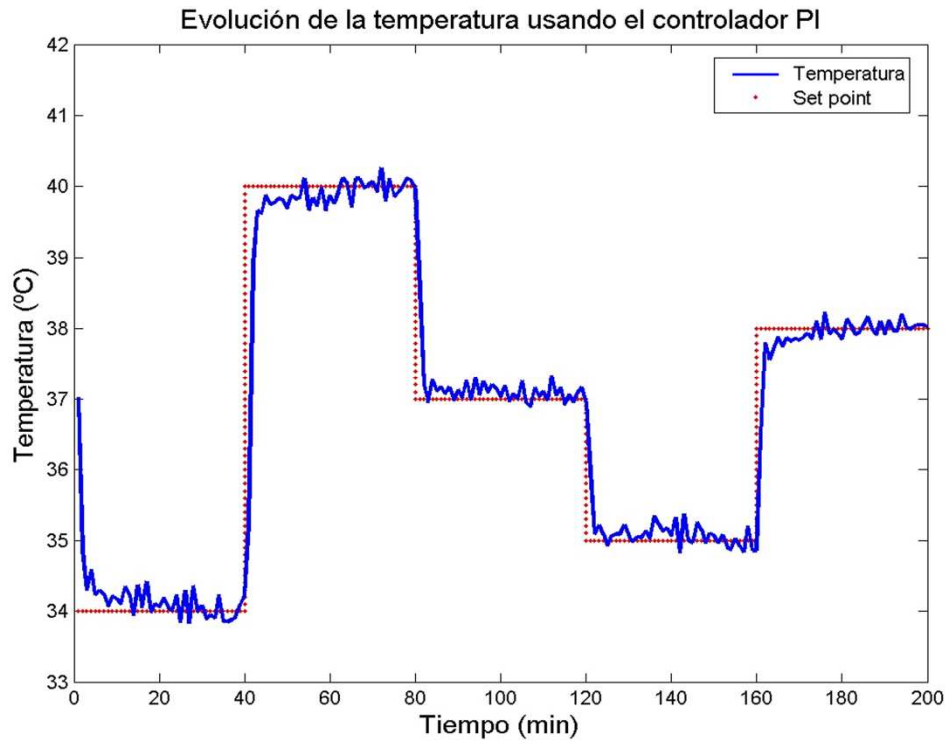
**Figura V.1:** Evolución del proceso de control usando el controlador PD para el primer conjunto de puntos de referencia.



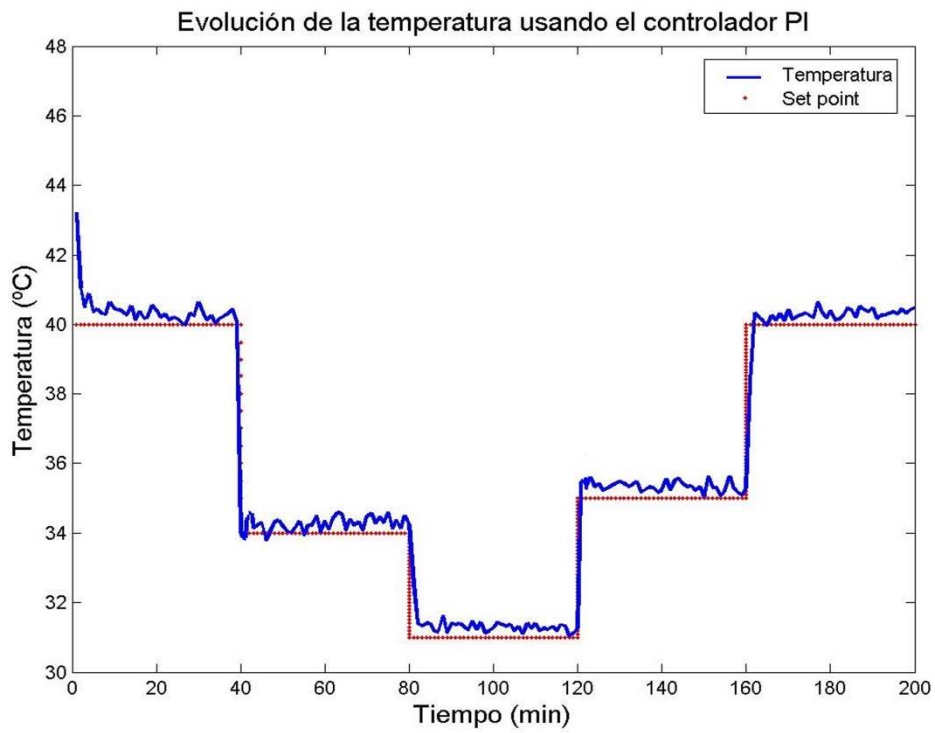
**Figura V.2:** Evolución del proceso de control usando el controlador PD para el segundo conjunto de puntos de referencia.

➤ **Control de temperatura usando un controlador PI**

En las figuras V.3 y V.4 se puede visualizar la respuesta del sistema tras usar el controlador PI. De igual forma este controlador puede controlar la temperatura usando los dos conjuntos de puntos de referencia cometiendo un error cuadrático medio en los últimos 40 minutos de  $ECM_1 = 0.43$  para el primer conjunto y  $ECM_2 = 0.45$  para el segundo.



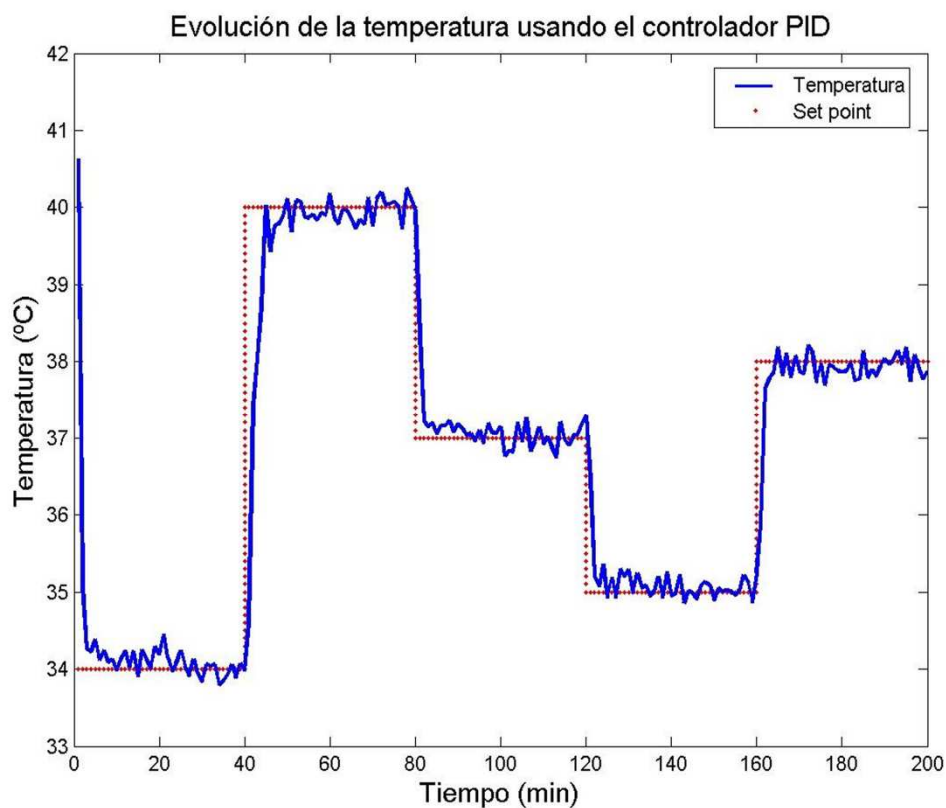
**Figura VI.3:** Evolución del proceso de control usando el controlador PI para el primer conjunto de puntos de referencia.



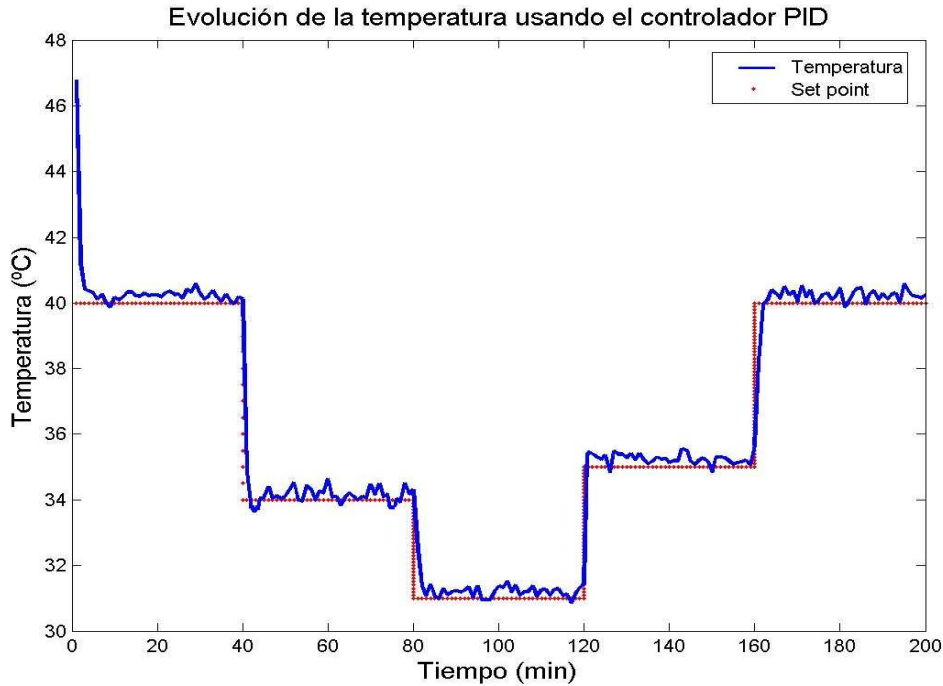
**Figura V.4:** Evolución del proceso de control usando el controlador PI para el segundo conjunto de puntos de referencia.

➤ *Control de temperatura usando un controlador PID*

Después de probar la eficacia de los controladores PD y PI en el mismo proceso de control, se procede a controlar la misma variable con el controlador PID bajo las mismas condiciones para evaluar su comportamiento. Las figuras V.5 y V.6 representan la evolución del proceso de control durante 200 minutos. En ellas, se puede comprobar que también el controlador PID ha sido capaz de llevar a cabo el proceso de control para los dos conjuntos de puntos de referencia. El error cuadrático medio registrado en los últimos 40 minutos para el primer conjunto de puntos de referencia ha sido  $ECM_1 = 0.47$  y en el segundo  $ECM_2 = 0.44$ .



**Figura V.5:** Evolución del proceso de control usando el controlador PID para el primer conjunto de puntos de referencia.

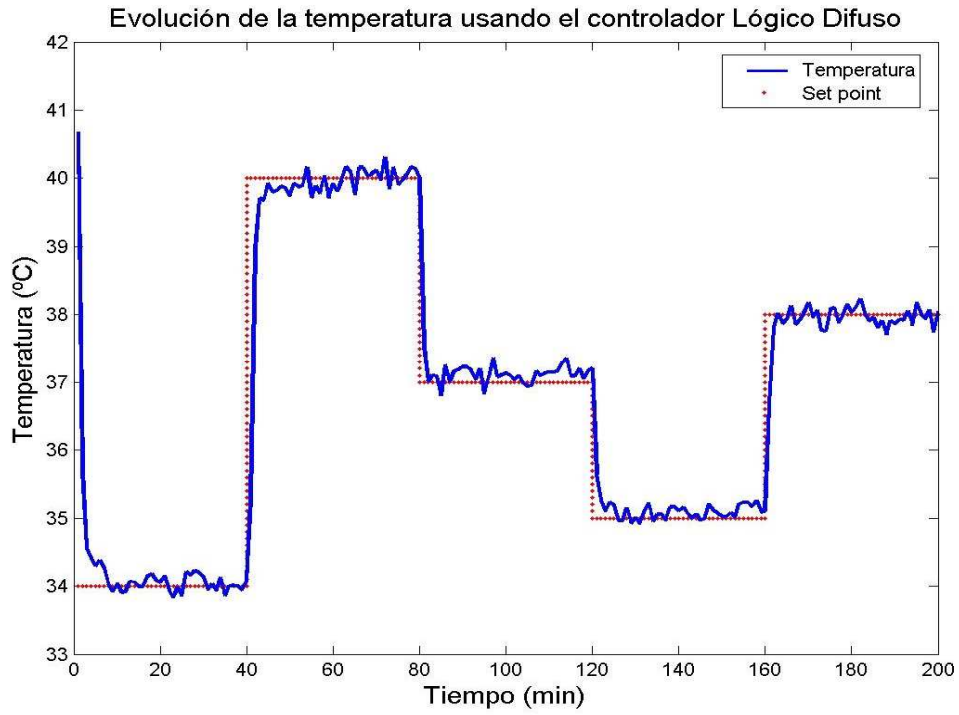


**Figura V.6:** Evolución del proceso de control usando el controlador PID para el segundo conjunto de puntos de referencia.

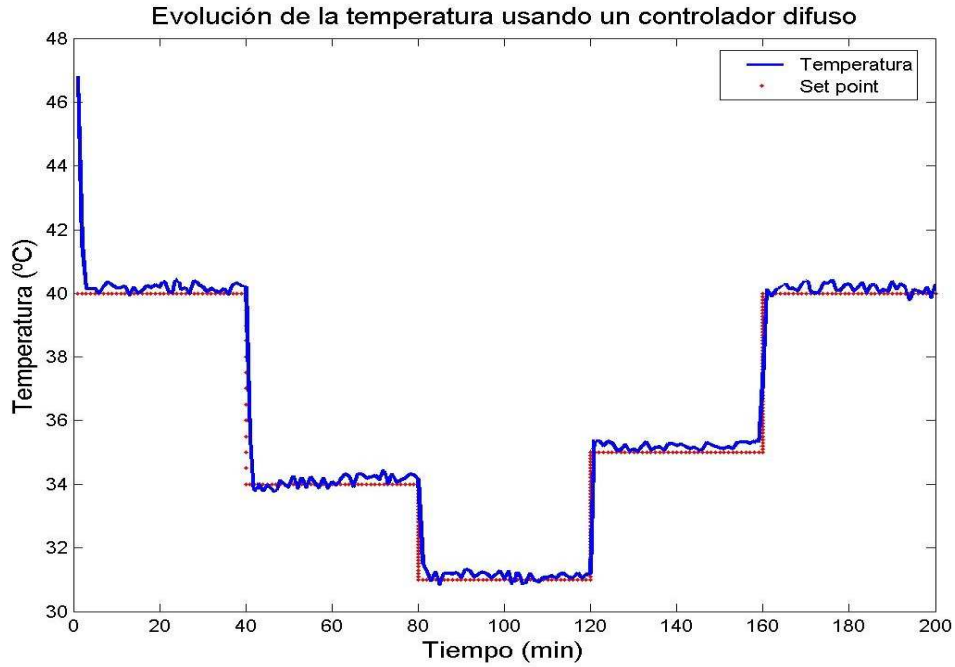
A partir de las simulaciones presentadas se puede deducir que a pesar de los errores registrados podemos decir y tal como es el caso en los sistemas lineares, que los controladores de tipo PID pueden controlar la temperatura en este proceso de control para distintos puntos de referencia. Sin embargo, el objetivo de este trabajo no era comprobar la validez de estos controladores para este proceso sino compararlos con la metodología propuesta. Para ello, se presenta en lo que sigue el comportamiento de otro controlador que utiliza una metodología de control muy diferente.

## **V.2. Control de temperatura usando un Controlador Lógico Difuso**

En la sección anterior los controladores de tipo PID han demostrado en general que son capaces de controlar la temperatura en este proceso de control. En esta sección se procede a probar otro tipo de controladores que utiliza otra metodología de control: un controlador lógico difuso estático. En la sección IV.2 se ha presentado los diferentes pasos seguidos en el diseño de este último. Las figuras V.7 y V.8 presentan la evolución del proceso de control usando el controlador difuso durante los 200 minutos y para los dos conjuntos de puntos de referencia. El error cuadrático medio registrado en los último 40 minutos para los dos casos son:  $ECM_1 = 0.31$  y  $ECM_2 = 0.27$ .



**Figura V.7:** Evolución del proceso de control usando el controlador Lógico Difuso para el primer conjunto de puntos de referencia.



**Figura V.8:** Evolución del proceso de control usando el controlador Lógico Difuso para el segundo conjunto de puntos de referencia.



Durante el proceso de control y usando los dos conjuntos de puntos de referencia el controlador lógico difuso también ha podido demostrar su capacidad de controlar esa planta. Por otra parte, el error registrado en los dos casos ha sido mejor que el error obtenido usando uno de los controladores de tipo PID lo que confirma la gran utilidad que presentan este tipo de controladores.

### **V.3. Control de temperatura usando el controlador adaptativo**

El objetivo de esta sección es poner a prueba nuestro controlador adaptativo diseñado en la sección IV.3. En las secciones anteriores de este capítulo todos los controladores previamente diseñados han mostrado su capacidad de controlar esta planta cometiendo diferentes errores durante el proceso de control. A continuación se intentará comprobar la validez de la metodología propuesta y probar su eficacia en el mismo proceso de control y bajo las mismas condiciones de las simulaciones anteriores.

Es de recordar aquí que el controlador adaptativo contiene dos etapas. En la primera se procede a modificar los consecuentes de las reglas a modo de premio/castigo. Dicha modificación sirve para corregir la evolución del proceso de control ya que evaluar el estado de la planta nos proporciona la información sobre el sentido de esa evolución y partiendo de esa información se puede exigir una corrección a las reglas responsables de dicho estado para acercar al punto de referencia (sección IV.3.4).

La segunda etapa (sección IV.3.5) trata del proceso de optimización de las funciones de pertenencia, en otras palabras, proceder a redistribuirlas para encontrar una configuración que equidistribuya un determinado criterio de evaluación (como la integral del error cuadrático, IEC) en cada una de las zonas delimitadas por las funciones de pertenencia (regiones de operación) teniendo en cuenta el comportamiento real de la planta, es decir, sin realizar ninguna media en cada zona. Las zonas activadas más veces sufrirán mayores contribuciones que deberán ser compensadas por los errores mayores de las regiones menos utilizadas. La idea básica que se usa ahora es que *no debe existir ninguna región de operación peor controlada que otras*. Al actuar el controlador en tiempo real, algunas regiones de operación serán más importantes que otras por lo que, aunque el error sea pequeño en ellas, debido a su mayor uso el error acumulado podría llegar a ser alto y, por tanto, indeseable. De esta manera, la información que usaremos para mover los centros de las funciones de pertenencia será la del criterio del error cuadrático durante un periodo global de control completo  $T'$ .

Tal como se ha aclarado previamente, un controlador adaptativo empieza el control sin tener una política clara para seguir la consigna y llevar el proceso de control con éxito, sino que tendrá que ir aprendiendo de cómo evoluciona la variable controlada y tomar medidas para corregir dicha variación. Por lo tanto, el cálculo del error cuadrático medio ECM en los últimos 40 minutos del proceso de control dará una idea clara sobre el error cometido por el controlador adaptativo en su primera etapa, ya que en estos momentos el controlador que antes no disponía de información suficiente para controlar la planta se supone que ya ha aprendido del propio comportamiento de la planta en tiempo real y será capaz de exigir las correcciones necesarias al sistema de control.

En las simulaciones que se presentan a continuación, nos referimos al controlador adaptativo de la primera etapa con el identificador “adaptativo I”, mientras que el controlador que incluye las dos etapas de adaptación se denotará “adaptativo II”.

### V.3.1. Controlador adaptativo I: Adaptación de los consecuentes de las reglas

El proceso de adaptación de los consecuentes de las reglas se hace precisamente modificando las reglas responsables del estado indeseado de la planta usando la expresión (IV.20) que se presenta de nuevo aquí:

$$\Delta R_i(k+d) = \alpha_i(k) \cdot C \cdot e(k+d) \quad (\text{V.2})$$

donde  $\alpha_i(k)$  es el grado de activación de la regla en el instante  $k$ , y  $e_y(k+d)$  es el error cometido en la salida en el instante  $k+d$  y viene dado por:

$$e(k+d) = r(k) - y(k+d) \quad (\text{V.3})$$

ya que  $r(k)$  es el valor deseado en el instante  $k$  y las reglas que se activaron en el instante  $k$  lo hicieron para conseguir el valor deseado  $r(k)$  y no  $r(k+d)$ , así que usar  $r(k+d)$  en la expresión interior sería incorrecto.

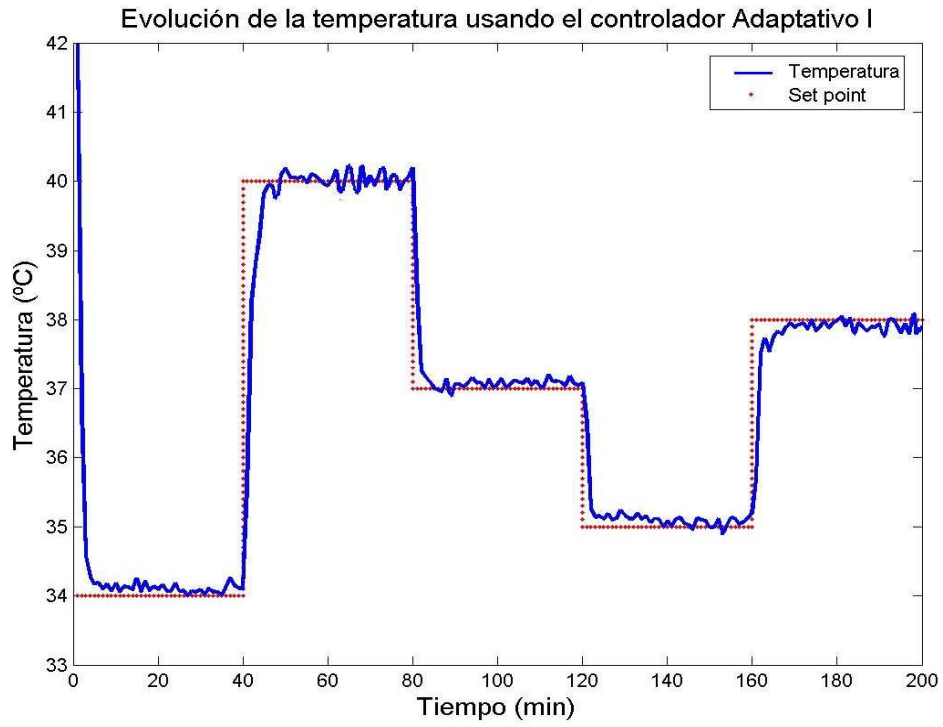
La expresión del coeficiente  $C$  viene dada por:

$$|C| \leq \frac{1}{\left| \frac{\partial f}{\partial u}(\vec{x}, u) \right|_{\text{máx}}} \quad (\text{V.4})$$

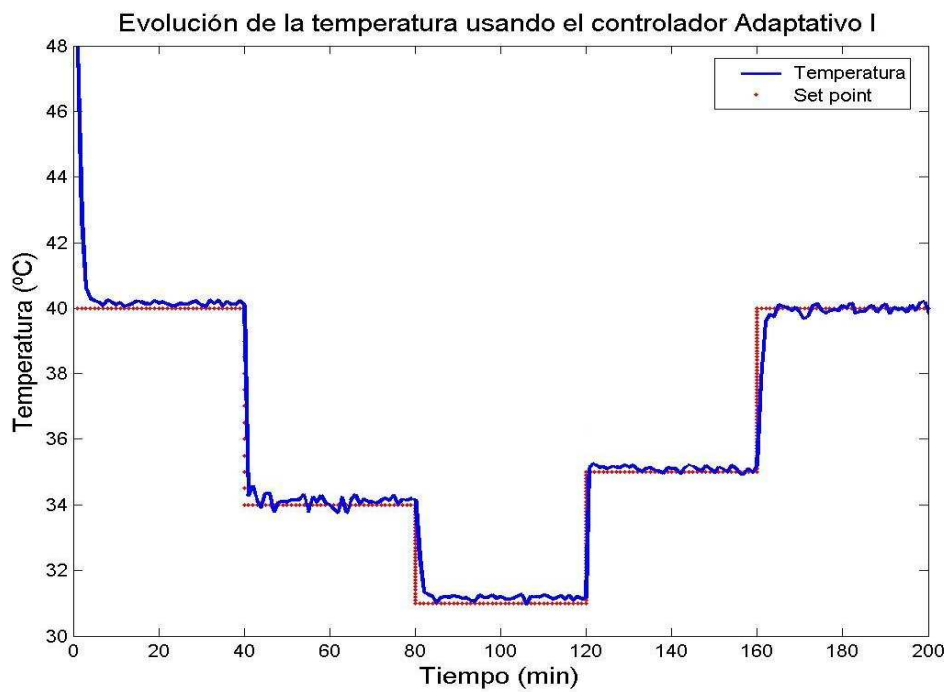
Su determinación se puede hacer estudiando el funcionamiento del sistema controlado, ya que se puede estimar cuál será el cambio máximo que se podrá obtener la salida  $d$

instantes de tiempo después ante un cambio pequeño en la señal de control, teniendo en cuenta el rango de variación del error del sistema que es la variable controlada y del rango del actuador, que es el rango de alimentación del ventilador. En este caso, un cambio pequeño en la señal de control no tendrá un gran efecto sobre la salida de la planta porque esta última dispone de un sistema de calentamiento fuerte y continuo (que es la bombilla) comparándolo con la potencia del ventilador y para tener cambios en la salida de la planta es necesario realizar un cambio importante en la señal de control que es la alimentación del ventilador. Para ello, se establece el valor de  $C$  el más grande posible, que es el máximo del rango del actuador  $|C| = 15$ , y como la monotonía de la planta es decreciente el valor de  $C$  debe ser negativo:  $C = -15$ .

Al diseñar e implementar un controlador adaptativo difuso que no disponga de la información ordinaria para controlar una planta, se puede estimar su comportamiento en los procesos de control de forma teórica o mediante simulaciones numéricas. Sin embargo, dicho comportamiento no tiene por qué coincidir siempre con el comportamiento real del controlador adaptativo que controla una planta real, ya que las simulaciones numéricas se consideran como casos ideales que no pueden contener todos los factores de un proceso real. De hecho, el controlador adaptativo I se ha puesto a prueba en el mismo proceso de control de temperatura y bajo las mismas condiciones. Mediante las figuras V.9 y V.10 se puede destacar su comportamiento en dos procesos de control con dos conjuntos de puntos de referencia diferentes durante 200 minutos. En el primer conjunto de puntos de referencia el controlador adaptativo I ha podido controlar la temperatura cometiendo un error cuadrático medio de  $ECM_1 = 0.24$  y  $ECM_2 = 0.20$  para el segundo conjunto de puntos de referencia.



**Figura V.9:** Evolución del proceso de control usando el controlador Adaptativo I para el primer conjunto de puntos de referencia.



**Figura V.10:** Evolución del proceso de control usando el controlador Adaptativo I para el segundo conjunto de puntos de referencia.

### V.3.2. Controlador adaptativo II: Adaptación de los consecuentes de las reglas y optimización de las funciones de pertenencia

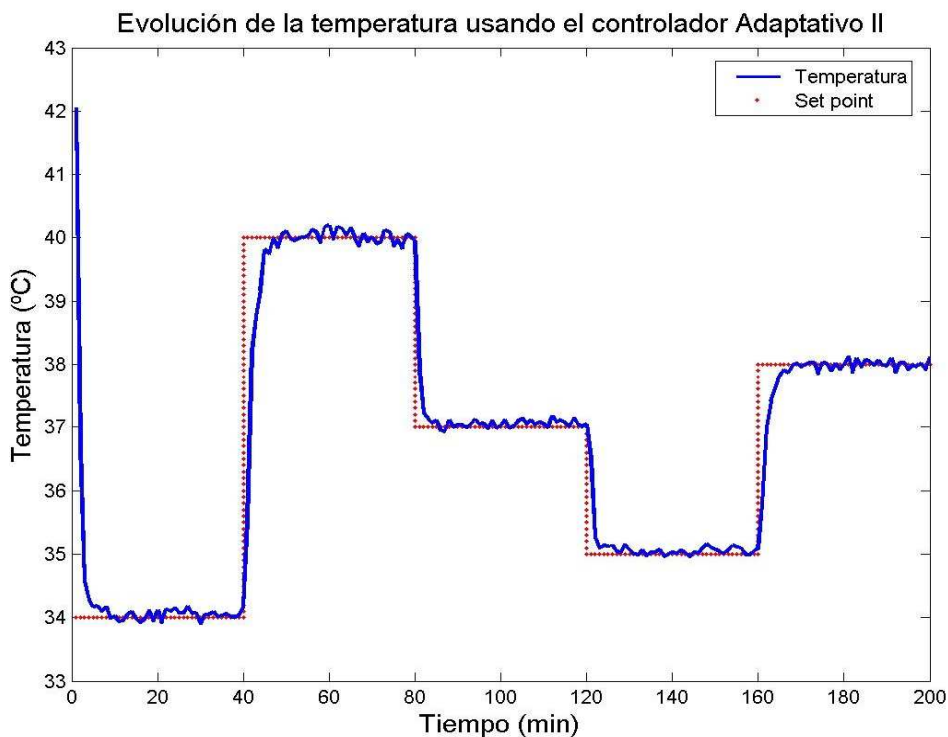
A partir de la sección anterior se puede deducir que la metodología de adaptación propuesta para realizar la primera etapa del controlador adaptativo ha demostrado su validez y ha podido llevar a cabo el control de la temperatura en tiempo real cometiendo el menor ECM registrado por todos los controladores presentados anteriormente. En la segunda etapa del controlador adaptativo se pretende mejorar aún el comportamiento del controlador adaptativo I añadiendo un segundo proceso de adaptación y autoaprendizaje. Se trata de un proceso de optimización de las funciones de pertenencia, que tras un cierto periodo de control completo  $T'$  tendrán que redistribuirse para cubrir aquellas zonas más necesitadas, tras un análisis del espacio de entrada durante el periodo  $T'$ . Por otra parte, el movimiento de las funciones de pertenencia en este caso se puede limitar en la mitad de la distancia que nos separa del centro vecino usando un valor de  $b = 2$  (véase Eq. (V.5)). De esta forma se puede efectuar desplazamientos importantes por el espacio de entrada garantizando un mayor escaneo de dicho espacio. El periodo global de control  $T'$  debe ser lo suficientemente alto como para poder evaluar globalmente la política de control completa. De hecho, si se escoge un  $T' = 200$  minutos sería suficientemente largo para que el controlador aprenda el comportamiento y sintoniza adecuadamente los consecuentes de las reglas. La modificación de las funciones de pertenencia no debe cambiar su orden original. La ecuación (IV.37) que recordamos aquí nos garantiza este criterio.

$$\Delta c_v^j = \begin{cases} \frac{c_v^{j-1} - c_v^j}{b} \frac{p_v^j}{p_v^j + \frac{1}{T_v^j}}, & \text{si } p_v^j \geq 0 \\ \frac{c_v^{j+1} - c_v^j}{b} \frac{|p_v^j|}{|p_v^j| + \frac{1}{T_v^j}}, & \text{si } p_v^j < 0 \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

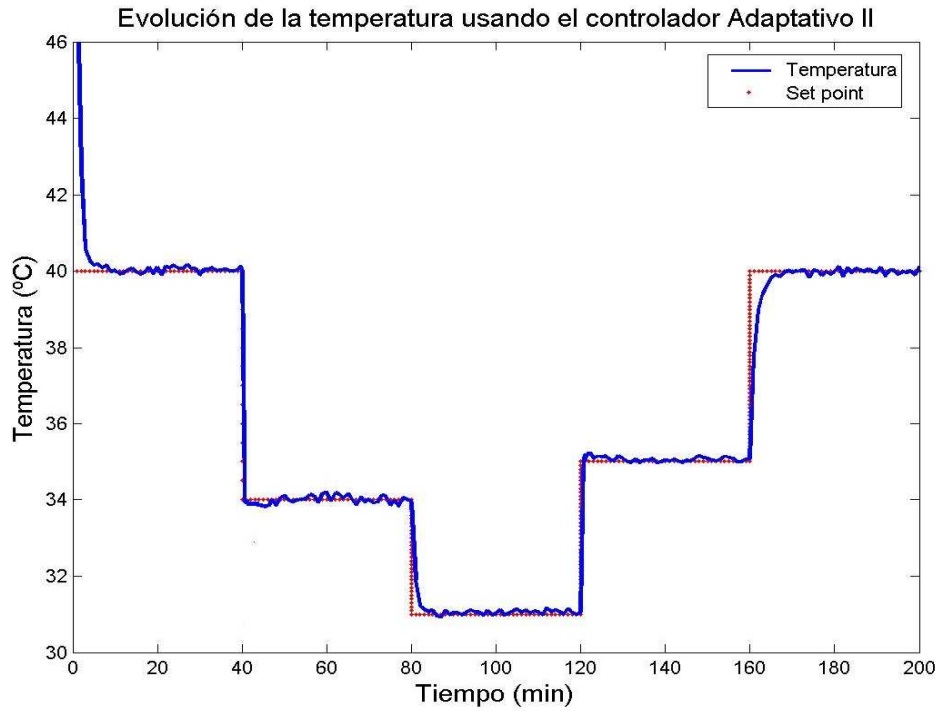
Siendo  $T_v^j$  el parámetro que nos indica cuánto vamos a mover el centro dentro del rango de acción posible ( $b$ ). Para valores muy altos los centros se van a mover, en general, grandes distancias mientras que para valores bajos, estos movimientos serán muy pequeños, siempre dependiendo del valor de las pendientes. En esta simulación se empieza con un valor muy alto  $T_v^j = 100$  que irá disminuyendo dividiendo por dos cada

evaluación de la integral del error cuadrático (IEC) que es la pendiente  $p_v^j$  (su ecuación se ha presentado previamente, ver Eq. (IV.36)).

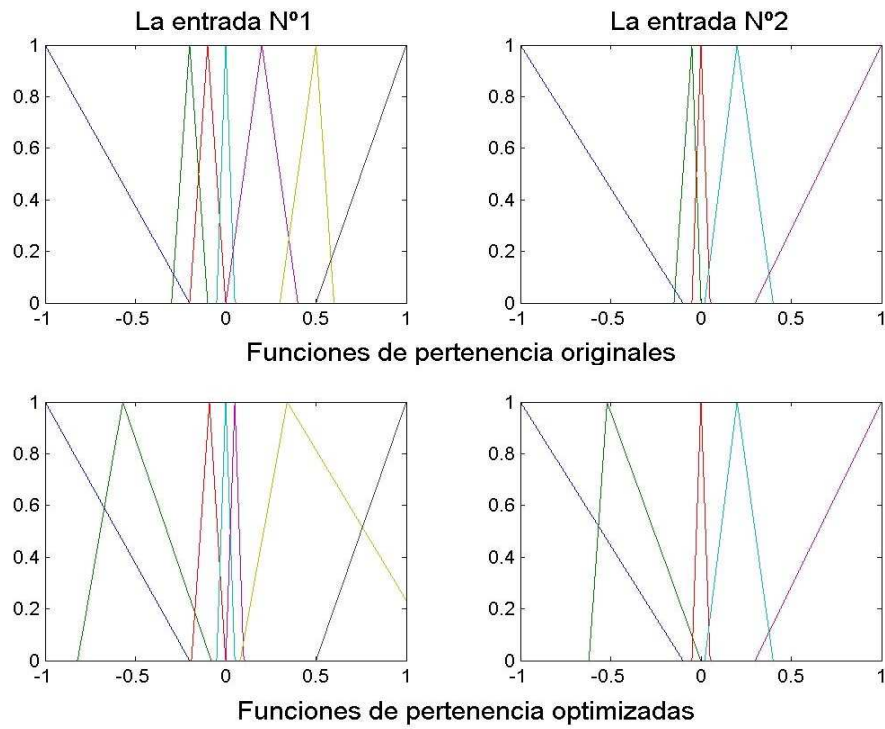
Las figuras V.11 y V.12 presentan la evolución del proceso de control usando el controlador adaptativo II durante el tercer tiempo de control  $T'_3$  para dos conjuntos diferentes de puntos de referencia, es decir, durante el primer tiempo de control  $T'_1$  se procede a la adaptación de los consecuentes de las reglas sin calcular el IEC y la pendiente  $p_v^j$ . Seguidamente, en el segundo periodo de control  $T'_2$  con los consecuentes adaptados empieza el cálculo de la pendiente  $p_v^j$ . Al final de  $T'_2$  se genera la nueva configuración de funciones de pertenencia usando la fórmula (V.5). Por último y durante el periodo de control  $T'_3$  el controlador adaptativo empieza el control usando la nueva configuración de funciones de pertenencia pero esta vez sin calcular la pendiente  $p_v^j$ , ya que el cálculo de la pendiente se hace periódicamente después de un tiempo de control completo  $T'$  para así proceder de nuevo a establecer una nueva configuración de funciones de pertenencia pero ahora con un valor de  $T_v^j$  más pequeño. La figura V.13 muestra la nueva configuración de funciones de pertenencia después del proceso de optimización realizado durante el periodo de control  $T'_2$ .



**Figura V.11:** Evolución del proceso de control usando el controlador Adaptativo II para el primer conjunto de puntos de referencia.



**Figura V.12:** Evolución del proceso de control usando el controlador Adaptativo II para el segundo conjunto de puntos de referencia.



**Figura V.13:** Funciones de pertenencia de las dos entradas antes y después del proceso de optimización de la segunda etapa del controlador adaptativo.

En la figura VI.13 se puede ver cómo se han movido las funciones de pertenencia para cubrir las zonas más necesitadas y que sufren un mayor uso durante el proceso de control. Con esta nueva configuración, el controlador adaptativo II ha podido mejorar aún más el rendimiento del control de la temperatura. El error durante los últimos 40 minutos para el primer conjunto de puntos de referencia era de  $ECM_1 = 0.17$  y para el segundo conjunto  $ECM_2 = 0.14$ .

Generalmente, todos los controladores diseñados en esta tesis han podido llevar a cabo el control de la temperatura en tiempo real. Las figuras que representan la evolución del proceso de control de todos los controladores lo demuestra claramente. Sin embargo, existen serias diferencias entre el rendimiento de cada uno de ellos que no se puede precisar de forma gráfica debido a la naturaleza de la respuesta del sistema y también porque se trata de un margen de error muy pequeño. En la sección que viene se pretende destacar esas diferencias mediante el uso de varias medidas y comparaciones cuantitativas y cualitativas que podrán precisar cuál es la metodología de control que presenta las mejores prestaciones.

#### **V.4. Comparación de los resultados**

El objetivo de cualquier proceso de control es acercar la variable controlada a un valor deseado. Generalmente, dicho objetivo se puede lograr usando una de las distintas políticas de control que existen en la literatura. Sin embargo, lo que marca la diferencia entre las políticas de control y por tanto entre los controladores son las prestaciones de cada uno, ya que según la necesidad de cada proceso de control se procede a elegir la política adecuada y la que mejor cumple con los requisitos del proceso. Para todos los procesos de control, el criterio de la precisión del controlador juega un papel muy importante, porque en función de la política de control y/o el controlador elegido se establece un cierto nivel de precisión, ya que cada controlador dispone de un nivel de acierto en su funcionamiento.

En esta sección se pretende averiguar cuál es el controlador que presenta las mejores prestaciones en este proceso de control. Para ello, se utilizará dos criterios muy importantes: son la precisión del controlador, por un lado, y su consumo energético durante todo el proceso de control, por otro. Mediante el cálculo de varios índices que representan el error cometido por cada controlador y el cálculo de la energía consumida por cada uno en el mismo proceso de control se puede realizar varias comparaciones



cualitativas y cuantitativas que podrán destacar de forma muy clara cuál es el controlador que presenta el mejor rendimiento en este proceso de control.

#### V.4.1. Precisión del proceso de control

Debido a la naturaleza de la respuesta del sistema, en las figuras del proceso de control de cada uno de los controladores presentadas previamente resulta algo difícil destacar la diferencia de precisión que existe entre ellos. De hecho, las comparaciones que se pretende realizar aclararán esa diferencia de forma cualitativa utilizando representaciones gráficas y de forma cuantitativa basándose sobre varios índices del error cuadrático medio registrado por cada uno. En esta sección nos centraremos en el uso del primer conjunto de puntos de referencia en todas las comparaciones y más adelante se presentarán resultados de varios conjuntos de puntos de referencia y numerosas simulaciones para probar la validez de dichos resultados estadísticamente.

El método gráfico consiste en dibujar la curva que representa la diferencia entre dos curvas de la evolución del error del control en el mismo intervalo de tiempo y para lograr el mismo punto de referencia de dos controladores diferentes, en otras palabras, se trata de representar la función definida como:

$$\textit{Diferencia del error} = E_{(\text{controlador-1})} - E_{(\text{controlador-2})} \quad (\text{VI.6})$$

siendo  $E_{(\text{controlador-1})}$  la curva representativa del error cometido por el controlador-1 y  $E_{(\text{controlador-2})}$  la curva representativa del error cometido por el controlador-2 durante el mismo intervalo de tiempo y para lograr el mismo punto de referencia.

Si  $E_{(\text{controlador-1})} > E_{(\text{controlador-2})}$  eso implica que  $\textit{Diferencia del error} > 0$ .

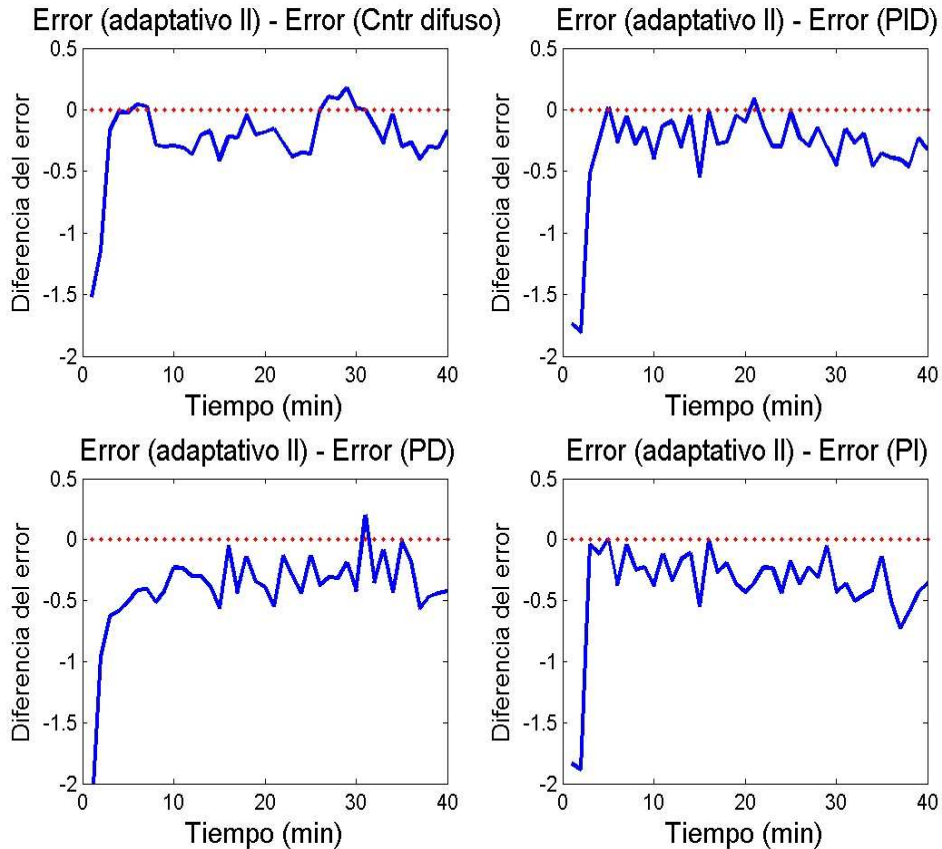
Gráficamente eso quiere decir que la curva que representa la función *Diferencia del error* estará arriba del cero.

Si  $E_{(\text{controlador-1})} < E_{(\text{controlador-2})}$  eso implica que  $\textit{Diferencia del error} < 0$ .

Gráficamente eso quiere decir que la curva que representa la función *Diferencia del error* estará abajo del cero.

En la figura V.14 se puede ver la representación gráfica de la función *Diferencia del error* entre el  $E_{(\text{controlador-1})}$  que es la curva representativa de la evolución del error cometido por el controlador adaptativo II durante los primeros 40 minutos y  $E_{(\text{controlador-2})}$  la curva que representa el resto de los controladores usados. Para tener una comparación

gráfica clara y adecuada, en todas esas simulaciones se ha empezado el proceso de control a partir de temperatura relativamente altas, por lo tanto, el error en los primeros minutos está muy grande. Es de notar aquí que los 40 minutos en el caso del controlador adaptativo II provienen del periodo de control  $T'_3$  (referirse a la sección V.3.2 para mayor claridad), es decir, después de adaptar los consecuentes de las reglas y optimizar las funciones de pertenencia.



**Figura V.14:** Curva representativa de la función *Diferencia del error* entre el controlador adaptativo II y el resto de los controladores durante los primeros 40 minutos del proceso de control para lograr el mismo punto de referencia.

En la figura V.4 se puede ver que la curva representativa de la función *Diferencia del error* está casi siempre por debajo del cero, es decir, *Diferencia del error*  $< 0$ . Utilizando la ecuación (V.6) podemos deducir fácilmente que:

$$\text{Diferencia del error} = E_{(\text{controlador-1})} - E_{(\text{controlador-2})} < 0$$

implica que:  $E_{(\text{controlador-1})} < E_{(\text{controlador-2})}$ .

En este caso  $E_{(\text{controlador-1})}$  representa siempre el error cometido por el controlador adaptativo II mientras que  $E_{(\text{controlador-2})}$  representa el resto de los controladores, es decir que el error cometido por el controlador adaptativo es casi siempre menor que el error cometido por el resto de los controladores durante el mismo proceso de control.

Durante esta comparación cualitativa, se ha mostrado claramente que el controlador adaptativo implementado en esta tesis es más preciso que el resto de los controladores. De hecho, en lo que viene se procederá a demostrarlo cuantitativamente mediante el cálculo de varios tipos del error cuadrático medio ECM para cada uno de los controladores usados en este trabajo. Dichos índices podrán destacar la diferencia de precisión que existe entre cada uno de ellos, porque a diferencia del ECM que se ha presentado en las secciones V.1 hasta V.3, aquí se pretende calcular el ECM por distintas etapas del proceso de control y no solo en los últimos 40 minutos. La tabla V.1 presenta los resultados de todos los índices ECM calculados, siendo que:

$ECM_{160-200}$ : el error cuadrático medio calculado durante los últimos 40 minutos.

$ECM_{100-200}$ : el error cuadrático medio calculado durante los últimos 100 minutos.

$ECM_{0-200}$ : el error cuadrático medio calculado durante todo el proceso de control.

**Tabla V.1:** Distintos índices de Error Cuadrático Medio (ECM en  $(c^\circ)^2$ ) de todos los controladores usados.

	$ECM_{160-200}$	$ECM_{100-200}$	$ECM_{0-200}$
<i>PD</i>	0.49	0.44	0.89
<i>PI</i>	0.43	0.38	0.84
<i>PID</i>	0.47	0.41	0.85
<i>Controlador difuso estático</i>	0.31	0.28	0.78
<i>Controlador adaptativo I</i>	0.24	0.23	0.67
<i>Controlador adaptativo II</i>	0.17	0.18	0.53

A partir de los resultados presentados en la tabla V.1 se puede deducir con mucha seguridad cuál es el controlador que ofrece un control más preciso en este proceso de control en tiempo real, ya que los índices presentados en la tabla no dan solo una idea sobre la precisión del control en un intervalo de tiempo limitado sino ofrecen una visión muy clara sobre la precisión de todos los controladores por distintas etapas del proceso de control, lo que permite deducir fácilmente cuál es el controlador más preciso. Claramente, el controlador adaptativo en sus dos etapas de adaptación fue el que mejor

controla la planta generando el menor ECM calculado por varios periodos de control. Siempre a partir de los resultados que figuran en la tabla V.1, se puede notar también el efecto de la segunda etapa de adaptación, ya que el error reducido que presentó el controlador adaptativo I (adaptación de los consecuentes de las reglas) se mejoró aún al proceder a la segunda etapa de adaptación (la redistribución de las funciones de pertenencia) con el controlador adaptativo II.

Por último, la superioridad del controlador adaptativo diseñado e implementado en este trabajo se ha demostrado cualitativamente y cuantitativamente [Lasri, 11c]. Queda de preguntar ¿Qué coste tendrá esta técnica? En lo que viene se presenta otro estudio comparativo del coste energético de cada controlador utilizado en este trabajo para destacar cuál es la metodología que presenta el mejor ahorro de energía durante el proceso de control.

#### **V.4.2. Consumo eléctrico del proceso de control**

Hoy en día, el tema del ahorro energético forma un papel importante en los debates científicos, ya que el cambio climático que sufre el planeta y las reservas de los recursos energéticos naturales que se están agotando exigen a la sociedad científica encontrar soluciones para solventar el problema energético y proteger el entorno ambiental. El uso de las energías renovables y/o limpias presenta una alternativa muy adecuada del punto de vista ambiental, lo que no es el caso económicamente, porque el coste de dichas energías es aún alto. De hecho, el ahorro energético se ve como un campo muy prometedor que podrá limitar hasta un cierto nivel los daños causados por la producción y el uso de la energía eléctrica y moderar el consumo de los recursos naturales, además de presentar una medida muy eficaz para reducir la factura del consumo eléctrico y es lo que desgraciadamente llama la atención en el sector que más consume y más gasta la energía: la industria.

A estas alturas de la presente tesis, no se pretende solventar estos problemas “aunque lo deseamos”, sino que se intenta presentar un pequeño aporte en el campo del ahorro energético durante los procesos de control, ya que con lo antiguo que es el tema del control de procesos, no se han hecho muchas cosas en esta área. En la literatura, muy pocos trabajos han tratado de presentar sistemas de control capaces de ahorrar energía o de optimizarla [Kay, 95; Reza, 02; Albert, 05; Shuo, 06; Yanf, 07; Chiou, 09; Ying, 10; Parg, 02; Bai, 10] En ellos, se puede encontrar dos métodos principales para el

ahorro y la optimización del consumo energético. En el primer método, los sistemas de control se usan como sistemas de supervisión que administran el uso de la energía para lograr un consumo optimizado y evitar cualquier desgaste inútil [Albert, 05; Reza, 02], mientras que en el segundo método el sistema de control utilizado garantiza el ahorro energético generando una señal de control muy optimizada que alimenta el actuador del sistema de forma que el rendimiento de este último será lo más adecuado posible y sin sobre-gasto de energía [Shuo, 06; Parg, 02].

En la metodología de adaptación y auto-organización propuesta en este trabajo el controlador difuso dispone de muy poca información sobre el comportamiento real de la planta controlada (signo de la monotonía y el retardo de la planta). A pesar de ello, ha podido mostrar su superioridad en tema de precisión del control frente a otros controladores convencionales, ya que el error cometido por el controlador adaptativo durante el proceso de control fue el mejor comparándole con el error registrado por el resto de los controladores. El objetivo de esta sección será la comparación del consumo eléctrico de todos los controladores durante el mismo proceso de control y bajo las mismas condiciones. Como el consumo eléctrico es la cantidad de energía utilizada por parte de un dispositivo electrónico, se puede averiguar dicho consumo calculando su potencia.

La potencia del consumo de un dispositivo eléctrico se representa matemáticamente por:

$$\mathbf{P} = \mathbf{V} * \mathbf{I} \quad (\text{VI.6})$$

Con  $P$  expresada en Watios (W) y  $V$  el valor de la tensión (normalmente expresada en voltios) multiplicada por el valor de la intensidad  $I$  de la corriente que la recorre (expresada normalmente en Amperios). Por otro lado, la tensión  $V$  se expresa como:

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} * \mathbf{I} \quad (\text{VI.7})$$

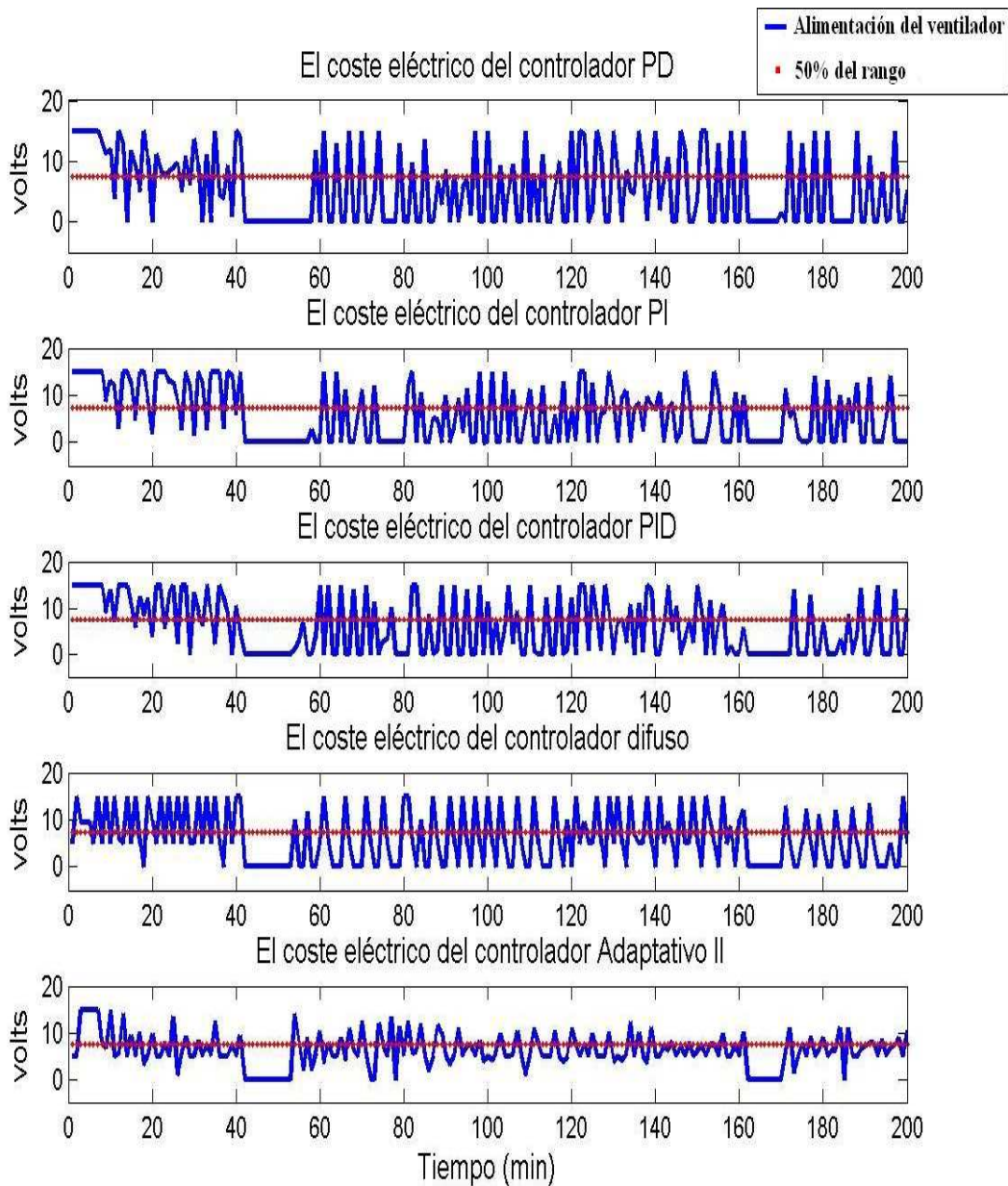
Con  $R$  la resistencia del dispositivo electrónico (expresada normalmente en Ohms,  $\Omega$ ), de hecho, la corriente puede ser presentada como:  $I = V/R$  y la expresión (VI.6) se expresa como:

$$\mathbf{P} = \mathbf{V}^2 / \mathbf{R} \quad (\text{VI.8})$$

A partir de la Eq. (VI.6) se puede observar que la variación del voltaje y la corriente es proporcional (siendo que la resistencia  $R$  es fija). De hecho, la variación del voltaje puede destacar la variación de la corriente que recorre el dispositivo tanto como su

consumo energético que es su potencia. El consumo eléctrico (CE) de todo el proceso de control se calcula sumando la potencia usada en cada iteración durante todo el proceso de control.

La figura V.15 presenta la evolución de la salida de todos los controladores usados en este trabajo (durante el mismo proceso de control que usa el primer conjunto de puntos de referencia) y que representa también la señal de alimentación del actuador del sistema (el ventilador) y la tabla V.2 recapitula el consumo energético de todos los controladores usados durante el mismo proceso de control.



**Figura V.15:** Evolución del consumo eléctrico de todos los controladores usados durante 200 minutos de simulación usando el primer conjunto de puntos de referencia.

La representación gráfica de la evolución de la señal de alimentación del actuador para cada controlador usado en este trabajo podrá destacar de forma cualitativa las diferencias que existen entre los controladores y dar una idea muy clara de cómo opera cada uno de ellos. A partir de la figura V.15 se puede deducir fácilmente que la señal generada por el controlador adaptativo presenta un comportamiento suave y moderado, ya que durante todo el proceso de control mantiene su salida (que es la alimentación del actuador) dentro de la zona central del rango del actuador -menos en las zonas donde el ventilador tendrá que estar parado- eso quiere decir que el ventilador durante casi todo el tiempo de control recibe una alimentación moderada que garantiza un funcionamiento ideal sin forzarle a acercarse a sus límites físicos, mientras que el resto de los controladores, a pesar de las diferencias que existen entre ellos, presentan un comportamiento casi igual, ya que se puede notar que la señal de salida de cada uno de ellos oscila periódicamente entre los límites del rango del actuador por casi todo el tiempo de control -menos las zonas en las que el ventilador tendrá que estar parado- esas oscilaciones exigen al ventilador un modo de funcionamiento muy brusco, ya que, cuando la entrada del ventilador está a cero este último se pone en el estado de descanso y volver a alimentarlo en el instante siguiente con la máxima tensión permitida pone el rotor del ventilador bajo una carga muy grande que influirá en el desgaste del ventilador y acortará su vida [Lasri, 12].

Sin embargo, las diferencias cualitativas sacadas de las gráficas tendrán alguna interpretación numérica. A partir de la tabla V.2 se puede sacar las diferencias cuantitativas basándose sobre el consumo real de cada controlador durante el mismo proceso de control y bajo las mismas condiciones.

**Tabla V.2:** El coste eléctrico real de cada controlador durante el proceso de control usando el primer conjunto de puntos de diferencia.

	<i>PD</i>	<i>PI</i>	<i>PID</i>	<i>Controlador difuso</i>	<i>Controlador adaptativo II</i>
El coste eléctrico (CE en W)	1599.3	1776.3	1601.55	1621.3	1384.1

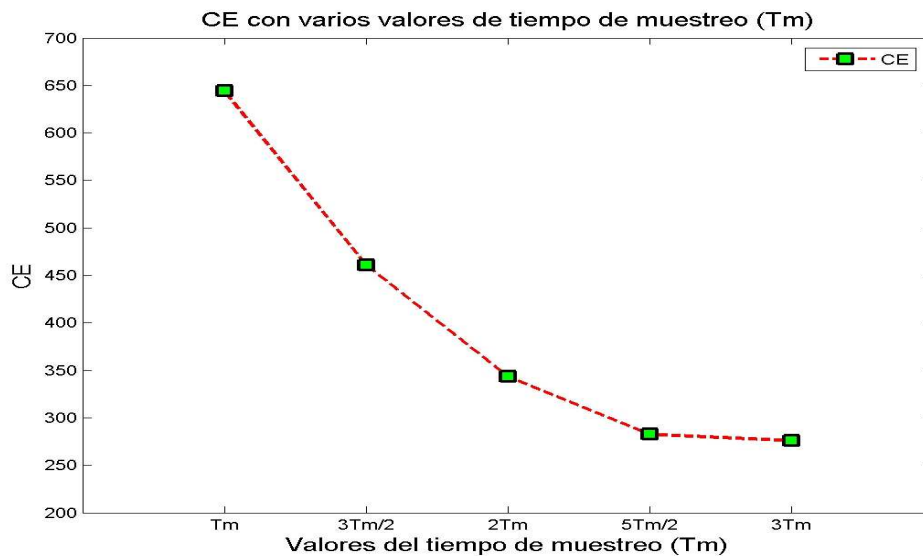
Los resultados numéricos del coste eléctrico durante el proceso de control presentados en la tabla V.2 lo dejan muy claro: el controlador adaptativo ha podido llevar el proceso de control con el menor consumo energético, ya que el

comportamiento moderado y suave que presentó gráficamente se ha traducido numéricamente en el menor consumo energético entre todos los controladores usados.

Después de haber demostrado la superioridad de la metodología de adaptación y de auto-organización propuesta en esta tesis en tema de precisión y de ahorro energético durante el proceso de control, se pretende estudiar el efecto del tiempo de muestreo sobre el rendimiento del controlador adaptativo.

#### V.4.3. Efecto del tiempo de muestreo

El objetivo de esta sección será poner en prueba el rendimiento del controlador adaptativo frente a diferentes tiempos de muestreo. Se hará un enfoque sobre la precisión del controlador y sobre su consumo eléctrico durante el proceso de control usando varios valores de tiempo de muestreo. Las figuras V.16 y V.17 presentan la evolución del consumo eléctrico (CE en W) y del error cuadrático medio (ECM) registrados durante este proceso.

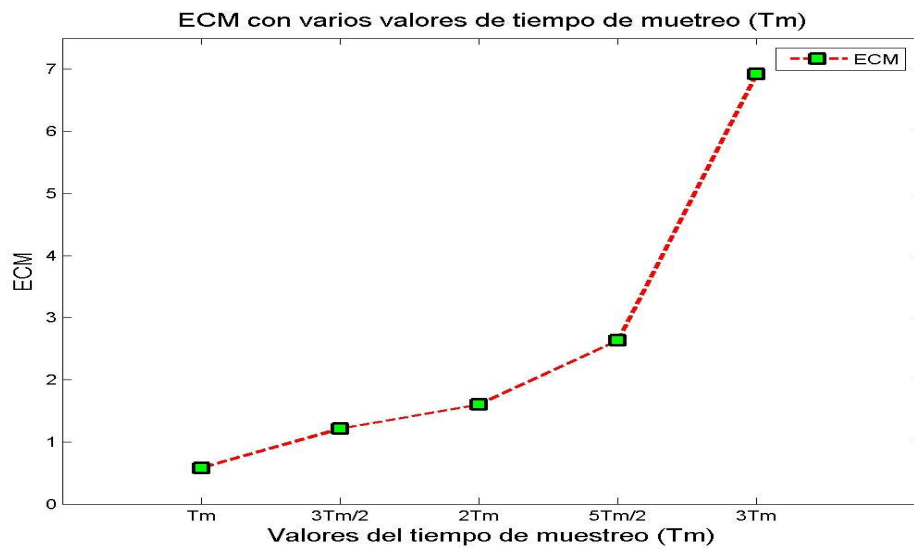


**Figura V.16:** Evolución del Consumo Eléctrico (CE en W) del proceso de control usando el controlador adaptativo II en función del tiempo de muestreo.

A partir de la figura V.16 se puede ver el importante ahorro energético obtenido al incrementar el tiempo de muestreo usado, ya que al usar valores grandes del tiempo de muestreo como por ejemplo ( $3 \cdot T_m$ ) podemos lograr un ahorro energético que supera los 50% del coste eléctrico normal del proceso de control. La modificación del tiempo de muestreo entrañó cambios sobre el consumo eléctrico, sin embargo dicha modificación tendrá efectos sobre la precisión del controlador. La figura V.17 presenta

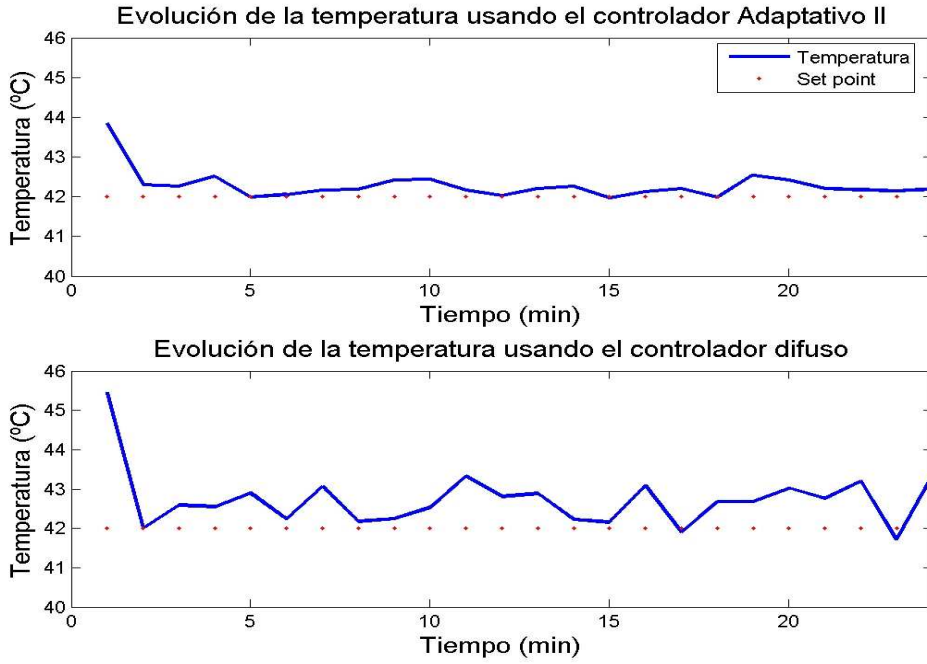


la evolución del ECM registrado durante el proceso de control al usar distintos valores de tiempo de muestreo.

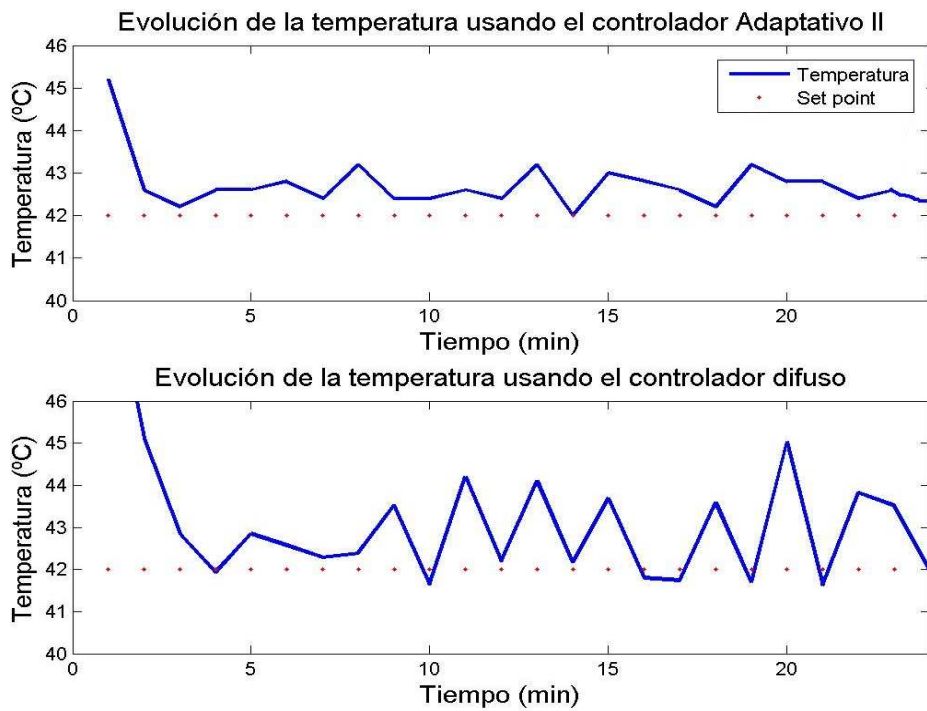


**Figura VI.17:** Evolución del Error Cuadrático Medio (ECM) del proceso de control usando el controlador adaptativo II en función del tiempo de muestreo.

A partir de la figura V.17 se puede ver que la modificación del tiempo de muestreo supone un aumento en el error cometido durante el proceso de control, ya que, cada vez que se aumenta el tiempo de muestreo se aumenta el error cometido durante el control. Sin embargo, perder la precisión del control no vendría bien para cualquier proceso de control, pero en este caso hay que ver hasta qué rango afecta la precisión cuando se aumenta el tiempo de muestreo. Las figuras V.18 y V.19 presentan la evolución del proceso de control durante 25 minutos usando los dos controladores que han mostrado mejores prestaciones (controlador adaptativo II y controlador difuso) entre todos los controladores usados para dos valores de tiempo de muestreo  $T_m = 3T_m/2$  y  $T_m = 2T_m$ .



**Figura V.18:** Evolución del proceso de control del controlador adaptativo II y el controlador difuso usando un tiempo de muestro  $T_m = 3T_m/2$ .



**Figura V.19:** Evolución del proceso de control del controlador adaptativo II y el controlador difuso usando un tiempo de muestro  $T_m = 2T_m$ .

Se puede notar fácilmente en las gráficas de las figuras V.18 y V.19, que la precisión del controlador adaptativo II es el que menos viene afectado al aumentar el tiempo de muestreo, ya que las oscilaciones que presenta el comportamiento del controlador difuso son más grandes. En las tablas V.3 y V.4 se representa el error cuadrático medio ECM y el consumo eléctrico CE registrados durante el proceso de control con distintos tiempo de muestreo para los dos controladores adaptativo II y controlador difuso respectivamente.

**Tabla V.3:** ECM y CE del **controlador adaptativo II** durante el proceso de control para distintos tiempo de muestreo.

	$T_m$	$3T_m/2$	$2T_m$	$5T_m/2$	$2T_m$
<b>ECM (<math>c^\circ</math>)<sup>2</sup></b>	0.58	1.21	1.6	2.63	6.92
<b>CE (W)</b>	644.33	460.6	343.36	282.7	276

**Tabla V.4:** ECM y CE del **controlador difuso** durante el proceso de control para distintos tiempo de muestreo.

	$T_m$	$3T_m/2$	$2T_m$	$5T_m/2$	$2T_m$
<b>ECM (<math>c^\circ</math>)<sup>2</sup></b>	1.07	1.94	2.9	3.47	8.12
<b>CE (W)</b>	814.26	724.3	570.9	392.3	312.7

Después de comparar las figuras (V.18, V.19) y a partir de los datos presentados en las tablas (V.3, V.4) se puede deducir de forma general que el aumento del tiempo de muestreo puede ofrecer un importante ahorro energético comparándolo con el tiempo de muestreo normal. Este ahorro tiene como consecuencia una disminución en la precisión del control, lo que no es muy deseado en todos los procesos de control, pero comparando el ECM registrado por el controlador adaptativo II y el del controlador difuso al usar un tiempo de muestreo  $T_m = \cdot T_m/2$  y  $T_m = 2T_m$ , se ve claramente que aunque el error del controlador adaptativo sufrió un aumento sigue teniendo un error tolerable ya que está casi igual que el error de un controlador difuso que antes demostró que era capaz de controlar bien la planta. De hecho, para aquellas plantas o procesos de control que no requieren un alto nivel de precisión podemos garantizar un ahorro energético muy importante al usar la metodología de adaptación propuesta en esta tesis con un tiempo de muestreo relativamente alto [Lasri, 12].

#### V.4.4. Efecto de las perturbaciones

Una de las características las más importantes de un buen controlador es la robustez y la capacidad de operar bajo nuevas condiciones imprevistas durante el proceso de control (dentro de un cierto rango). La metodología presentada en este trabajo y tras las buenas prestaciones que mostró a lo largo de todas las simulaciones realizadas, se enfrentará en esta sección a varios tipos de perturbaciones para destacar su comportamiento real en situaciones parecidas. Para ello, se pretende simular el efecto de la presencia de un segundo ventilador y/o una segunda fuente de temperatura que intervendrán de forma alternada en algún momento para causar una perturbación al sistema controlado.

Las figuras V.20 y V.21 presentan la evolución del proceso de control durante 80 minutos usando el controlador adaptativo y el controlador difuso respectivamente. En dicho proceso se procede a causar los dos tipos de perturbaciones usando un nuevo ventilador que puede generar el 25% de la potencia del ventilador principal y usando una nueva fuente de temperatura que puede causar una pérdida del 20% de la potencia del ventilador.

El comportamiento del controlador adaptativo frente varios tipos de perturbaciones

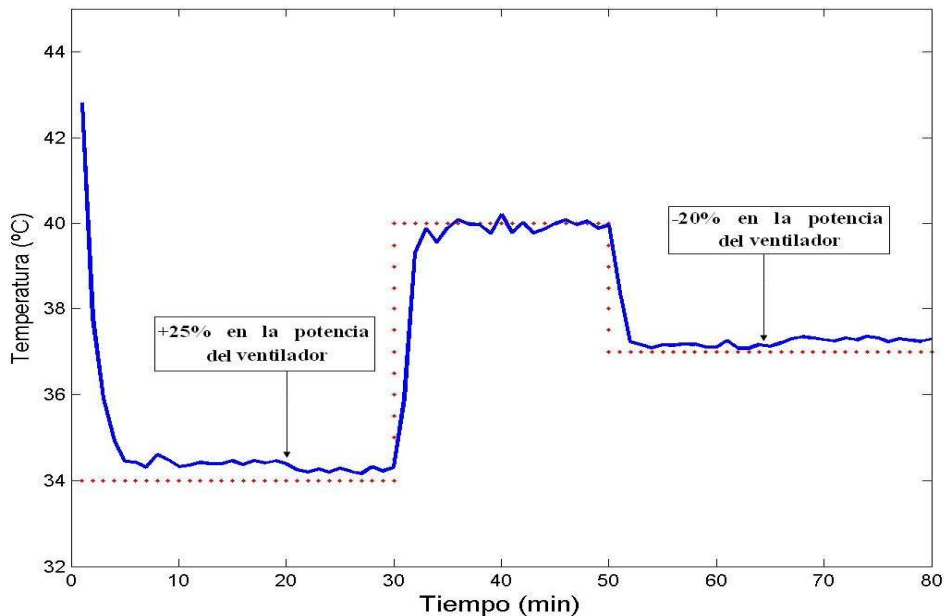
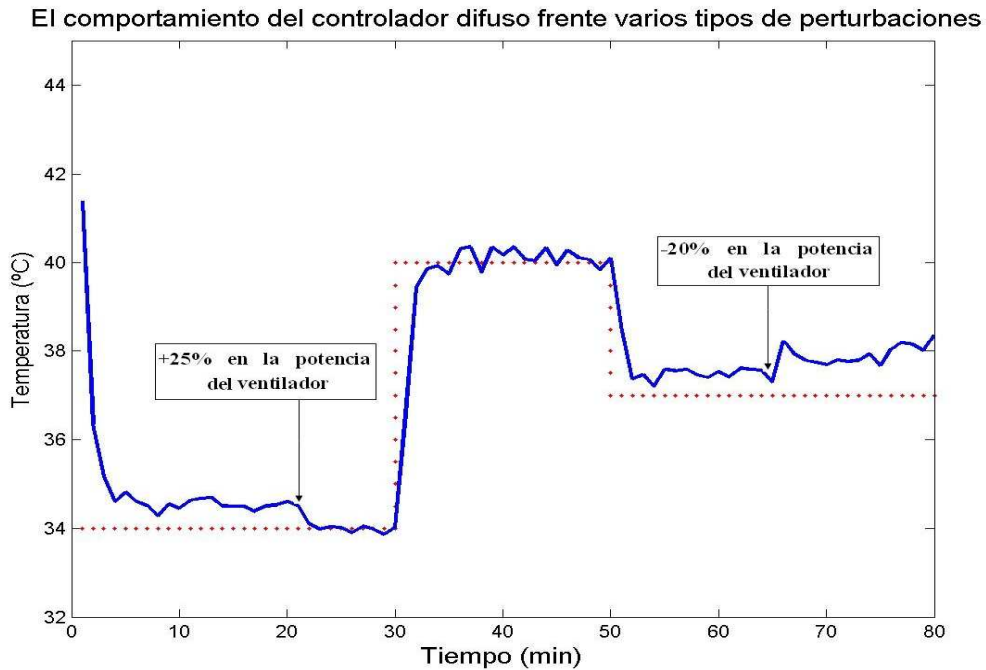


Figura V.20: Efecto de la perturbación sobre el proceso de control usando el controlador adaptativo.



**Figura V.21:** Efecto de la perturbación sobre el proceso de control usando el controlador difuso.

El comportamiento de los dos controladores (el adaptativo y el difuso) tras causar una perturbación puede aclarar la robustez de cada uno de ellos, ya que, en el minuto 20 hasta el minuto 30 se añade el segundo ventilador que dispone del 25% de la potencia del ventilador principal lo que afectó la precisión de los dos controladores. No obstante, el controlador adaptativo ha podido después de muy pocos instantes recuperar su precisión aunque no de forma total lo que no es el caso para el controlador difuso. Se debe notar aquí que la disminución del error que parece en el caso del controlador difuso tras la perturbación en el minuto 20 no es un mejoramiento en la precisión del control, sino es por culpa del nuevo ventilador (al usar un ventilador más potente el error cambiará de signo ya que el controlador ha perdido el control de la planta). En el minuto 65 se procede a causar la segunda perturbación que es la nueva fuente de temperatura que entraña una disminución del 20% de la potencia del ventilador principal. A partir de este momento el error de los dos controladores sufre un cambio sustancial. No obstante, el controlador adaptativo puede compensar el nuevo error y volver a operar con una precisión muy parecida a su precisión en condiciones normales, mientras que el controlador difuso no ha podido compensar el nuevo error causado por la nueva fuente de temperatura y por lo tanto presenta un control con grandes errores.

En la tabla V.5 se presenta el error cuadrático medio registrado por los dos controladores 10 minutos antes y después de causar las perturbaciones.

**Tabla V.5:** Error cuadrático medio 10 minutos antes y después de causar las perturbaciones para los dos controladores (Adaptativo y difuso).

<b>+25% en la potencia del ventilador principal</b>			<b>-20% en la potencia del ventilador principal</b>		
	Controlador difuso	Controlador adaptativo		Controlador difuso	Controlador adaptativo
ECM <sub>10</sub> hasta 20min	0.78	0.42	ECM <sub>55</sub> hasta 65min	0.64	0.1
ECM <sub>20</sub> hasta 30min	0.32	0.36	ECM <sub>65</sub> hasta 75min	1.77	0.14

En el caso del controlador adaptativo, se puede ver que la precisión sufrió un cambio muy ligero tras las perturbaciones lo que significa que el controlador adaptativo puede compensar las perturbaciones imprevistas, mientras que en el caso del controlador difuso, el error registrado después de causar las perturbaciones se ha cambiado mucho, ya que en el segundo caso el error paso de ser el doble del error normal y en el primer caso se ha reducido al más de 50%, tal como se ha aclarado previamente eso no se considera como mejoramiento en la precisión del control, sino es un defecto de control porque si se usa un ventilador más potente, ese error seguirá bajándose y cambiará de signo [Lasri, 11c].



# Capítulo VI

## “ANÁLISIS ESTADÍSTICO”

### *Resumen:*

Después de presentar los resultados e interpretarlos, se procede a probar la validez de los mismos en este capítulo. Mediante el uso de la técnica de análisis de la varianza (ANOVA), se puede destacar si las conclusiones obtenidas a partir de las simulaciones reales son estadísticamente significativas para todos los futuros experimentos o han sido producto del azar. Repitiendo el proceso de control cinco veces para cada controlador y usando dos conjuntos diferentes de puntos de referencia nos garantiza un adecuado conjunto de datos que será utilizado como una muestra para el análisis estadístico inferencial que podrá destacar la validez de los resultados de la metodología propuesta, que son en este caso las conclusiones obtenidas de las distintas comparaciones realizadas en el capítulo anterior.



## VI. ANÁLISIS INFERENCIAL

En este capítulo de la presente tesis, se pretende analizar y verificar la validez de los resultados obtenidos, tras realizar numerosas simulaciones, utilizando la técnica de análisis inferencial conocida como (ANOVA, del inglés *Analysis of Variance*) de un conjunto de resultados obtenidos de simulaciones reales.

ya que el análisis de la varianza (ANOVA) es una herramienta estadística de gran importancia y muy potente que puede ofrecer información muy valiosa, se está utilizando ampliamente tanto en la industria, para el control de procesos, como en los laboratorios de análisis, para el control de métodos analíticos. Unas de las principales aplicaciones de esta técnica son: la comparación de múltiples grupos de datos y la estimación de los componentes de la variación de un proceso.

En este trabajo, se pretenden analizar los resultados obtenidos durante todos los procesos de control realizados mediante el análisis de la varianza. En primer lugar se procede a analizar los resultados de la precisión de los controladores y de su consumo energético durante el proceso de control, luego se analizarán los resultados obtenidos bajo diferentes tipos de perturbaciones. El conjunto de muestreo utilizado en este análisis contiene dos conjuntos de puntos de referencia diferentes, todos los controladores antes diseñados e implementados controlarán la planta usando los dos conjuntos de puntos de referencia repitiendo cada simulación cinco veces. Los resultados obtenidos durante esas simulaciones se presentarán en varias tablas de forma detallada. Debido a la cantidad de simulaciones que hay que realizar, el tiempo de control se reduce en 40 minutos en vez de 200 minutos. La figura VI.1 muestra un ejemplo del proceso de control usando el controlador adaptativo con los dos diferentes conjuntos de puntos de referencia utilizados en este análisis.

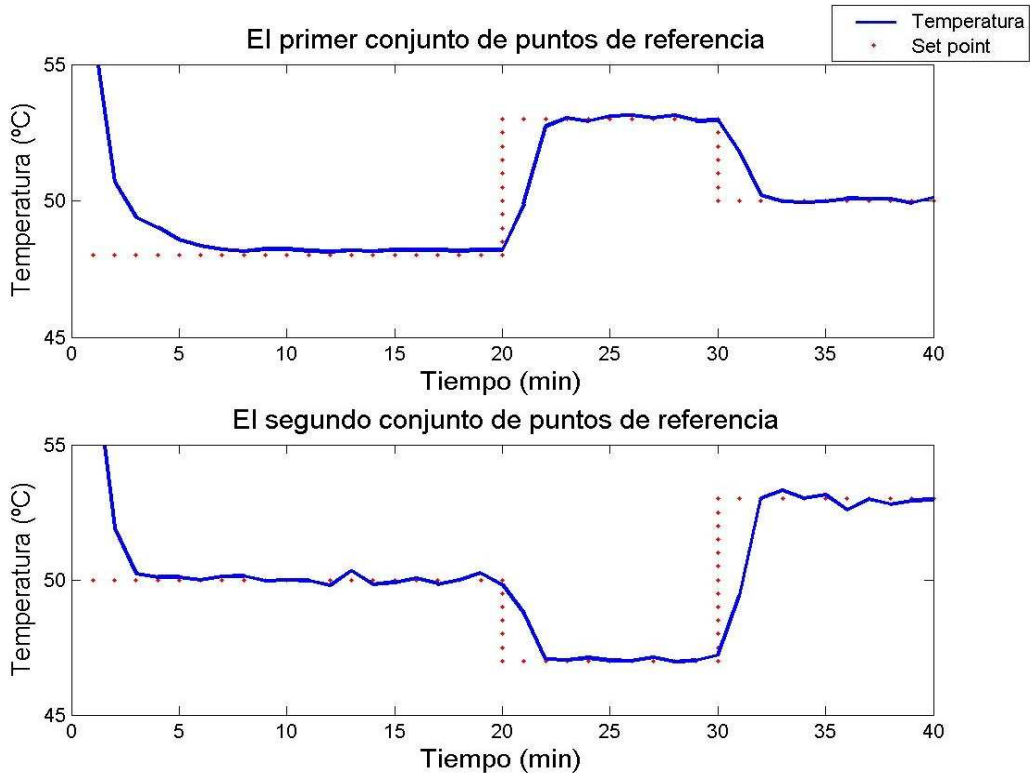


Figura VI.1: Evolución del control usando el controlador adaptativo para los dos conjuntos de puntos de referencia utilizados.

## VI.1. Enfoque teórico

La técnica de ANOVA para un solo factor es la generalización del análisis de 2 medias a partir de 2 muestras independientes al caso de  $k$  medias, cuando clasificamos cada uno de los datos de la variable dependiente estudiada según una de las  $k$  posibles modalidades, niveles o tratamientos de un factor.

Para el análisis de ANOVA se pretende realizar un test de hipótesis para contrastar la igualdad de las  $k$  medias, es decir, la independencia de la variable estudiada con el factor presentado. Por tanto:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$  (La variable estudiada no mantiene relación con el factor).

$H_1: i \neq j / \mu_i \neq \mu_j$  (La variable estudiada mantiene relación con el factor presentado).

Para ello se usa un estadístico denominado **estadístico F**, (porque sigue una distribución denominada  $\mathcal{F}$  de *Snedecor*) a partir de la descomposición de la variabilidad total del conjunto de los datos respecto a la media general en dos componentes principales son:

$$\begin{aligned}
 \text{SC}_{TOTAL} &= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (\text{VI.1}) \\
 &\quad \text{SC}_{TOTAL} \qquad \qquad \qquad \text{SC}_{EXPLICADA} \qquad \qquad \qquad \text{SC}_{RESIDUAL}
 \end{aligned}$$

**SC<sub>EXPLICADA</sub>**: Esta suma de cuadrados se interpreta como una posible relación de la variable estudiada con el factor presentado. Por otra parte, refleja la dispersión entre los grupos y en los casos donde se detecta una relación entre las variables, esta fuente de variación sería relativamente importante de la total.

**SC<sub>RESIDUAL</sub>**: Suma las varianzas que hay dentro de cada uno de los  $k$  grupos. A pesar de que todos los individuos del mismo grupo son homogéneos, se observa una dispersión dentro del mismo grupo.

El cálculo del estadístico  $F$  se hace mediante la construcción de la tabla conocida como ANOVA.

siendo  $n = n_1 + \dots + n_j + \dots + n_k$  y  $n - k = (n - 1) - (k - 1)$ , se construya la tabla ANOVA.

*Tabla VI.1:* Arquitectura básica de la tabla ANOVA.

<i>Fuente</i>	<i>SC</i>	<i>CM</i>	<i>Estadístico F</i>
Entre Grupos	SC <sub>EXPLICADA</sub>	CM = SC <sub>EXPLICADA</sub> / n - 1	$F = \text{CM}_{EXPLICADA} / \text{CM}_{RESIDUAL}$
Dentro Error	SC <sub>RESIDUAL</sub>	CM = SC <sub>RESIDUAL</sub> / n - k	
Total	SC <sub>TOTAL</sub>	CM = SC <sub>TOTAL</sub> / n - 1	

donde  $CM$  indica Cuadrados Medios y son estimaciones de la varianza según las distintas fuentes.

El estadístico  $F$  computa la importancia relativa de la varianza explicada frente a la residual, de modo que el grado de relación entre las variables en juego está en función de la magnitud de  $F$ .

El P-valor en esta prueba es el área que queda a la derecha del estadístico  $F$  de la distribución de *Snedecor*, de forma que cuanto mayor sea  $F$  menor será el P-valor.

## VI.2. Análisis de la varianza del error registrado (ECM) y del consumo eléctrico (CE)

Las dos tablas VI.2 y VI.3 recapitulan los resultados de todas las simulaciones realizadas usando dos conjuntos de puntos de referencia diferentes, cada proceso de control se ha repetido cinco veces utilizando todos los controladores previamente diseñados registrando el error cometido en cada simulación y el coste eléctrico durante todo el proceso de control.

		<i>El primer conjunto de puntos de referencia</i>					
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	$\Sigma / 5$
<i>PI</i>	ECM	1.62	1.09	1.56	1.36	1.7	<b>1.46</b>
	CE	1142	968.4	1159.9	1136.7	1158	<b>1113</b>
<i>PD</i>	ECM	1.07	1.07	1.5	1.12	1.45	<b>1.25</b>
	CE	1048.2	1022	1163.4	1024.3	1109.3	<b>1074</b>
<i>PID</i>	ECM	1.07	1.16	1.66	1.35	1.06	<b>1.26</b>
	CE	1121,1	1120.2	1151.9	1135.2	1133.1	<b>1132.3</b>
<i>FLC</i>	ECM	0.92	1.03	1.49	1.31	1.05	<b>1.12</b>
	CE	1159.3	1140.3	1130.9	1139.5	1108.7	<b>1135.7</b>
<i>Adapt FLC</i>	ECM	1.1	0.7	0.74	0.65	0.5	<b>0.74</b>
	CE	1084.4	1088.2	1084.3	932	1082.3	<b>1054.2</b>

*Tabla VI.2:* ECM y CE obtenidos en cinco simulaciones usando el primer conjunto de puntos de referencia para todos los controladores usados.

		<i>El segundo conjunto de puntos de referencia</i>					
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	$\Sigma / 5$
<i>PI</i>	ECM	1.22	1.28	1.35	1.7	1.65	<b>1.45</b>
	CE	1112	1108	1106	1092	1121.3	<b>1107.8</b>
<i>PD</i>	ECM	1.37	1.28	1.3	1.35	1.4	<b>1.35</b>
	CE	1092	1120,83	1133	1089	1079.9	<b>1103</b>
<i>PID</i>	ECM	1.34	1.27	1.26	1.32	1.26	<b>1.3</b>
	CE	1127.3	1102.04	1101.1	1179.3	1121.7	<b>1126.3</b>
<i>FLC</i>	ECM	1.47	1.08	1.11	1.33	1.3	<b>1.25</b>
	CE	1121	1098.2	1107.4	1115.2	1162.3	<b>1120.8</b>
<i>Adapt FLC</i>	ECM	1.1	1	0.83	0.78	0.84	<b>0.9</b>
	CE	1187	1121.3	1009.7	1013.8	987.5	<b>1063.8</b>

*Tabla VI.3:* ECM y CE obtenidos en cinco simulaciones usando el segundo conjunto de puntos de referencia para todos los controladores usados.

### VI.2.1. Análisis de la varianza (ANOVA) para el error del control

Usando el Error Cuadrático Medio (ECM) presentado para cada caso en las tablas VI.2 y VI.3 se puede realizar una tabla ANOVA para estudiar el error de control. Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para el ECM, la tabla VI.4 presenta los resultados.

*Tabla VI.4:* Análisis de la varianza para el ECM (Suma de Cuadrados Tipo III).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<i>A: Conj Pnt Ref</i>	0,069192	1	0,069192	1,98	0,1663
<i>B: CONTROL</i>	2,18831	4	0,547078	15,66	0,0000
<i>RESIDUOS</i>	1,53669	44	0,0349247		
<i>TOTAL (CORREGIDO)</i>	3,79419	49			

Todas las Razones -F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad del ECM en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los Valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que el Valor-P del efecto *B: CONTROL* es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el ECM con un 95.0% de nivel de confianza. Mientras que el efecto *A: Conj Pnt Ref* (que son los Conjuntos de puntos de referencia) tiene un valor-P superior a 0.05, y por tanto no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el ECM.

A este nivel de análisis, se puede decir que el efecto *B: CONTROL* tiene una repercusión relevante sobre el ECM mientras que el efecto *A: Conj Pnt Ref* no lo tiene. Aunque el valor de Valor-P es menor que 0.05, lo importante ahora es analizar si existen diferentes valores de conjuntos de puntos de referencia, o de controladores, que se comporten de forma similar, y por lo tanto, intentar obtener grupos homogéneos o heterogéneos de estos dos efectos o factores. Para ello vamos a proceder a realizar la prueba de Múltiples Rangos.

Con la realización de estas tablas de Múltiples Rangos, se realizan comparaciones múltiples para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. Las que sean homogéneas o similares desde el punto de vista estadístico, tienen una X en la misma columna, y por tanto se pueden considerar como un grupo homogéneo. Si

existen X en diversas columnas, significa que existen más de un grupo. Esto conlleva a que por tanto este factor sea estadísticamente significativo.

➤ **Tablas de Múltiples Rangos para el ECM:**

Para empezar, se procede a analizar las tablas Múltiple Rangos para el ECM por Conjuntos de puntos de referencia donde se pretende estudiar el efecto del factor A: *Conj Pnt Ref.*

Método: 95,0 % LSD

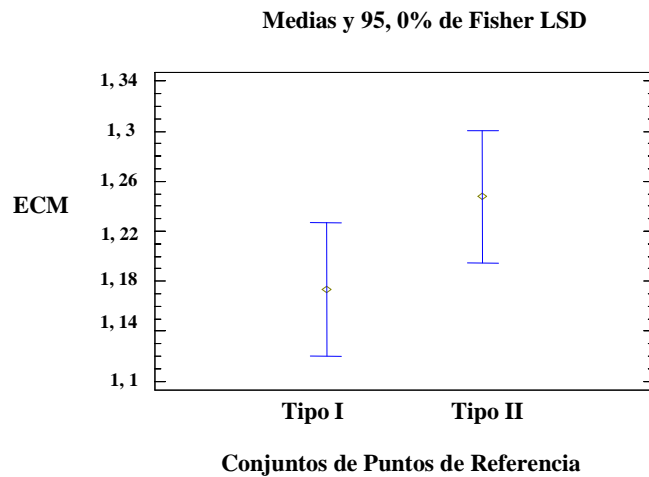
<i>Conj Pnt Ref</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Tipo I	25	1,1732	0,0373763	X
Tipo II	25	1,2476	0,0373763	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Tipo I- Tipo II		-0,0744	0,106529

\* indica una diferencia significativa.

Estas tablas aplican un procedimiento de comparación múltiple para determinar que medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

A partir de las tablas de Múltiple Rangos para el ECM por conjuntos de puntos de referencia, se puede ver que existe un solo grupo Homogéneo que se constituye de los dos tipos de conjuntos de puntos de referencia utilizados, así que, desde el punto de vista estadístico, y para la variable de salida ECM, estos dos tipos de conjuntos de puntos de referencia son equivalentes o de forma similar, tienen el mismo comportamiento. La figura VI.2 muestra claramente la diferencia marginal que existe entre los dos tipos.



**Figura VI.2:** Medias del ECM para los dos tipos de conjuntos.

Ya que, gráficamente también se puede ver como son las dos medias del ECM de los dos tipos de conjuntos de referencia.

Por consiguiente, se procede analizar el efecto *B: CONTROL*, siendo la tabla de Múltiples Rangos la siguiente:

Método: 95,0 % LSD

<i>CONTROL</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Adapt	10	0,824	0,0590971	X
FLC	10	1,209	0,0590971	X
PID	10	1,275	0,0590971	X
PD	10	1,291	0,0590971	XX
PI	10	1,453	0,0590971	X

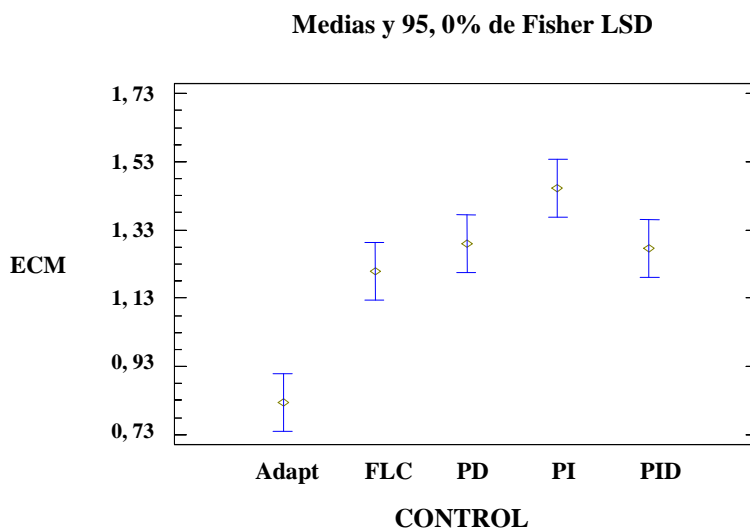
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Adapt - FLC	*	-0,385	0,168437
Adapt - PID	*	-0,451	0,168437
Adapt - PD	*	-0,467	0,168437
Adapt - PI	*	-0,629	0,168437
FLC - PID		-0,066	0,168437
FLC - PD		-0,082	0,168437
FLC - PI	*	-0,244	0,168437
PD - PID		0,016	0,168437
PI - PID	*	0,178	0,168437
PD - PI		-0,162	0,168437

\* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar que medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los seis pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado tres grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Realmente, lo que nos importa en esta tabla es reflejar el contraste que existe entre el controlador adaptativo (Adapt) y el resto de los controladores, de hecho, a partir de la tabla múltiple rango se puede deducir que el controlador adaptativo presenta el menor error (*Media LSD*). Por otra parte, el contraste entre el controlador adaptativo y el resto de los controladores en todos los casos presenta una diferencia estadísticamente significativa lo que ilustra la diferencia entre ellos.

De forma gráfica, esta tabla de Rangos Múltiples se puede visualizar de la forma siguiente:



*Figura VI.3:* Medias del ECM para todos los controladores usados.



Es evidente que el controlador adaptativo tiene la mejor media del ECM mientras que el resto de los controladores presentan mayores niveles de error.

## VII.2.2. Análisis de la varianza (ANOVA) para el Consumo Eléctrico

Siempre a partir de las tablas VI.2 y VI.3 se utiliza el Consumo Eléctrico (CE) presentado para cada caso para realizar una tabla ANOVA e interpretarla. Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para el CE, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla.

*Tabla VI.5:* Análisis de la varianza para el CE (Suma de Cuadrados Tipo III).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<i>A: Conj Pnt Ref</i>	85,2035	1	85,2035	0,04	0,8504
<i>B: CONTROL</i>	35365,0	4	8841,24	3,74	<b>0,0106</b>
<i>RESIDUOS</i>	104108,	44	2366,09		
<i>TOTAL (CORREGIDO)</i>	139558,	49			

Todas las Razones –F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad del CE (Consumo Eléctrico) en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los Valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que el Valor-P del efecto *B: CONTROL* es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el CE con un 95.0% de nivel de confianza. Mientras que el efecto *A: Conj Pnt Ref* (que son los Conjuntos de puntos de referencia) tiene un valor-P superior a 0.05, y por tanto no estadísticamente significativo sobre el CE.

De hecho, se puede decir que el efecto *B: CONTROL* tiene una repercusión relevante sobre el CE mientras que el efecto *A: Conj Pnt Ref* no lo tiene. Aunque el valor de Valor-P es menor que 0.05, lo importante ahora es analizar si existen diferentes valores conjuntos de puntos de referencia, o de controladores, que se comporten de forma similar, y por lo tanto, intentar obtener grupos homogéneos o heterogéneos de estos dos efectos o factores. Para ello vamos a proceder a realizar la prueba de múltiples rangos.

Con la realización de estas tablas de Múltiples Rangos, se realizan comparaciones múltiples para determinar que medias son significativamente diferentes de otras. Las que sean homogéneas o similares desde el punto de vista estadístico, tienen una X en la misma columna, y por tanto se pueden considerar como un grupo homogéneo. Si existen X en diversas columnas, significa que existe más de un grupo, por tanto ese factor será estadísticamente significativo.

➤ **Tablas de Múltiples Rangos para el CE (Consumo Eléctrico):**

Para empezar, se procede a realizar las tablas de Múltiples Rangos del efecto A: *Conj Pnt Ref* sobre la variable CE.

Método: 95,0 % LSD

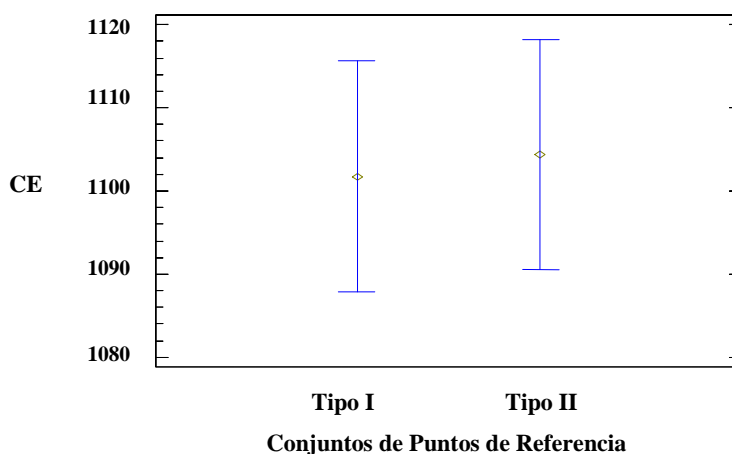
<i>Conj Pnt Ref</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Tipo I	25	1101,74	9,72849	X
Tipo II	25	1104,35	9,72849	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Tipo I – Tipo II		-2,6108	27,7278

\* indica una diferencia significativa.

Se puede observar a partir de estas tablas que el efecto A: *Conj Pnt Ref* (Conjuntos de puntos de referencia) forma un grupo Homogéneo y por tanto no tiene efecto estadísticamente significativo sobre la variable CE, ya que los dos tipos I y II presentan un comportamiento similar. La visualización de la media de los dos tipos aclarará más esa conclusión porque la diferencia entre ellos está marginal (Figura VI.4).

**Medias y 95,0% de Fisher LSD**



**Figura VI.4:** Medias del CE en W para los dos tipos de conjuntos.

A continuación, se analizará el efecto de *B: CONTROL* sobre la variable CE siendo las tablas de Múltiples Rangos:

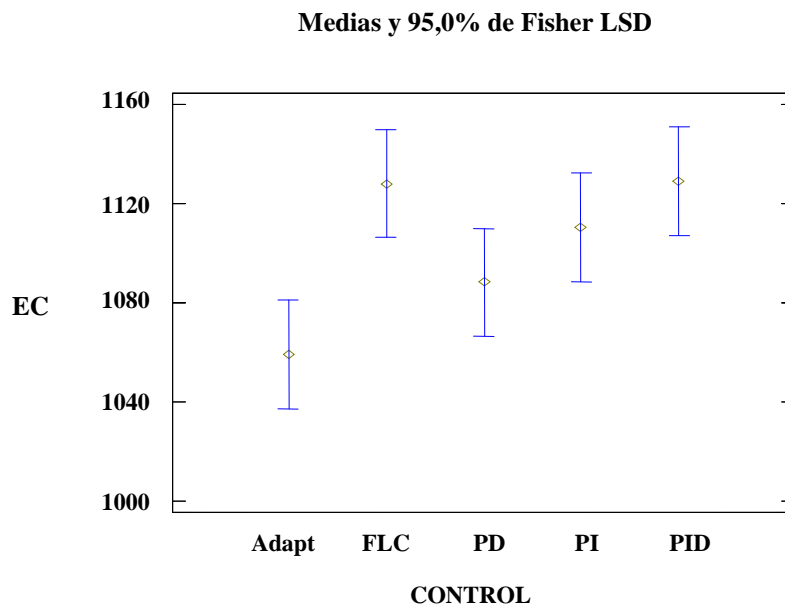
Método: 95,0 % LSD

<i>CONTROL</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Adapt	10	1059,05	15,3821	X
PD	10	1088,19	15,3821	XX
PI	10	1110,43	15,3821	X
FLC	10	1128,28	15,3821	X
PID	10	1129,29	15,3821	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Adapt- FLC	*	-69,23	43,8415
Adapt - PD		-29,143	43,8415
Adapt - PI	*	-51,38	43,8415
Adapt - PID	*	-70,244	43,8415
FLC - PD		40,087	43,8415
FLC - PI		17,85	43,8415
FLC - PID		-1,014	43,8415
PD - PI		-22,237	43,8415
PD - PID		-41,101	43,8415
PI - PID		-18,864	43,8415

\* indica una diferencia significativa.

A partir de las tablas se puede ver que el controlador adaptativo (Adapt) es el que presenta la menor media de CE, además el contraste reflejado entre el controlador adaptativo y el resto de los controladores indica la existencia de una diferencia estadísticamente significativa menos el caso del controlador PD que presentó un comportamiento casi similar al del controlador adaptativo, la visualización de estos resultados reflejará claramente esa diferencia incluso para el caso del controlador PD.



*Figura VI.5:* Medias del CE en W para todos los controladores usados.

En la figura VI.5 se puede ver qué clase de diferencia existe entre todos los controladores usados, es evidente que el controlador adaptativo tiene el consumo eléctrico más bajo entre todos los demás aunque el controlador PD presentó un consumo menor que el resto pero sigue sin llegar al rendimiento del controlador adaptativo.

### **VII.3. Análisis de la varianza del error registrado (ECM) del proceso de control bajo perturbaciones**

Utilizando la misma estrategia que en la sección anterior, con dos conjuntos de puntos de referencia y repitiendo cada simulación cinco veces se procede a analizar la varianza del error registrado al causar las dos perturbaciones presentadas previamente ampliando el grado de perturbación para los dos casos. Usando los dos controladores principales (controlador adaptativo difuso y el controlador difuso estático FLC, del inglés *Fuzzy Logic Controller*) se pretende destacar el comportamiento de cada uno de ellos en el proceso de control con diferentes grados de perturbaciones.

Las tablas VI.6 y VI.7 recapitulan el Error Cuadrático Medio registrado en cada simulación con distintos grados de perturbación para los dos controladores (Adapt y FLC) usando los dos conjuntos de puntos de referencia presentados previamente.

Perturbación		<i>El primer conjunto de puntos de referencia</i>					
		ECM1	ECM 2	ECM 3	ECM 4	ECM 5	$\Sigma$ ECM / 5
<b>+30%</b>	Adapt	1.02	0.82	0.75	0.66	0.75	<b>0.8</b>
	FLC	1.24	1.04	1.4	1.3	1.1	<b>1.21</b>
<b>+15%</b>	Adapt	1.18	1.03	0.78	0.93	0.78	<b>0.94</b>
	FLC	1.2	1.16	1.1	1.23	1.28	<b>1.2</b>
<b>-15%</b>	Adapt	0,92	0.91	0.97	0.94	0.9	<b>0.92</b>
	FLC	1,3	1.16	1.2	1.17	1.5	<b>1.26</b>
<b>-30%</b>	Adapt	1.01	0.96	0.91	0.87	0.84	<b>0.91</b>
	FLC	3.76	2.96	3.72	3.88	2.7	<b>3.4</b>

**Tabla VI.6:** ECM obtenido en cinco simulaciones usando el primer conjunto de puntos de referencia bajo dos tipos de perturbaciones con diferentes grados.

Perturbación		<i>El segundo conjunto de puntos de referencia</i>					
		ECM1	ECM 2	ECM 3	ECM 4	ECM 5	$\Sigma$ ECM / 5
<b>+30%</b>	Adapt	1.34	1.03	0.82	1.02	0.8	<b>1</b>
	FLC	1.56	1.47	1.5	1.55	1.85	<b>1.6</b>
<b>+15%</b>	Adapt	0.95	0.93	0.95	0.92	0.81	<b>0.91</b>
	FLC	1.13	1.28	1.36	1.37	1.41	<b>1.31</b>
<b>-15%</b>	Adapt	1.05	1.07	1.07	0.95	0.98	<b>1</b>
	FLC	1.1	1.14	1.27	1.58	1.86	<b>1.4</b>
<b>-30%</b>	Adapt	1.01	0.89	1.07	0.9	0.94	<b>0.96</b>
	FLC	1.84	1.9	1.66	1.7	1.26	<b>1.7</b>

**Tabla VI.7:** ECM obtenido en cinco simulaciones usando el segundo conjunto de puntos de referencia bajo dos tipos de perturbaciones con diferentes grados.

Después de establecer los datos reales que servirán como muestra del estudio estadístico que se pretende realizar se procede a construir la tabla ANOVA para este caso, de forma analógica a los casos anteriores, primero se precisan los principales efectos que podrán tener alguna influencia sobre la variable estudiada, que es en este caso el ECM, se puede notar que en este caso también se dispone de los dos principales efectos que habían en el caso anterior *A: Conj Pnt Ref* (dos conjuntos de puntos de referencia diferentes) y *B: CONTROL*, aquí el efecto *CONTROL* a diferencia del caso anterior solo dispone de dos controladores (Adapt y FLC), mientras se observa la presencia del nuevo efecto que es la perturbación *C:PERT*. Estadísticamente, se puede detallar este último en diversos efectos secundarios, ya que se puede estudiar el efecto de cada grado de perturbación además de estudiar el efecto del tipo de la perturbación pero en realidad estudiar dichos efectos no será de gran utilidad en este caso porque lo

que más importa en este análisis es precisar el rendimiento de los controladores frente a distintos tipos y niveles de perturbaciones de forma global. De hecho, en la tabla VI.8 se presenta la tabla ANOVA de este caso.

**Tabla VI.8:** Análisis de Varianza para ECM (Suma de Cuadrados Tipo III).

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<i>A: Conj Pnt Ref</i>	0,20402	1	0,20402	0,95	0,3341
<i>B: CONTROL</i>	9,63272	1	9,63272	44,63	0,0000
<i>C: PERT</i>	5,60313	3	1,86771	8,65	0,0001
<i>RESIDUOS</i>	15,9709	74	0,215823		
<i>TOTAL (CORREGIDO)</i>	31,4108	79			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad del ECM en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los Valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que el Valor-P de los dos efectos *B: CONTROL* y *C: PERT* son menores que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el ECM con un 95.0% de nivel de confianza. Mientras que el efecto *A: Conj Pnt Ref* (que son los Conjuntos de puntos de referencia) tiene un valor-P superior a 0.05, y por tanto no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el ECM.

A partir del análisis de la variabilidad del ECM en contribuciones de los principales factores se puede deducir que el tipo del controlador (efecto *B: CONTROL*) y la perturbación (efecto *C: PERT*) son los dos efectos que influyen en el ECM, ya que al igual que en los casos anteriores, el tipo del conjunto de puntos de referencia (efecto *A: Conj Pnt Ref*) no influye sobre el ECM del proceso de control. Queda pendiente ahora analizar si existen diferentes valores conjuntos de puntos de referencia, o de controladores, o de perturbación que se comporten de forma similar, y por lo tanto, intentar obtener grupos homogéneos o heterogéneos de estos tres efectos o factores. Para ello vamos a proceder a realizar la prueba de múltiples rangos.

Recordemos que con la realización de estas tablas de Múltiples Rangos, se realizan comparaciones múltiples para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. Las que sean homogéneas o similares desde el punto de vista

estadístico, tienen una X en la misma columna, y por tanto se pueden considerar como un grupo homogéneo. Si existen X en diversas columnas, significa que existen más de un grupo. Esto conlleva a que por tanto este factor sea estadísticamente significativo.

➤ **Tablas de Múltiples Rangos para el ECM:**

Primero, se procede a realizar las tablas Múltiples Rangos del efecto A: *Conj Pnt Ref* sobre la variable ECM.

Método: 95,0 % LSD

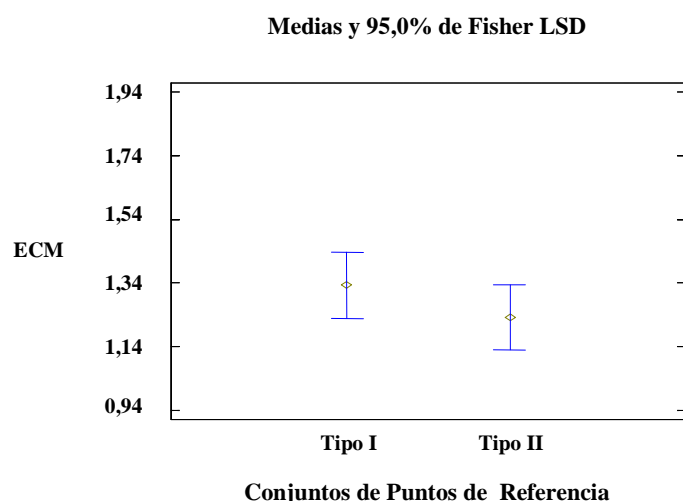
<i>Conj Pnt Ref</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Tipo I	40	1,23225	0,0734546	X
Tipo II	40	1,33325	0,0734546	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Tipo I – Tipo II		0,101	0,206987

\* indica una diferencia significativa.

Estas tablas aplican un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

A partir de las tablas de Múltiple Rangos para el ECM por conjuntos de puntos de referencia, se puede ver que existe un único grupo *Homogéneo* que se constituye de los dos tipos de conjuntos de puntos de referencia utilizados, así que, desde el punto de vista estadístico, y para la variable de salida ECM, estos dos tipos de conjuntos de puntos de referencia son equivalentes o de forma similar, tienen el mismo comportamiento. La figura VI.6 muestra claramente la diferencia marginal que existe entre los dos tipos.



*Figura VI.6:* Medias del ECM para los dos tipos de conjuntos.

Seguidamente, se presentan las tablas de Múltiples Rangos del efecto *B: CONTROL* sobre la variable ECM.

Método: 95,0 % LSD

<i>CONTROL</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Adapt	40	0,93575	0,0734546	X
FLC	40	1,62975	0,0734546	X

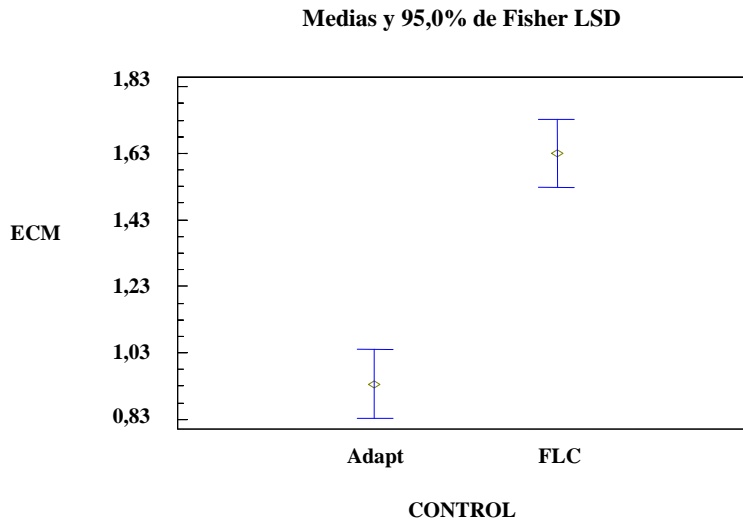
<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Adapt - FLC	*	-0,694	0,206987

\* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco junto a un par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado dos grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.



Por otro lado, se puede ver que el controlador adaptativo (Adapt) es el que presenta el mejor error bajo perturbación, de hecho, el contraste entre este último y el controlador difuso estático (FLC) generó una diferencia estadísticamente significativa. En la figura VI.7 se puede apreciar la diferencia entre los dos controladores.



*Figura VI.7:* Medias del ECM para los dos controladores usados.

Por último, tal como se ha dicho previamente, la presentación de las tablas Múltiples Rangos del efecto *C*: *PERT* no será de gran utilidad para este estudio, ya que descomponer este efecto y estudiar el contraste que existe entre los diferentes grados de perturbación no reflejará informaciones valiosas para el tipo de comparación cualitativa que se pretende obtener.

#### **VI.4. Conclusión**

Las principales conclusiones que obtenerse a partir del análisis estadístico residen en la influencia de los factores presentados sobre las variables principales, que fueron objeto de varios procesos de comparaciones cualitativas y cuantitativas, como el Error Cuadrático Medio (ECM) registrado durante los procesos de control y el Consumo Energético (CE) durante los procesos de control.

Como consecuencia de este análisis, se ha identificado cuáles son los efectos que realmente influyen sobre los dos principales criterios del proceso de control adoptados en esta tesis. Mediante la descomposición de la variabilidad de la tabla ANOVA y mediante el análisis de las tablas Múltiples Rangos para las dos variables en distintas condiciones y circunstancias de control es evidente que el ECM y el CE no se alteran

por el cambio de los puntos de referencia pero sí que pueden sufrir cambios debido a la naturaleza del controlador usado. Por otro lado, los resultados obtenidos ilustran la superioridad de la metodología de adaptación propuesta en esta tesis, las diferencias destacadas del (ECM) y (CE) durante el análisis estadístico entre el controlador adaptativo y el resto de los controladores en condiciones normales de control o bajo diferentes tipos y niveles de perturbación aprueban dicha superioridad.



# Capítulo VII

## “CONCLUSIONES Y LISTA DE PUBLICACIONES”

### *Resumen:*

Este capítulo resume las principales aportaciones y conclusiones extraídas del trabajo presentado en esta tesis doctoral. El capítulo presenta también las publicaciones realizadas durante la elaboración del presente trabajo de investigación.

## **VII. CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJOS PUBLICADOS**

Los resultados obtenidos durante la elaboración de esta tesis presentan una contribución a los procesos de control en tiempo real. Se puede resumir las principales características que presenta esta metodología en los puntos siguientes:

- ✓ La única información necesaria para que el controlador adaptativo empiece a controlar una planta es un conocimiento cualitativo sobre la planta (retardo y el signo de la monotonía) se puede iniciar el proceso de control garantizando la convergencia de la variable controlada hacia el punto de referencia, es decir, la estrategia propuesta no requiere un modelo de la planta ni sus ecuaciones diferenciales.
- ✓ Ausencia de cualquier tipo de conocimiento previo sobre la política de control. Tal como se ha mencionado antes, el controlador puede empezar a funcionar sin entrenamiento offline y con reglas asignadas a cero, el auto-aprendizaje y el auto-ajuste se hace en tiempo real, mientras controla la planta.
- ✓ El controlador adaptativo presenta un alto nivel de robustez frente a cualquier tipo de perturbación ya que su capacidad de adaptación le permite entender y aprender cómo reaccionar en situaciones imprevistas en tiempo real satisfactoriamente.

En esta sección se enumeran los principales aportes novedosos y las conclusiones obtenidas del trabajo realizado.

### **VII.1. Conclusiones y aportaciones**

1. Durante el trabajo de investigación desarrollado, se ha propuesto una nueva metodología para el diseño de un controlador adaptativo difuso que dispone de un alto nivel de independencia, es decir, sin necesidad del modelo matemático de la planta a controlar y sin entrenamiento previo el controlador adaptativo puede empezar el control de la planta con una base de reglas aleatoria o incluso vacía.
2. Se requiere una información muy limitada de la planta, tan solo el signo de la monotonía de la planta y su retardo.
3. Operando en tiempo real, dicha metodología permite al controlador adaptativo diseñado aprender en tiempo real el comportamiento de la evolución de la planta en función del tiempo. El resultado de este auto-aprendizaje no es más que un

conjunto de decisiones y medidas tomadas por el controlador mismo para exigir al sistema la consigna adecuada que puede acercar la variable controlada lo máximo posible al punto de referencia requerido.

4. Siempre en tiempo real, las consecuencias del auto-aprendizaje se ejecutan mediante dos etapas, en la primera etapa, el controlador evalúa el estado de la planta y exige una corrección en modo de premio/castigo a las reglas responsable del deficiente estado de la planta, de esta forma, los consecuentes de las reglas se adaptarán poco a poco hasta obtener un cierto nivel de estabilización. En la segunda etapa y después de adaptar adecuadamente los consecuentes de las reglas se procede a optimizar los antecedentes de las reglas, este proceso se hace mediante la redistribución de las funciones de pertenencia de las entradas para tener un espacio equilibrado en tema de contribución del error registrado ya que no todas las zonas del espacio de las entradas sufren la misma contribución lo que entrena un desequilibrio.
5. El controlado diseñado usando la metodología propuesta en este trabajo ha sido probado en un proceso de control de temperatura en tiempo real, los resultados obtenidos durante numerosas simulaciones han sido comparados con los resultados obtenidos mediante otros controladores convencionales. En todas las simulaciones y en todos los procesos de comparaciones cualitativas y cuantitativas, el controlador propuesto ha demostrado su superioridad frente al resto de los controladores.
6. La superioridad de la nueva metodología propuesta fue reforzada con un análisis inferencial, que a su turno aprobó la validez de todas las conclusiones anteriormente obtenidas, mediante una herramienta estadística, el análisis de la varianza (ANOVA).
7. Por último, se debe enfocar sobre la aportación que se considera como un punto muy atractivo en esta metodología, incluso, más de la notable reducción del error registrado en los procesos de control, es su capacidad de llevar el proceso de control con alto rendimiento y bajo consumo eléctrico. Sin embargo, existen distintas metodologías de control que pueden garantizar una buena reducción del error cometido, no obstante, muy pocos trabajos que figuran en la literatura que han intentado presentar modelos de controladores que pueden garantizar este importante criterio de ahorro energético.

## VII.2. Trabajos publicados

En esta sección se presentan los trabajos publicados y en proceso de publicación que se han realizado durante la elaboración de la presente tesis doctoral.

1. **Lasri R.**, Rojas I., Pomares H., Sadouq Z., (2011) “Explaining how intelligent control has improved the way we live: A survey on the use of Fuzzy Logic Controllers in daily human life,” In *Proc. 2011 IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, On page (s): 1-6, Volume: Issue: 7-9 April 2011.
2. **Lasri R.**, Rojas I., Pomares H., (2011) “Fuzzy Logic Controllers Improves Human Daily Life. The State-Of-The Art (Best Accuracy & More Flexibility),” *International Journal of Computer Applications*, 23(9):1–9, June 2011.
3. **Lasri R.**, Rojas I., Pomares H., Rojas F., (2011) “A New Methodology for Adaptive Fuzzy Controller. Comparison Performance Against Several Control Algorithms in a Real Time Control Process,” In *International Conference on Fuzzy Computation Theory and Applications (FCTA 2011)*, SciTePress – Science and Technology Publications, París, France. pp. 470-474.
4. **Lasri R.**, Rojas I., Pomares H., (2012) “A Novel Policy to Reduce the Electrical Cost of a Real Time Control Process Using an On-Line Adaptive Fuzzy Logic Controller,” *2012 IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*. Aceptado.
5. **Lasri R.**, Rojas I., Pomares H., Valenzuela O., (2012) “Innovative Strategy to Improve Precision and to Save Power of a Real Time Control Process Using an On-Line Adaptive Fuzzy Logic Controller,” *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, En proceso de publicación.
6. **Lasri R.**, Rojas I., Pomares H., Valenzuela O., (2012) “A New Adaptive Fuzzy Policy to Reduce the Electrical Cost and to Improve Performance of a Real Time Control Process,” *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, En proceso de publicación.

# Apéndice A

## PLANTAS CON RETARDOS SUPERIORES AL PERIODO DE MUESTREO

### A.1 Demostración de la expresión V.11

Un caso especial de sistemas son aquéllos en los que la salida en el instante  $k+1$  no depende de la entrada de control en el instante anterior sino que sufren un retardo de  $d$  muestras. En estos casos, la ecuación en diferencias del sistema vendrá dado por:

$$y(k) = f'(y(k-1), \dots, y(k-p'), u(k-d), \dots, u(k-d-q')) \quad (A-1)$$

donde queda patente la independencia de la salida con las últimas  $d$  entradas de control. Si hacemos el cambio de índice  $k \rightarrow k+d$  tendremos:

$$y(k+d) = f'(y(k+d-1), \dots, y(k+d-p'), u(k), \dots, u(k-q')) \quad (A-2)$$

Si intentamos despejar de aquí la señal de control en el instante actual  $k$ , haciendo  $y(k+d) = r(k)$ , tendríamos:

$$u(k) = F'(r(k), y(k+d-1), \dots, y(k+d-p'), u(k-1), \dots, u(k-q'))$$

y, aparentemente, no podríamos obtener nunca la entrada de control óptima al existir una ley de control no causal, ya que necesitaríamos conocer las  $d-1$  salidas siguientes del sistema  $y(k+1), \dots, y(k+d-1)$ .

Sin embargo, este razonamiento es engañoso ya que, por el mismo motivo por el que la salida  $y(k)$  no depende de  $u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-d+1)$  las salidas anteriores tampoco dependerán de sus respectivas señales de control anteriores. De esta forma, la salida en el instante  $k-1$ ,  $y(k-1)$ , ya vendrá predeterminada una vez que se haya introducido en el sistema la entrada  $u(k-d-1)$  por lo que no es necesario tener que esperar al instante  $k-1$  para obtener alguna información nueva. Para comprobar esto matemáticamente, de la ecuación (A-2) haciendo  $k \rightarrow k-1$  tendremos:

$$y(k+d-1) = f'(y(k+d-2), \dots, y(k+d-p'-1), u(k-1), \dots, u(k-q'-1))$$



por lo que dicha ecuación quedaría:

$$y(k+d) = f(f(y(k+d-2), \dots, y(k+d-p'-1), u(k-1), \dots, u(k-q'-1)), y(k+d-2), \dots, y(k+d-p'), u(k), \dots, u(k-q'))$$

que pasaría a tener la forma:

$$y(k+d) = f''(y(k+d-2), \dots, y(k+d-p''), u(k), \dots, u(k-q''))$$

con  $p'' = p'+1$  y  $q'' = q'+1$ . Igualmente, podríamos hacer lo mismo con  $y(k+d-2)$ ,  $y(k+d-3)$ , etc. hasta llegar a  $y(k+1)$ . Finalmente, llegaríamos a obtener la expresión:

$$y(k+d) = f(y(k), \dots, y(k-p), u(k), \dots, u(k-q)) \quad (A-3)$$

con  $p = p'+d-1$  y  $q = q'+d-1$ .

De esta forma, comprobamos que sí es posible también en estos casos establecer una ley de control causal ya que, igualando  $y(k+d) = r(k)$ , despejando de la expresión (A-3) y llamando  $F$  a la función inversa tendríamos que:

$$u(k) = F(r(k), y(k), \dots, y(k-p), u(k-1), \dots, u(k-q))$$

y ya sí que conocemos todas esas entradas en el instante  $k$ .

# Bibliografía

- [Alex, 07] G. Alexander Perry, Guang Feng, Yan-Fei Liu, Paresh C. Sen, "A Design Method for PI-like Fuzzy Logic Controllers for DC-DC Converter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Vol. 54, Issue. 5, pp. 2688- 2696, 2007.
- [Ast, 07] L. Astudillo, O. Castillo, P. Melin, A. Alanis, J. Soria, Luis T. Aguilar, "Intelligent Control of an Autonomous Mobile Robot using Type-2 Fuzzy Logic." *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Vol. 223-2008, pp. 203-212, 2007.
- [Aiss, 07] Abd.Gh. Aissaoui, M. Abid, H. Abid, A. Tahour, Abd.ka. Zebalah, "A Fuzzy Logic Controller For Synchronous Machine." *Journal of Electrical Engineering*. Vol. 58, Issue. 5, pp. 285-290, 2007.
- [Åström, 06] Karl J. Åström, Tore Hägglund, "Advanced PID Control," ISBN 1-55617-942-1, pp. 461, ISA, 2006.
- [Åström, 95] K. J. Åström and T. Hägglund, "PID Controllers: Theory, Design and Tuning," Instrument Society of America, 1995.
- [Albert, 05] W. L. Albert, Yao, S.C. Chi, C.K. Chen. "Development of an Integrated Grey-Fuzzy-Based Electricity Management System for Enterprises". *Energy*, Vol. 30, Issue. 15, pp. 2759-2771, 2005.
- [Alex, 05] G. Alexander Perry, G. Feng, Yan-Fei Liu, P.C. Sen. "A New Analysis and Design Method for Fuzzy Logic Controllers Used in Power Converters," *Industrial Electronics Society*, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE.
- [Ange, 02] P. Angelov, R. Buswell, "Identification of Evolving Fuzzy Rule-Based Models," *IEEE Trans. Fuzzy Syst*, Vol. 10, Issue. 5, pp. 667-677, 2002.
- [Abbod, 98] MF. Abbod, DA. Linkens, "Anaesthesia Monitoring and Control Using Fuzzy Logic Fusion," *Journal of Biomedical Engineering - Applications, Basis & Communications, Special Issues on Control Methods in Anaesthesia*, Taiwan, 1998.
- [And, 97] H. C. Andersen, A. Lotfi, A.C. Tsoi, "A New Approach to Adaptive Fuzzy Control: The Controller Output Error Method," *IEEE Trans. Syst. Man and Cyber.- Part B*, vol. 27, no. 4, pp. 686-691, 1997.
- [Antsa, 99] P. J. Antsaklis, "Intelligent Control," *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley & Sons, Inc. Vol. 10, pp. 493-503, 1999.
- [Antsa, 94] P. J. Antsaklis, "Defining Intelligent Control," report of the task force on intelligent control. *IEEE Control Syst. Mag.*, Vol. 4-5, pp. 56-58, 1994.
- [Bai, 10] Ying-Wen. Bai, Cuing-Hung. Cheng, "Using an Embedded Controller with Fuzzy Logic to Reduce Power Consumption of Mobile Computers," 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON, pp. 236, 2010.
- [Basnet, 09] S. Basnet, N. Venkatraman, "A Novel Fuzzy-Logic Controller for an Artificial Heart," 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg, Russia, July 8-10, 2009.

- [Boronic,02] Jess S. Boronico, R. Yerman, "Integration of Fuzzy Logic Control into Continuous Passive Motion achiness," *The Journal of Applied Business Research*, Vol. 18, no. 4, 2002.
- [Broe, 04] E. V. Broekhoven, B. D. Baets, "A Comparison of Three Methods for Computing the Centre of Gravity Defuzzification," *Proceedings. 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 1537-1542, 2004.
- [Botz, 04] J. Botzheim, C. Cabrita, L. T. Keôzy, A. E. Ruano, "Estimating Membership Functions Parameters by the Levenberg-Marquardt Algorithm," *Proceedings. 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 1666-1672, 2004.
- [Bouj, 00] A. Boujahia, "Commande floue et neuro-floue appliquées à un robot manipulateur," *Thèse de Magister en Automatique, EMP Alger, juillet 2000.*
- [Ben, 00] S. Bennett, "The Past of PID Controllers," In J. Quevedo and T. Escobet, editors, *PID'00, IFAC Workshop on Digital Control. Past, present and future of PID control*, pp. 3-13, Terrasa, España, Abril 2000.
- [Bose, 00] B. K. Bose, "Energy, environment, and advances in power electronics," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 15, pp. 688-701, 2000.
- [Bühler, 94] H. Bühler, "Réglage par logique floue," *Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1994.*
- [Barrat, 93] J. P. Barrat, M. Barrat et Y. Lecluse, "Exemple d'application de la logique floue : Commande de la température d'un four pilote," *Technique de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôle R7428, juillet 1993.*
- [Ber, 92] H. R. Berenji, P.Khedkar, "Learning and Tuning Fuzzy Logic Controllers through Reinforcements," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 3, no. 5, pp. 724-739, 1992.
- [Chiou, 09] C. B. Chiou, C.H. Chiou, C.M. Chu, S.L. Lin, "The Application of Fuzzy Control on Energy Saving for Multi-Unit Room Air-Conditioners," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, Issue. 2-3, pp. 310-316, 2009.
- [Chan, 08] N. Chanasut, S.Premrudeepreechacharn, "Maximum Power Control of Grid-Connected Solid Oxide Fuel Cell System Using Adaptive Fuzzy Logic Controller," *Industry Applications Society Annual Meeting. 2008, IAS 08. IEEE*, pp. 1-6, 2008.
- [Chit, 06] V. Chitra, R. S. Prabhakar, "Induction Motor Speed Control using Fuzzy Logic Controller," *World Academy of Science, Engineering and Technology* 23, 2006.
- [Chuang,06] Chen-Tse Chuang, Shou-Zen Fan, Jian-Shing Shieh, "Muscle Relaxation Controlled by Automated Administration of Cisatracurium," *Biomedical Engineering Applications, Basis & Communications*, Vol. 18, pp. 284-295, 2006.
- [Chiu, 04] Yu-Chiun Chiu, Lawrence W. Lao, "Adaptive Traffic Signal Control with Iterative Genetic Fuzzy Logic Controller (GFLC)," *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control. Taipei, Taiwan*, pp. 21-23, 2004.
- [Chen, 03] L. Chen, K.S. Narendra, "Intelligent Control Using Multiple Neural Networks," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 17, no. 6, pp. 417-430, 2003.

- [Chen, 02] C. C. Wong et J. Y. Chen, "Self-Generating Rule-Mapping Fuzzy Controller Design Using a Genetic Algorithm," IEE, Proceedings, Control Theory, vol. 149, pp. 143-147, March 2002.
- [Che, 95] F-C.Chen, H.K.Khalil, "Adaptive Control of a Class of Nonlinear Discrete-Time Systems Using Neural Networks," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 40, no. 5, pp. 791-801, May 1995.
- [Cho, 94] C. Chou, H.Lu, "A Heuristic Self-Tuning Fuzzy Controller," Fuzzy Sets and Systems, vol. 61, pp. 249-264, 1994.
- [Dob, 07] E. Dobrescu, M. Balazinski, "Fuzzy Logic Aircraft Environment Controller. Fuzzy logic Aircraft Environment Controller," International Series in Intelligent Technologies. Vol. 3, pp. 85-124. 2007.
- [Das, 06] T. Das, I. Narayan Kar, "Design and Implementation of an Adaptive Fuzzy Logic-Based Controller for Wheeled Mobile Robots," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 14, no. 3, pp. 501-510, May 2006.
- [Doctor,05] F. Doctor, H. Hagrass, V. Callaghan, "A Fuzzy Embedded Agent Based Approach for Realizing Ambient Intelligence in Intelligent Inhabited Environments," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Vol. 35, Issue. 1, pp. 55-65, 2005.
- [Drian, 93] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfranc, "An Introduction to Fuzzy Control," Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [Fei, 11] Chun-Fei Hsu, Chih-Min Lin, Ming-Chia Li, "Adaptive Dynamic RBF Fuzzy Neural Controller Design with a Constructive Learning," International Journal of Fuzzy Systems, Vol. 13, no. 3, September 2011.
- [Foul, 03] L. Foulloy, S. Galichet et A. Titli, "Commande floue1, de la stabilisation à la supervision," Lavoisier, 2003, hermes sciences.
- [Fon, 93] K. F. Fong, A.P.Loh, "MRAC Control of Non-Linear Systems Using Neural Networks with Recursive Least Squares Adaptation," Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 529-533, 1993.
- [Fu, 70] K. S. Fu, "Learning Control Systems: Review and Outlook," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 15, pp. 10-221, 1970.
- [Ghaf, 08] Ghaffari, A. Shamekhi, A.Saki, E.Kamrani. "Adaptive Fuzzy Control for Air-Fuel Ratio of Automobile Spark Ignition Engine," World Academy of Science, Engineering and Technology 48, 2008.
- [Gar, 08] Garcia. Eduardo, "Compilador C CCS y simulador Proteus para micro-controladores PIC," Editorial AlfaOmega, pp. 154, 2008.
- [Gri, 07] Ms. Girija H Kulkarni, Ms. Poorva G Waingankar, "Fuzzy Logic Based Traffic Light Controller Second International Conference on Industrial and Information Systems," ICIIS 2007, pp. 8-11, August. 2007, Sri Lanka.
- [Gao, 02] Zhiqiang Gao, Thomas A. Trautzsch, James G. Dawson, "A Stable Self-Tuning Fuzzy Logic Control System for Industrial Temperature Regulation," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, Issue. 2, pp. 414-424, 2002.
- [Gao, 00] Zhiqiang Gao, Thomas A. Trautzsch, James G. Dawson, "A Stable Self-Tuning Fuzzy Logic Control System for Industrial Temperature Regulation," Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE. Vol. 2, pp. 1232-1240, 2000.

- [Gupta, 00] M. M. Gupta, "Soft Computing and Intelligent Systems: Theory and Applications," Elsevier, 2000.
- [Hoss, 07] N. Hossein zadeh, D. Seyoum, P. Wolfs, "Fuzzy Logic Control of an Induction Generator as an Electrical Brake," International Journal of Innovations in Energy Systems and Power. Vol. 2, Issue. 1, 2007.
- [Hua, 06] Sheng-Jean Huang, Jiann-Shing Shieh, Mu Fu, Ming-Chien Kao "Fuzzy logic control for intracranial pressure via continuous propofol sedation in a neurosurgical intensive care unit," Medical Engineering & Physics 28 pp.639-647, 2006.
- [Hur, 05] M.D. Hurley, W.L. Xu and G. Bright, "Implementing Fuzzy Logic for Machine Intelligence: A Case Study," International Journal of Engineering Education, Vol. 21 Issue 1, pp.178-186, 2005.
- [Héctor, 99] Héctor Pomares Cintas, "Nueva Metodología para el Diseño Automático de Sistemas Difusos," Tesis doctoral, Editorial de la Universidad de Granada, 1999, <http://hdl.handle.net/10481/6517>.
- [Hom, 95] A. Homaifar, E.McCormick, "Simultaneous Design of Membership Functions and Rule Sets for Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithms," IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol.3, no.2, pp.129-139, May 1995.
- [Ioan, 03] Ioan Ursu, Felicia Ursu, "An Intelligent ABS Control Based on Fuzzy Logic. Aircraft Application," Proceedings of the International Conference on Theory and Applications of Mathematics and Informatics – ICTAMI 2003, Alba Iulia.
- [Jamal, 10] J. Jamaludin. N.A. Rahim, P.H. Wooi, "An Elevator Group Control System With a Self-Tuning Fuzzy Logic Group Controller," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 57, no. 12, pp. 4188-4198, march 2010.
- [Jia, 06] Jiang Jing, Qing-He Wu, "An Intelligent Sliding-Mode Control Algorithm for Position Tracking Servo System," International Journal of Information Technology, Vol.12, Issue.7 2006.
- [Jos, 04] José E. Naranjo, C. González, R. García, "Fuzzy Logic Based Lateral Control for GPS Map Tracking," Intelligent Vehicles Symposium. 2004 IEEE, pp. 397-400, 2004.
- [Jamshi, 03] M. Jamshidi, "Tools for intelligent control: fuzzy controllers, neural networks and genetic algorithms," Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, vol. 361 no. 1809, pp. 1781-1808. 15 August 2003.
- [Jean, 00] J.S. Jean et H. B. Diab, "Defuzzification Techniques for Fuzzy Controllers," IEEE Trans on Main, Cyb- part B, Vol.30, pp 223-229,1999.
- [Jan, 95] J. S. R. Jang, C .T.Sun, "Neuro-fuzzy modeling and control," IEEE Proceeding, vol.83, no.3, pp.378-406, 1995.
- [Jamshi, 93] M. Jamshidi, N. Vadiiee, T. J. Ross, "Fuzzy Logic and Control, software and hardware Application," © 1993 by PTR Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- [Kur, 09] S. Kurnaz, O. Cetin, O. Kaynak, "Fuzzy Logic Based Approach to Design of Flight Control and Navigation Tasks for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles," Journal of Intelligent and Robotic Systems. Vol. 54, Issue. 1-3 pp.229-244, 2009.

- [Kumar, 09] M. Logesh Kumar , R. Harikumar, A. Keerthi Vasan, V.K.Sudhaman “Fuzzy Controller for Automatic Drug Infusion in Cardiac Patients,” Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists Hong Kong, Vol.1 IMECS 2009, 2009.
- [Kum, 08] R. Kumar, R. A. Gupta, S.V. Bhangale, “Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive With Fuzzy Logic Based Intelligent Controller,” IETECH Journal of Electrical Analysis, Vol. 2, Issue 4, pp. 211-216, 2008.
- [Khan, 08] Sh. Khan, Salami F. Abdulazeez, Lawal W. Adetunji, AHM Z. Alam, Momoh Jimoh E. Salami, Shihab A. Hameed, Aisha H. Abdalla, Mohd R. Islam, “Design and Implementation of an Optimal Fuzzy Logic Controller Using Genetic Algorithm,” Journal of Computer Science. Vol. 4, pp. 799-806, 2008.
- [Kesk, 97] A.G. Keskar Dr. K. L. Asanare, “Floating Membership Fuzzy Logic Controller for Adaptive Control of AC Drive,” Industrial Electronics. 1997. ISIE 97, Proceeding of the IEEE International Symposium Vol. 3, pp. 1216-1221, 1997.
- [Kelly, 96] DF. Kelly, DB. Goodale, J. Williams, DL. Herr, ET. Chappell, MJ. Rosner, “Propofol in the treatment of moderate and severe head injury: a randomized, prospective double blinded pilot trial,” Journal of Neurosurg, pp. 1042-1052, 1996.
- [Kay, 95] E. Kaymaz, “Adaptive Environmental Control for Optimal Energy Consumption in Hospitals,” Proceedings of the Eighth IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems, pp.165-172, 1995.
- [Kwok, 89] K.Y. Kwok, A.S. Clanachan, B. Finegan, S.L.S Hah. “hng Range Predictive Control of Arterial Blood Pressure,” Proc. 29th CDC, Honolulu, HI, pp. 2800-2805, 1989.
- [Lasri, 11a] R. Lasri, I. Rojas, H. Pomares, Z. Sadouq, “Explaining how Intelligent Control has Improved the Way we Live: A Survey on the use of Fuzzy Logic Controllers in Daily Human Life,” In Proc. 2011 IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, On page (s): 1-6, Volume:Issue: 7-9 April 2011.
- [Lasri, 11b] R. Lasri, I. Rojas, H. Pomares, “Fuzzy Logic Controllers Improves Human Daily Life. The State-Of-The Art (Best Accuracy & More Flexibility),” International Journal of Computer Applications, Vol. 23, no. 9, pp. 1-9, June 2011.
- [Lasri, 11c] R. Lasri, I. Rojas, H. Pomares, F. Rojas, “A New Methodology for Adaptive Fuzzy Controller. Comparison Performance Against Several Control Algorithms in a Real Time Control Process,” In International Conference on Fuzzy Computation Theory and Applications (FCTA 2011), SciTePress – Science and Technology Publications, Paris, France. pp. 470-474.
- [Lasri, 12] R. Lasri, I. Rojas, H. Pomares, “A Novel Policy to Reduce the Electrical Cost of a Real Time Control Process Using an On-Line Adaptive Fuzzy Logic Controller,” 2012 IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems. Aceptado.
- [Linda, 11] O. Linda, M. Manic, “Self-Organizing Fuzzy Haptic Teleoperation of Mobile Robot Using Sparse Sonar Data ,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 58, no. 8, pp. 3187-3195, August 2011.

- [Li, 07] Y. Li, H.Yu. "Energy-Optimized Fuzzy Control of Induction Motors Based on Nonintrusive Efficiency Estimation," 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control Singapore, 1-3 October 2007.
- [Luc, 06] Caro Lucas, Rasoul M. Milasi, Babak N. Araabi, "Intelligent Modeling and Control of Washing Machine Using Locally Linear Neuro-Fuzzy (LLNF) Modelling and Modified Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller (BELBIC)," Asian Journal of Control. Vol. 8, Issue.4, pp.393-400, 2006.
- [Lui, 01] B.D. Lui, C.Y. Chen, et J.Y. Tsao, "Design of Adaptive Fuzzy Logic Controller Based on Linguistic-Hedge Concepts and Genetic Algorithms," IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B, Vol.31, no.1, pp.32-53, 2001.
- [Li, 99] H. X Li, "Approximate Model Reference Adaptive Mechanism for Nominal Gain Design of Fuzzy Control system," IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B, Vol.29, pp.41-46, 1999.
- [Lauch, 97] R.A. M. Lauchlan, P. Ngamsom, R. Challoo et S. L. Omar, "Three Link Planar Robotic Arm Trajectory Planning and its Adaptive Fuzzy Logic Control," Intelligent Control Systems Laboratory. Texas A&M University, Kingsville, Texas 78363. 1997 IEEE.
- [Lin, 97] S-C.Lin, Y-Y.Chen, "Design of Self-Learning Fuzzy Sliding Mode Controllers Based on Genetic Algorithms," Fuzzy Sets and Systems Vol.86, pp.139-153, 1997.
- [Lin, 96] C-J.Lin, C-T.Lin, "Reinforcement Learning for an ART-Based Fuzzy Adaptive Learning Control Network," IEEE Trans. Neural Networks, Vol.7, no.3, pp.709-731, 1996.
- [Lya, 92] A.M. Lyapunov, A.T. Fuller (ed.). "The General Problem of the Stability of Motion," Taylor and Francis Ltd., 1992.
- [Lay, 92] J.R. Layne, K. M. Passino, "Fuzzy Model Reference Learning Control," Proceedings of IEEE on Control Applications, pp. 686-691, 1992.
- [Linkens,91] DA. Linkens and SB. Hasnain, "Self-Organizing Fuzzy Logic Control and its Application to Muscle Relaxation Anaesthesia," IEE Proc PtD, Control Theory and Applications, 138, pp. 274-284, 1991.
- [Lee, 90a] C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. Part 1," IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Vol. 20, pp.404-418, 1990.
- [Lee, 90b] C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. Part 2," IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B, Vol. 20, pp. 419-435, 1990.
- [Mama, 09] M. Mamat, N. M. Ghani, "Fuzzy Logic Controller on Automated Car Braking System," IEEE International Conference on Control and Automation Christchurch, New Zealand, December 9-11, 2009.
- [Mason, 96] Mason DG, Edward ND, Linkens DA, Reilly CS. "Performance assessment of a fuzzy controller for atracurium-induced neuromuscular block," British Journal of Anaesthesia, pp. 396-400, 1996.
- [Mae, 92] M. Maeda, S. Murakami, "A Self-Tuning Fuzzy Controller," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 51, pp. 29-40, 1992.

- [Mizu, 88] M. Mizumoto, "Fuzzy Controls Under Various Fuzzy Reasoning Methods," *Information Sciences*, Vol. 45, pp. 129-151, 1988.
- [Mamd, 75] E.H. Mamdani, S. Assilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [Mamd, 74] E.H. Mamdani, "Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant," *Proc. IEE* 121, no. 12, pp. 1585-1588, 1974.
- [Nar, 07] José E. Naranjo, J.Vinuesa, C. González, R.García, T. de Pedro. I.Parra, "Hybrid steering control for intelligent vehicle. Navigation," *ICRA 2007 Workshop: Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles*, 2007.
- [Niels, 02] J.S. Niels, A.S. Mutasim, A.K. Naim, "Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles," *IEEE transactions on control systems technology*, Vol. 10, no. 3, 2002.
- [Neat, 90] G.W. Neat, "Expert Adaptive Control: Method and Medical Application," Ph.D. Thesis, RPI, Troy, NY, 1990.
- [Orlow, 10] T. Orłowska-Kowalska, M. Dybkowski, K. Szabat, "Adaptive Sliding-Mode Neuro-Fuzzy Control of the Two-Mass Induction Motor Drive Without Mechanical Sensors," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 553-564, Feb 2010.
- [Ofo, 05] A. Ofoli, A. Rubaai, "Real-Time Implementation of a Fuzzy Logic Controller for DC-DC Switching Converter," *Industry Applications Conference 2005. Fortieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005*, Vol. 2, pp.1292-1299. 2005.
- [Ord, 97] R. Ordóñez, J. Zumbege, J.T. Spooner, and K.M. Passino, "Adaptive Fuzzy Control: Experiments and Comparative Analyses," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol.5, no.2, pp.167-188, May 1997.
- [Oga, 96] Ogata Katsuhiko, "Sistemas de Control en Tiempo Discreto," Segunda edición, pp.116. Editorial Prentice Hall. 1996.
- [Phan, 08] P. A. Phan, T. J. Gale, "Direct Adaptive Fuzzy Control with a Self-Structuring Algorithm," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 159, no. 8, pp. 871-899, 2008.
- [Phi, 07] Philip Babatunde, "Optimization of the Fermentation Process in a Brewery with a Fuzzy Logic Controller," *Leonardo Journal of Sciences*, ISSN. 1583-0233 Issue. 11, pp. 79-92, 2007.
- [Pom, 04] H. Pomares. I. Rojas, J. Ganzález, M. Damas, B. Pino, A. Prieto, "Online Global Learning in Direct Fuzzy Controllers," *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, vol. 12, pp. 218-228, 2004.
- [Parg, 02] J. Pargfrieder, H. P. Jörgl, "An Integrated Control System for Optimizing the Energy Consumption and User Comfort in Buildings, Computer Aided Control System Design," *IEEE International Symposium on Aided Control System Design*, pp. 127, 2002.
- [Pom, 00] H.Pomares, I.Rojas, J.Ortega, M.Angueta, A.Prieto, "A Systematic Approach to a Self Generating Fuzzy Rule-Table for Function Approximation," *IEEE Transactions on Systems, Man. and Cybernetics, Part B*, 2000.
- [Park, 95] Young-Moon Park, Un-Chul Moon, KwangY.Lee, "A Self-Organizing Fuzzy Logic Controller for Dynamic Systems Using a fuzzy Auto-Regressive Moving Average (FARMA) Model," *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, Vol. 3, Issue. 1, February 1995.



- [Pires, 06] O.C. Pires, C. Palma, I. Moita, J.C. Costa, M.M. Alves, E.C. Ferreira, "A Fuzzy Logic Based Expert System For Diagnosis and Control of an Integrated Wastewater Treatment," *Water Sci Technol*, Vol. 53, Issue. 4-5, pp. 313-20, 2006.
- [Passino,98] K.M. Passino. et S.Yurkovich, "Fuzzy Control," © 1998 Addison Wesley Longman, Inc.
- [Rez, 09] Rezoug, S. Boudoua, F. Hamerlain., "Fuzzy Logic Control for Manipulator Robot actuated by Pneumatic artificial Muscles," Paper presented at the Third International Conference on Electrical Engineering-ICEE'09, pp.1-6, 2009.
- [Raj, 08] N. Rajarajeswari, K. Thanushkodi, "A Bi-Directional DCDC Converter with Adaptive Fuzzy Logic Controller," *ICGST-ACSE Journal*, ISSN.1687-4811, Vol.8, Issue. II, December 2008.
- [Reza, 02] Reza Talebi. Daryani, "Intelligent Control and Power Management of Air Conditioning Systems Using Fuzzy Logic and Local Operation Networks," *Automation Congress, Proceedings of the 5th Biannual World 14*, pp.195, 2002.
- [Roj, 99a] I. Rojas, H. Pomares, F.J. Pelayo, M. Anguita, E. Ros, A. Prieto, "New Methodology for the Development of Adaptive and Self-Learning Fuzzy Controllers in Real Time," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 21, pp. 109-136, 1999.
- [Roj, 99b] I. Rojas, H. Pomares, J.L. Bernier, J. Ortega, E. Ros, A. Prieto, "Sequential Learning Algorithm for PG-RBF Network Using Regression Weights for Time Series Prediction," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1606, pp. 631-640, ISSN: 0302-9743, Springer-Verlag, 1999.
- [Roj, 99c] I. Rojas, H. Pomares, F.J. Pelayo, M. Anguita, E. Ros, A. Prieto, "New Methodology for the Development of Adaptive and Self-Learning Fuzzy Controllers in Real Time," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 21, no. 2, pp. 109-136, 1999.
- [Roj, 99d] I. Rojas, H. Pomares, F.J. Fernández, J.L. Bernier, F.J. Pelayo, A. Prieto, "A New Methodology to Obtain Fuzzy Systems Autonomously from Training Data," *Proceedings of the 8th International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz-IEEE'99)*, pp. 527-532, 1999.
- [Roj, 99e] I. Rojas, H. Pomares, F. Hoffman, F.J. Pelayo, A. Prieto, "New Design for an On-line Adaptive Fuzzy Controller," *Proceedings of the 8th International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz-IEEE'99)*, pp. 1287-1292, 1999.
- [Schaal,10] S. Schaal, C. Atkeson, "Learning Control in Robotics," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 17, Issue. 2, pp. 20-29, 2010.
- [Shar, 10] K. D. Sharma, A. Chatterjee, A. Rakshit, "Design of a Hybrid Stable Adaptive Fuzzy Controller Employing Lyapunov Theory and Harmony Search Algorithm," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 1440-1447, november 2010.
- [Shi , 08] Y. Shi, Ch. Zhang, A. Liang, H. Yuan, "Fuzzy Control of the Spraying Medicine Control System," *IFIP International Federation for Information Processing*. Vol. 259, pp. 1087-1094, 2008.
- [Sah, 07] A.K. Saha, S.P. Chowdhury, S. Chowdhury, Y.H. Song, "Dynamic Model of PEM Fuel Cell with Fuzzy Logic Controller," *42nd International Power Engineering Conference, UCPEC 2007*, pp. 753-757, 2007.

- [Shuo, 06] Xu Shuo, Zhou Ke, Luo Zhe, Yu Fan. "Study of Fuzzy PID Control for a Semi-Track Air-Cushion Vehicle Based on Power Consumption Optimization," IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. On pp. 440. ICVES 2006.
- [Shieh, 06] J.S. Shieh, D.A. Linkens, A.J. Asbury "A Hierarchical System of Online Advisory for Monitoring and Controlling the Depth of Anaesthesia Using Self-Organizing Fuzzy Logic," Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol.18, Issue.3, pp.307-316, 2006.
- [Siva, 05] T.S. Sivakumaran, S.P. Natarajan, P. Venkatachalam, "Simulation and Real-Time Implementation of Fuzzy Logic Controller for Parallel Loaded Resonant Converter," IEEE Indicon 2005 Conference, Chennai, India, I I - 13 Dec. 2005.
- [Shiq, 01] Shiqian.Wu, M. J. Er, Y. Gao, "A Fast Approach for Automatic Generation of Fuzzy Rules by Generalized Dynamic Fuzzy Neural Networks," IEEE transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, no. 4, pp. 578-594 ,August 2001.
- [Shieh, 00] J.S. Shieh, S.Z. Fan, L.W. Chang, C.C. Liu, "Hierarchical Rule Based Monitoring and Fuzzy Logic Control for Neuromuscular Block," Journal of Clinical Monitoring and Computing, Vol. 16, pp. 583-592, 2000.
- [Shieh, 99] Shieh JS, Linkens DA, Peacock JE, "Hierarchical Rule Based and Self Organizing Fuzzy Logic Control of Anaesthesia," Systems. Man. And Cybernetics, Part C: Applications and Reviews. IEEE Transactions, Vol. 29, Issue. 1, pp. 98-109, 1999.
- [Sin, 98] Y.P. Singh, "A Modified Self-Organizing Controller for Real-Time Process Control Applications," Fuzzy Sets and Systems, vol. 96, pp. 147-159, 1998.
- [Sugiy, 88] K. Sugiyama, "Rule-Based Self-Organizing Controller," in M.M. Gupta and T. Yamakawa, Eds., Fuzzy Computing (Elsevier, Amsterdam), 1988.
- [Sha, 88] S. Shao, "Fuzzy Self-Organizing Controller and its Applications for Dynamic Processes," Fuzzy Sets and Systems, vol. 26, pp. 151-164, 1988.
- [Sug, 85] M. Sugeno, K. Murakami, "An Experimental Study of Fuzzy Perking Control Using a Model Car," Industrial Applications of Fuzzy Control, pp. 125-138, 1985.
- [Tu, 07] S. Tunyasrirut, T.Suksri, S.Srilad, "Fuzzy Logic Control for a Speed Control of Induction Motor using Space Vector Pulse Width Modulation," World Academy of Science, Engineering and Technology 25, 2007.
- [Tao, 02] C.W. Tao, "A Reduction Approach for Fuzzy Rule Bases of Fuzzy Controller," IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B, vol. 37, pp. 668-675, October 2002.
- [Tso, 97] S.K. Tso et Y. H. Fung, "Methodological Development of Fuzzy Logic Controller From Multivariable Linear Control," IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics, Part B, vol. 27, no. 3, pp. 566-572, June 1997.
- [Teng, 94] F.C. Teng. A. C. Tsoi, "Fuzzy Controller Based on Mac Vicar Whelan Matrix," IEEE, 1994.
- [Vij, 07] S. Vijayan, S. Paramasivam, R. Arumugam, M. Vasudevan, and S. Palaniswami. "An Intelligent Self-Tuning PI Type Fuzzy Logic Controller for a Switched Reluctance Motor Drive," Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 6, Issue. 2, 2007.

- [Wang, 07] Xi.Wang , K.W.E.Cheng , Xi.Liao , C. Cheung, L.Dong, “Fuzzy Logic Controller for Electric Vehicle Braking Strategy,” Vol. 1, pp. 645-5, 2007.
- [Willy, 01] Willy K. Wojsznis, D.Thiele, J.Gudaz, “Adaptive Fuzzy Logic Controller,” Proceeding form International Society of Automation, ISBN/ID: TP01ISA1127, 2001.
- [Wong, 99] C.C. Wong et J. Y. Chen, “Fuzzy Control of Non-Linear Systems Using Rule Adjustment,” IEE, Proceedings, Control Theory, vol. 146, no. 6, pp. 578-584, November 1999.
- [Wan, 94] L.X. Wang, “Adaptive Fuzzy Systems and Control. Design and stability analysis,” Prentice Hall, 1994.
- [Ying, 10] Ying-Wen, Bai. Cuing-Hung, Cheng, “Using an Embedded Controller with Fuzzy Logic to Reduce Power Consumption of Mobile Computers,” 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON, pp. 236, 2010.
- [Yu, 09] ZHANG Xiao-yu, “Adaptive Sliding Mode-Like Fuzzy Logic Control for Nonlinear Systems,” Journal of Communication and Computer, ISSN. 1548-7709, USA, Vol. 6, no. 1 (Serial No.50), 2009.
- [Yanf, 07] Yanfeng Li, Haibin Yu, “Energy-Optimized Fuzzy Control of Induction Motors Based on nonintrusive Efficiency Estimation,” 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control, Singapore, pp. 1134-1137, 1-3 October 2007.
- [Y.Lee, 06] J.Y. Lee, M.S. Kim, J.J. Lee, “Multi-Objective Evolutionary Design of Fuzzy Logic Controllers for Car Parking Problem,” AMC’06-Istanbul, Turkey IEEE conference 0- 7803-9511-5/06/\$20.00 2006.
- [Yao, 05] A.W.L. Yao, S.C. Chi, C.K. Chen. “Development of an Integrated Grey–Fuzzy-Based Electricity Management System for Enterprises,” Energy, Vol. 30, Issue. 15, pp. 2759-2771, 2005.
- [Yeh, 94] Z.M. Yeh, “A Performance Approach to Fuzzy Control Design for Non-Linear Systems,” Fuzzy Sets and Systems 64, pp. 339-352, 1994.
- [Zha, 05] Y. Zhan, J. Zhu, Y. Guo, A. Rodriguez, “An Intelligent Controller for PEM Fuel Cell Power System Based on Double Closed-loop Control,” Australasian Universities Power Engineering Conference Aupec05. 2005.
- [Zhou, 00] Y. S. Zhou et L.Y. Lai, “Optimal Design of Fuzzy Controller by Genetic Algorithms,” IEEE Transaction on industrial applications, vol. 36, no. 1, pp. 93-97, January-February 2000.
- [Zhou , 00] Y.S. Zhou et L.Y. Lai, “Optimal Design of Fuzzy Controller by Genetic Algorithms,” IEEE Transaction on industrial applications, vol. 6, pp. 93-97, January-February 2000.
- [Zap, 99] A. Zapata, R. K. H. Galvão, et T. Yoneyama, “Extracting Fuzzy Control Rules from Experimental Human Operator Data,” IEEE Trans on Main, Cyb- part B, vol. 29, no. 3, pp. 398-406,1999.
- [Zieg, 42] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, “Optimum Settings for Automatic Controllers,” Trans. ASME 64, pp. 759-768, 1942.

