

# **SOFTWARE PARA CONTROL DIFUSO DE TODO TIPO DE SISTEMAS (SCD):**

## **Aplicación al Control de Invernaderos Industriales.**



**E.U.POLITÉCNICA DE MÁLAGA  
I.T.INDUSTRIAL, ESP. ELECTRÓNICA**



---

**RESUMEN:** Proyecto Final de Carrera que trata de cubrir los siguientes objetivos:

1. Introducir al lector en las bases de la Lógica y Control Difuso (*Fuzzy Logic and Control*).
2. Permitir al usuario simular un Sistema de Control Difuso (SCD) a través del desarrollo de una aplicación informática.
3. Implementar por medio de SCD un Sistema de Control Climático de Invernaderos Industriales.

---

Proyecto Final de Carrera realizado por: **Calixto Escobar Rodríguez**

Director de Proyecto: **José Galindo Gómez**







Dedicado a:

*Mi familia,*

*a mi novia y gran compañera,*

*a todos mis amigos.*

*Me siento dichoso por teneros a mi lado  
y saber que hay castillos de arena que no se derrumban.*









# Índice de Contenidos

<b>BASES DEL PROYECTO FINAL DE CARRERA</b>	<b>1</b>
Objetivos y Desarrollo.....	1
Motivación y Justificación .....	2
 <b>PARTE I: FUNDAMENTOS DE LÓGICA Y CONTROL DIFUSO</b>	 <b>5</b>
<b>1. Introducción a Lógica Difusa (<i>Fuzzy-Logic</i>)</b>	<b>7</b>
1.1 Significado y Origen.....	7
1.2 Teoría de Conjuntos Difusos.....	8
1.2.1 Conjuntos Difusos (Fuzzy Sets) .....	9
1.2.1.1 Tipos de Funciones de Pertenencia .....	11
1.2.1.2 Determinación de la Función de Pertenencia .....	15
1.2.1.3 Conceptos sobre Conjuntos Difusos .....	18
1.2.1.4 Operaciones sobre Conjuntos Difusos .....	21
1.2.1.4.1 Unión e Intersección .....	21
1.2.1.4.2 Complemento .....	26
1.2.1.4.3 Comparación .....	27
1.2.1.5 Relaciones Difusas .....	37
1.2.1.5.1 Operaciones con Relaciones Difusas .....	38
1.2.1.6 Números Difusos .....	42
1.2.1.6.1 El principio de Extensión (Extension Principle) .....	44
1.2.1.6.2 Aritmética Difusa .....	46
1.2.1.7 Teoría de la Posibilidad .....	47
 <b>2. Introducción al Control Difuso (<i>Fuzzy Control</i>)</b>	 <b>49</b>
2.1 Antes del Control Difuso .....	49
2.2 Controladores Difusos .....	52
2.3 Estructura de un Controlador Difuso.....	52
2.3.1 Bloque Difuminador (Fuzzificador) .....	54
2.3.2 Bloque de la Base de Conocimiento (Conjunto de Reglas).....	57
2.3.2.1 Proposiciones Difusas .....	57
2.3.2.2 Sentencias Difusas SI-ENTONCES (IF-THEN) .....	57
2.3.2.3 Tipos de Reglas .....	60
2.3.2.4 Fuente y Obtención de Reglas de Control Difuso.....	62
2.3.3 Bloque de Inferencia Difusa (Motor de Inferencia) .....	64
2.3.4 Bloque Concretor (Defuzzificador) .....	73

2.3.4.1	Métodos de Defuzzificación o Concreción.....	74
2.4	Métodos de Ajuste para Controladores Difusos.....	85
2.5	Tipos de Controladores Difusos.....	88

## **PARTE II: SOFTWARE - SISTEMA DE CONTROL DIFUSO (SCD) 93**

### **3. Manual de Usuario de SCD (Sistema de Control Difuso) 95**

3.1	Características de SCD .....	95
3.2	Instalación de SCD .....	97
3.3	Empezando con SCD.....	97
3.4	Las Opciones de SCD .....	99
3.4.1	Menú <u>A</u> rchivo (File).....	99
3.4.2	Menú <u>V</u> er (View) .....	103
3.4.3	Menú <u>V</u> ariables (Variables) .....	103
3.4.4	Menú <u>R</u> eglas (Rules) .....	104
3.4.5	Menú <u>I</u> nferencia (Infer) .....	105
3.4.6	Menú <u>V</u> entana (Window) .....	106
3.4.7	Menú <u>A</u> yuda (Help).....	106
3.5	La Ventana General .....	108
3.6	La Ventana de Variable de Entrada [n-ésima] .....	112
3.6.1	Nueva Variable de Entrada.....	113
3.6.2	Eliminar/Deshacer Última Eliminación de Variable de Entrada .....	114
3.6.3	Ventana para Modificar los Parámetros de una Variable de Entrada.....	115
3.7	La Ventana de Variable de Salida [n-ésima] .....	126
3.7.1	Nueva Variable de Salida .....	127
3.7.2	Eliminar/Deshacer Última Eliminación de Variable de Salida.....	128
3.7.3	Ventana para Modificar los Parámetros de una Variable de Salida .....	128
3.8	La Ventana de Reglas .....	130
3.8.1	Nueva Regla .....	134
3.8.2	Eliminar Regla .....	137
3.8.3	Deshacer Eliminación Última Regla.....	138
3.8.4	Organizar Reglas.....	138
3.9	La Ventana de Opciones de Inferencia .....	139
3.10	La Ventana de Paso a Paso [Comparación].....	141
3.11	La Ventana de Paso a Paso [Activación Reglas (And/Or)] .....	142
3.12	La Ventana de Paso a Paso [Implicación] .....	143
3.13	La Ventana de Paso a Paso [Agregación] .....	144
3.14	La Ventana de Paso a Paso [Concreción].....	146
3.15	La Ventana Calcular Variables de Salida.....	147
3.16	La Ventana Calcular Secuencia de Datos de Salida .....	148
3.17	Fichero Generados por SCD .....	152
3.18	Mejoras Futuras al Programa SCD.....	156

**4. Estructura del Programa de SCD (Sistema de Control Difuso) 157**

4.1	Introducción al Entorno de Programación – Visual Basic 6.0® .....	157
4.2	Estructura General de SCD .....	163
4.2.1	Constantes .....	163
4.2.2	Enumeraciones .....	164
4.2.3	Tipos .....	164
4.2.4	Variables.....	168
4.2.4.1	Dimensionado Dinámico: Instrucción <i>Redim</i> .....	169
4.2.5	Módulos de Código .....	172
4.2.6	Formularios .....	178

**PARTE III: USO DE SCD EN LA SIMULACIÓN DE APLICACIONES DE INGENIERÍA: CONTROL DE INVERNADEROS INDUSTRIALES 179****5. Control Difuso en Aplicaciones de Ingeniería: Sistemas de Producción Agrícola 181**

5.1	Aplicación de Ingeniería: Metodología de Diseño .....	181
5.1.1	Metodología de Diseño Usando Lógica Difusa .....	182
5.2	Evaluación Difusa de Sistemas de Producción Agrícola .....	183
5.2.1	Criterio de Selección de Expertos.....	187
5.2.1.1	Fundamentos para Definir el Criterio de Selección de Expertos ...	187
5.2.1.2	Distinguiendo entre Conocedores y Expertos.....	188
5.2.2	Elección de Métodos para la Determinación de F. de Pertenencia .....	189
5.2.2.1	Estimación Puntual (EP).....	190
5.2.2.2	Intervalo de Estimación (IE).....	191
5.2.2.3	Evaluación Directa (ED).....	191
5.2.2.4	Estimación Intervalar de Transición (EIT) .....	193
5.3	Simulación de Procesos Agrícolas.....	194

**6. Simulación en SCD del Sistema de Control Climático de un Invernadero Industrial 197**

6.1	Definición del Sistema.....	197
6.1.1	Comportamiento del Sistema .....	198
6.1.2	Objetivos del Sistema .....	200
6.1.3	Restricciones del Sistema .....	201
6.1.4	Expertos del Sistema .....	203
6.2	Variables de Entrada.....	204
6.2.1	Radiación Solar .....	204
6.2.1.1	Componentes Espectrales de la Radiación Solar Incidente.....	205
6.2.1.2	Instrumentos de Medida de la Radiación Solar .....	206

6.2.1.3	Variable Lingüística: Radiación Solar.....	207
6.2.2	Temperatura.....	208
6.2.2.1	Instrumentos de Medida de la Temperatura .....	209
6.2.2.2	Variable Lingüística: Temperatura .....	210
6.2.3	Humedad Atmosférica .....	211
6.2.3.1	Instrumentos de Medida de la Humedad Relativa.....	212
6.2.3.2	Variable Lingüística: Humedad Relativa.....	212
6.2.4	Velocidad del Viento .....	214
6.2.4.1	Variable Lingüística: Velocidad del Viento .....	214
6.2.5	Dirección del Viento .....	216
6.2.5.1	Variable Lingüística: Dirección del Viento .....	218
6.3	Variables de Salida .....	220
6.3.1	Ventilación .....	220
6.3.1.1	Variable Lingüística: Ventilación.....	223
6.3.2	Nebulización .....	225
6.3.2.1	Variable Lingüística: Nebulización.....	225
6.3.3	Pantalla Térmica .....	228
6.3.3.1	Variable Lingüística: Pantalla Térmica .....	228
6.4	Representación del Conocimiento: Conjunto de Reglas.....	231
6.5	Procedimientos de Inferencia .....	234
6.6	Análisis y Resultados .....	235
<b>Conclusiones .....</b>		<b>243</b>
	Líneas Futuras .....	244
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>		<b>245</b>





## 1. - Objetivos y Desarrollo

Para la realización del presente proyecto, **Software para Control Difuso de Todo Tipo de Sistemas: Aplicación al Control de Invernaderos Industriales**, se han establecido los siguientes objetivos:

- A. *Introducir las bases en las que se sustenta la Lógica Difusa:* Descripción de los conceptos matemáticos, definiciones y principios necesarios para poder abarcar la Lógica Difusa.
- B. *Reunir los principios de funcionamiento en Control Difuso:* Estudio de la estructura genérica de los controladores difusos, analizando detenidamente cada uno de sus componentes y realizando un estudio teórico del comportamiento de todos ellos. Así mismo se mencionarán distintos tipos de Controladores Difusos y como estos trabajan de forma muy adecuada con los controladores PID (Proporcional Integral y Derivativo) como sistemas híbridos.
- C. *Diseño de un Entorno para la Simulación de forma genérica de un Sistema de Control Difuso:* Desarrollo de una aplicación informática que permitirá al usuario diseñar y simular un sistema basado en lógica difusa.
- D. *Exponer la Metodología de Diseño en Aplicaciones de Ingeniería desde el punto de vista de la Lógica Difusa y abordar la perspectiva de aplicación en Sistema de Producción Agrícola:* Pasos a la hora de implementar una aplicación basada en Lógica Difusa, elección de los expertos e introducción a la simulación de procesos agrícolas.
- E. *Elaborar un Ejemplo de Aplicación del Software desarrollado orientado al Control Climático en Invernaderos Industriales:* Definición del sistema a controlar, declaración de variables de entrada y salida, exposición del conjunto de reglas y análisis y desarrollo de los resultados obtenidos.

Para el desarrollo de los objetivos planteados se ha estructurado el proyecto de la siguiente forma:

El *Capítulo 1* se compone de un compendio de nociones fundamentales, operaciones, conceptos, métodos y principios subyacentes de la lógica difusa que permitan situar al lector en el marco de una lógica multievaluada **(objetivo A)**.

En el *Capítulo 2* se introducen nociones fundamentales de control para desarrollar la estructura básica de un controlador difuso **(objetivo B)**.

El *Capítulo 3* constituye el Manual de Usuario de la aplicación informática desarrollada para la Simulación de Sistemas Basados en Lógica Difusa: *Sistema de Control Difuso (SCD)*.

La estructuración y características del software desarrollado son expuestas en el *Capítulo 4* bajo el epígrafe Estructura del Programa SCD. En este capítulo se expone en líneas generales la forma en la que es manipulada, almacenada y organizada la información bajo un entorno de programación *Visual Basic 6.0* para el desarrollo de esta aplicación.

El programa, junto a la realización del Manual de Usuario (*Capítulo 3*) y la Estructura del Programa (*Capítulo 4*), cubrirían el **objetivo C**.

El *Capítulo 5* trata de exponer los pasos genéricos a la hora de desarrollar una Aplicación de Ingeniería e implementar la metodología de diseño a través de Lógica Difusa. Posteriormente se incluye un enfoque genérico de la Lógica Difusa en los Sistemas de Producción Agrícola **(objetivo D)**.

La mejor forma de comprobar que el simulador intenta cubrir de la forma más fiel posible la realidad es a través de un ejemplo; para ello, en el *Capítulo 6* se toma como objeto de estudio el control climático sobre un invernadero para el cultivo de pimientos. Para el establecimiento del marco de trabajo se recurre a una serie de expertos en la materia que proporcionarán la información necesaria para el contenido del controlador difuso **(objetivo E)**.

## 2. – Motivación y Justificación

Dado el carácter del presente trabajo la finalidad primordial por la cual se ha elaborado es la presentación del mismo como Proyecto Final de Carrera.

Con la elaboración del presente proyecto se ha tratado adquirir conocimientos en tres ámbitos primordialmente:



- ❑ Por un lado ser capaz de desarrollar una aplicación informática bajo un entorno de programación basado en una plataforma como Windows. Para ello se ha recurrido al producto *Visual Basic 6.0 de Microsoft®* como herramienta de programación con el cual se ha podido desarrollar una aplicación MDI (*Multi Document Interface*) que permita, gracias a la interfaz de múltiples documentos, cumplir las especificaciones del *software* diseñado.
- ❑ Por otra parte, dado que el presente proyecto se expone bajo la titulación de Ing. Técnico Industrial (Esp. Electrónica) se ha querido profundizar en el aspecto de los *Sistemas de Control* como una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Y para ello se ha intentado elaborar un compendio de información acerca de una herramienta tan potente como es la Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*), que aplicada al mundo del control (*Fuzzy Control*) permite (junto a la ingeniería de control con acciones de control, tales como PID ) garantizar un comportamiento estable del sistema, introduciendo a la vez el componente heurístico en el proceso.
- ❑ Dada la naturaleza compleja de los procesos de cultivo de plantas, se ha creído conveniente tomar como base del presente estudio el desarrollo de un ejemplo de aplicación de Control Climático en un Invernadero Industrial bajo un Sistema de Control de Conocimiento Difuso (SCD) o *Fuzzy Knowledge Based Controller (FKBC)*. De forma más concreta la idea es la de trasladar en términos de lógica difusa las variables que intervienen según los expertos deberían ser consideradas en el proceso de producción. Todo esto nos ha permitido adquirir nociones sobre los sistemas de producción agrícola y cómo en líneas generales, está estructurada.



