

SOFTWARE DIDÁCTICO PARA LA INTRODUCCIÓN AL CONTROL DIFUSO



E.U. POLITÉCNICA
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



I.T. INDUSTRIAL, ESP ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

RESUMEN: Proyecto Fin de Carrera que trata de cubrir los siguientes objetivos:

1. Introducir a quien lo desee en las bases de la Lógica Difusa y el Control Difuso.
2. Desarrollar una herramienta de aprendizaje sobre los desarrollos teóricos y prácticos que determinan el funcionamiento de un Controlador Difuso.
3. Desarrollar ejemplos sobre el funcionamiento de los controladores difusos de un modo comprensible para aquellas personas que no tengan grandes conocimientos sobre la materia.

Proyecto Final de Carrera realizado por: **Enrique León González**

Director del Proyecto: **José Galindo Gómez**

Índice de Contenidos

Bases del Proyecto Final de Carrera.....1

- 1. Objetivos y Desarrollo.....1
- 2. Motivación y Justificación.....2

Capítulo 1 Introducción al Control Difuso..... 5

1.1	INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA	5
1.1.1	Origen y Significado.....	5
1.1.2	Teoría de Conjuntos Difusos.....	6
1.1.2.1	Funciones de Pertenencia.....	7
1.1.2.2	Conceptos sobre Conjuntos Difusos.....	8
1.1.2.3	Operaciones sobre Conjuntos Difusos.....	10
1.1.3	Relaciones Difusas.....	12
1.1.4	Números Difusos.....	13
1.1.5	El Principio de Extensión.....	13
1.2	CONTROL DIFUSO.....	14
1.2.1	Introducción al Control.....	14
1.2.2	Estructura de un Controlador Difuso.....	16
1.2.2.1	Módulo Difuminador.....	17
1.2.2.2	Base del Conocimiento	17
1.2.2.3	Motor de Inferencia.....	18
1.2.2.4	Módulo Concesor.....	20
1.2.3	Métodos de Ajuste de Controladores Difusos.....	22
1.2.4	Tipos de Controladores Difusos.....	22

Capítulo 2 Libro Electrónico SDICD.....25**Capítulo 3 Manuales de SDICD..... 103**

3.1	INSTALACIÓN DE SDICD.....	103
3.2	MANUAL PARA EL ADMINISTRADOR DE SDICD.....	106
3.2.1	Iniciar Sesión de Administrador.....	106
3.2.2	SDICD para el Administrador	108
3.2.3	Editor de Herramientas.....	109
3.2.3.1	Términos.....	110
3.2.3.2	Referencias.....	112
3.2.3.3	Tests.....	114
3.2.3.4	Trasladar los cambios a otros equipos.....	117
3.3	MANUAL DE USUARIO DE SDICD.....	119
3.3.1	Ejecutar SDICD.....	119
3.3.2	Pantalla de Inicio	120
3.3.3	Control de Usuarios	121
3.3.3.1	Abrir Usuario Existente.....	121
3.3.3.2	Nuevo Usuario	123
3.3.3.3	Ventana de Usuario.....	125
3.3.4	Menús de SDICD.....	126
3.3.4.1	Menú Archivo.....	126
3.3.4.2	Menú Herramientas.....	128
3.3.4.3	Menú Ejemplos.....	131
3.3.4.4	Menú Ayuda.....	131
3.3.5	Movilidad en el programa.....	133
3.3.5.1	Botones Pagina Anterior, Índice y Página Siguiente.....	133
3.3.5.2	Atajos de Teclado.....	134
3.3.5.3	Enlaces.....	134
3.3.6	Botones Términos y Referencias	135
3.3.7	Test.....	137
3.3.7.1	Realización del Test.....	137
3.3.7.2	Resultado del Test.....	138
3.3.7.3	Revisión del test.....	140
3.3.7.4	Test General	142

3.3.8	Imágenes y Representación Dinámica.....	142
3.3.9	Ejemplos.....	144
3.3.9.1	Sim. del Control Difuso de un Cruce de Semáforos.....	144
3.3.9.2	Simulación del Control Difuso de un Invernadero.....	151
3.3.9.2.1	Elementos de Control.....	153
3.3.9.2.2	Entradas.....	154
3.3.9.2.3	Grado de Activación.....	156
3.3.9.2.4	Implicación Difusa.....	157
3.3.9.2.5	Agregación/Concreción.....	158
3.3.9.2.6	Salidas.....	160
 Capítulo 4 Estructura de SDICD.....		161
4.1	INTRODUCCIÓN AL ENTORNO DE TRABAJO, VISUAL BASIC 6.0®.....	161
4.2	CONTROLES, EVENTOS, PROPIEDADES Y VARIABLES DE SDICD.....	164
4.3	SISTEMA DE ARCHIVOS DE SDICD.....	170
4.4	FORMULARIOS DE SDICD.....	171
4.4.1	Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso.....	171
4.4.2	Control de Usuarios de SDICD.....	172
4.4.3	Simulación del Control Difuso de un Cruce de Semáforos.....	172
4.4.4	Simulación del Control Difuso de un Invernadero.....	174
4.4.5	Ayuda de Simulación del Control Difuso de un Invernadero.....	175
4.4.6	Editor de Herramientas de SDICD.....	175
4.4.7	Acerca de SDICD.....	176
4.4.8	Test.....	177
 Anexo 1: Glosario de SDICD.....		179
 Conclusiones y Líneas Futuras.....		201
	Líneas Futuras.....	202
 Referencias Bibliográficas.....		203

Bases del Proyecto Final de Carrera

1. - Objetivos y Desarrollo

Para la realización del presente proyecto, **Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso**, 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. Dotar a todo el que lo desee de una herramienta de aprendizaje sobre los desarrollos teóricos y prácticos que determinan el funcionamiento de un Controlador Difuso.
- D. Dar la posibilidad a los alumnos de obtener una autoevaluación de los conocimientos adquiridos en la materia sin la necesidad de ser evaluados por una tercera persona o profesor.
- E. Desarrollar dos ejemplos sobre el funcionamiento de los controladores difusos de un modo comprensible para aquellas personas que no tengan grandes conocimientos sobre la materia, uno de ellos centrado en los desarrollos necesarios para implantar un Controlador Difuso y otro dedicado al explicar el funcionamiento interno de un Controlador Difuso.

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

En el *Capítulo 1* se introducen nociones fundamentales de la Lógica Difusa y el Control Difuso para desarrollar la estructura básica de un Controlador Difuso **(Objetivos A y B)**.

El Capítulo 2 constituye el desarrollo página a página del libro electrónico *Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso* a lo largo de sus 151 presentaciones, pudiéndose aquí estudiar ampliamente la teoría sobre Controladores Difusos **(Objetivo C)**.

El *Capítulo 3* está compuesto por una serie de manuales que acompañan al software, como son la *Guía de Instalación*, el *Manual de Administrador* y el *Manual de Usuario*, en este último se explica de un modo amplio la evaluación que se puede realizar y los ejemplos que se pueden simular con *Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso* **(Objetivos D y E)**.

La estructuración y características del software desarrollado son expuestas en el *Capítulo 4* bajo el epígrafe *Estructura de SDICD*. 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)*, **(Objetivo C)**.

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.

La naturaleza compleja de la materia, ha hecho que se plantee el desarrollo de un libro electrónico para introducir a cualquier estudiante de ingeniería (o a cualquier persona que esté interesada) en los aspectos básicos de la Lógica Difusa y el Control Difuso. Desde el punto de vista pedagógico, se intentará facilitar el acceso a los conocimientos mediante el desarrollo lineal de los contenidos que se desean transmitir, apoyados por la posibilidad de realizar autoevaluaciones y la consulta de los ejemplos para comprender la complejidad de los desarrollos y cálculos intrínsecos en este tipo de controladores.

Tras el desarrollo de la aplicación, tendremos una herramienta que se podrá distribuir libremente para que todo el que lo desee pueda adquirir los conocimientos necesarios en la materia del Control Difuso. Esta herramienta será complementaria a *SOFTWARE PARA CONTROL DIFUSO DE TODO TIPO DE SISTEMAS (SCD): Aplicación al Control de Invernaderos Industriales*, desarrollada en el año 2003 como Proyecto Fin de Carrera de la Universidad de Málaga. En este caso el programa ayudará al alumno en la comprensión de la materia antes de inmiscuirse en el complejo mundo del desarrollo de sistemas controlados mediante conceptos difusos.

Además, el hecho de que el uso del Control Difuso no esté tan introducido en España como lo está en otros países (como Japón o EE.UU) hace pensar que el Software a desarrollar puede

ayudar a impulsar los conocimientos sobre la materia en España y resto de países hispanohablantes.

CAPÍTULO 1 **Introducción al Control Difuso**

En el presente capítulo se trata de exponer al lector las nociones fundamentales, operaciones, conceptos, métodos y principios subyacentes del Control Difuso que le permitan situarse en el marco de desarrollo de sistemas de control basados en la Lógica Difusa. Es por ello que antes de empezar a desarrollar las nociones básicas del Control Difuso se exponen las bases de la Lógica difusa, con el objetivo de aclarar la terminología en esta rama del control. En este capítulo no se va a extender la teoría sobre lógica y control difuso, ya que el software contiene un amplio desarrollo teórico de estas materias, que se muestra en el siguiente capítulo de esta memoria.

1.1 INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA

En el presente capítulo se trata de exponer al lector las nociones básicas de la Lógica Difusa que le permitan situarse en el marco de una lógica multivaluada, donde no sólo una expresión puede ser *cierta* o *falsa*, sino que permite cuantificar en qué medida lo es.

1.1.1 Origen y Significado

La lógica difusa nació cuando el Profesor Lotfi A. Zadeh publicó un artículo titulado "*Fuzzy Sets*" (Conjuntos Difusos) [Zadeh65]. En este artículo el Dr. Zadeh presentó unos conjuntos sin límites precisos los cuales, según él, juegan un importante papel en el reconocimiento de formas, interpretación de significados, y especialmente abstracción, la esencia del proceso de razonamiento del ser humano.

En la lógica clásica sólo es posible tratar información que sea totalmente cierta o totalmente falsa; no le es posible manipular aquella información imprecisa o incompleta inherente a un problema y como información que es contiene datos que permitirían una mejor resolución del mismo. Con ello se podría decir que la lógica difusa es una extensión de los sistemas clásicos, como el propio Zadeh indica en [Zadeh92]. La lógica difusa es la lógica que soporta modos de razonamiento aproximados en lugar de exactos. Su importancia radica en que muchos modos de razonamiento humano, en especial el razonamiento según el sentido común, son aproximados por naturaleza.

La lógica difusa se ha convertido en un tema muy común en control de máquinas como el resultado de hacerlas más "*capaces*" y "*responsables*". Se podría decir que la lógica difusa

permite a los ordenadores trabajar no sólo con métodos cuantitativos sino también cualitativos, se trata pues de un intento de aplicar una forma más humana de pensar en la programación de computadoras.

A continuación se van a introducir algunas nociones elementales sobre la teoría de conjuntos difusos, notablemente ampliadas en el software y por consecuente en el capítulo 2 de esta memoria. En la literatura podemos encontrar una gran cantidad de trabajos sobre esta teoría, como en [Yager87] donde se puede encontrar una recopilación de algunos de los artículos más interesantes publicados sobre el tema por L. A. Zadeh. En [Dubois80, Dubois88, Zimm91] es posible encontrar recopilados los aspectos más importantes que constituyen la teoría de conjuntos difusos así como la teoría de la posibilidad. Una más moderna síntesis de los conjuntos difusos y sus aplicaciones puede verse en [Kruse94], [McNeill94], [Mohmmd93] y sobre todo en [Pedrycz98].

1.1.2 Teoría de Conjuntos Difusos

Los Conjuntos Difusos son una generalización de los (sub)conjuntos clásicos en el sentido de que los amplían pues permiten la descripción de nociones “vagas” e “imprecisas”. En dicha generalización la pertenencia de un elemento a un conjunto pasa a ser un concepto “difuso o borroso” que puede ser cuantificada por un “grado de pertenencia” de dicho elemento al conjunto.

De forma general se puede definir un *conjunto difuso* A , definido sobre un universo de discurso Ω (intervalo finito o infinito dentro del cual el conjunto difuso puede tomar un valor) como un conjunto de pares del siguiente modo:

$$A = \{ \mu_A(x) / x : x \in \Omega, \mu_A(x) \in [0,1] \in \mathfrak{R} \} \quad (1.1)$$

donde $\mu_A(x)$ se denomina *grado de pertenencia* del elemento x al conjunto difuso A . Este grado oscila entre los extremos 0 y 1 del dominio de los n° reales, de tal modo toque si $\mu_A(x)=0$ entonces x no pertenece en absoluto al conjunto difuso A y si $\mu_A(x)=1$ entonces indica que x pertenece totalmente al conjunto difuso A . A veces, en vez de dar una lista exhaustiva de todos los pares que forman el conjunto (valores discretos), se da una definición para la función $\mu_A(x)$, llamada función característica o *función de pertenencia*.

De la definición de conjunto difuso se derivan dos conceptos fundamentales para el estudio de esta materia:

- **Universo de Discurso:** Es el conjunto de todos los elementos que forman el eje X del conjunto difuso, es decir, todos los elementos que pueden formar parte del conjunto difuso. El universo de discurso puede ser un universo de discurso finito (discreto), cuando se representa al conjunto como un conjunto de pares de valores, o un universo de discurso infinito, cuando se representa a un conjunto mediante una función de pertenencia.

- **Etiqueta Lingüística:** Es aquella palabra, en lenguaje natural, que expresa o *identifica a un conjunto difuso*, que puede estar formalmente definido o no, con la intención de poder identificar a cada uno de los elementos de un universo de discurso con la cualidad que representa el conjunto difuso. Podemos asegurar que en nuestra vida cotidiana utilizamos multitud de etiquetas lingüísticas para expresar conceptos abstractos: “joven”, “viejo”, “frío”, “caliente”, “barato”, “caro”, “limpio”, “sucio”... Son conceptos imprecisos, por lo cual hay que tener en cuenta el contexto sobre el que definimos un conjunto difuso.

Ejemplo 1.1: Para ilustrar lo mencionado anteriormente tómesese como ejemplo el siguiente caso:

Si expresamos el concepto cualitativo “joven” mediante un conjunto difuso, donde el eje X representa el universo de discurso *edad* y el eje Y representa los grados de pertenencia en el intervalo [0,1]. El conjunto difuso que representa dicho concepto podría expresarse en la forma siguiente, considerando un universo discreto:

$$\text{Joven} = \{1/0, \dots, 1/20, 1/25, 0.9/26, 0.8/27, 0.7/28, 0.6/29, 0.5/30, \dots, 0.1/34\}$$

La “edad” (en años enteros) sería el universo de discurso de “joven”. La etiqueta lingüística “joven” identificaría a este conjunto difuso representado por una función de pertenencia si consideramos un universo de discurso no discreto, de otros como “adulto”, “viejo”..., de esta forma según la Figura 1.1:

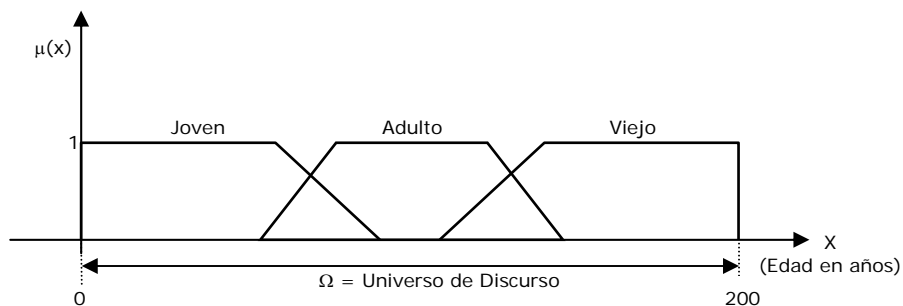


Figura 1.1: Gráfico que ilustra tres etiquetas lingüísticas (Ejemplo 1.1).

1.1.2.1 Funciones de Pertenencia

Según la forma de la función de pertenencia, se tendrá distintas clases de conjuntos difusos. Zadeh propuso una serie de funciones de pertenencia que se podrían clasificar en dos grupos, las formadas por líneas rectas “lineales” y las que presentan formas gaussianas, es decir, “curvas”. Los tipos de funciones de pertenencia son:

- Función Triangular.
- Función Gamma.

- Función S.
- Función Gaussiana.
- Función Pseudo-Exponencial.
- Función Trapezoidal.
- Función Trapecio Extendido.

Estos tipos de conjuntos difusos son los denominados conjuntos difusos *convexos* en la teoría de conjuntos difusos todos ellos definidos por Zadeh, con la excepción de la función *trapecio extendido*, la cual podríamos clasificar como una función lineal *no convexa*, es decir, una función que alternativamente es creciente y decreciente en su dominio.

Otra clasificación interesante sobre las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos es el método utilizado para calcularlas. El método a elegir dependerá de la aplicación en particular, del modo en que se manifieste la incertidumbre y en el que ésta sea medida durante los experimentos, a continuación y según [Pedrycz98] se nombran algunos de estos métodos:

Método Horizontal.

Método Vertical.

Método de Comparación de Parejas.

Método Basado en la Especificación del Problema.

Método Basado en la Optimización de Parámetros.

Método Basado en la Agrupación Difusa.

Hay que recalcar que el sistema puede funcionar mal si las funciones están mal calculadas.

Toda la información detallada sobre los distintos tipos de funciones de pertenencia y de los métodos empleados para calcularlas la podemos encontrar en el software o en el siguiente capítulo de la memoria.

1.1.2.2 Conceptos sobre Conjuntos Difusos

Sobre conjuntos difusos se definen una serie de conceptos que nos permiten tratar y comparar conjuntos difusos:

- **Igualdad (*Equality*)** de conjuntos difusos sobre un mismo universo de discurso:

Dos conjuntos difusos A y B sobre Ω se dicen iguales si cumplen:

$$A = B \Leftrightarrow \forall x \in \Omega, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (1.2)$$

- **Inclusión (*Inclusion*)** de un conjunto difuso en otro:

Dados dos conjuntos difusos A y B sobre Ω , decimos que A está incluido en B si cumplen:

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x \in \Omega, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (1.3)$$

➤ **Soporte (Support)** de un conjunto difuso:

El soporte (support) de un conjunto difuso A definido sobre Ω es un subconjunto de dicho universo que satisface:

$$\text{supp}(A) = \{x \in \Omega, \mu_A(x) > 0\} \quad (1.4)$$

➤ **α -corte** de un conjunto difuso:

Denotándolo por A_α , es un subconjunto no difuso (clásico) de elementos de Ω , cuya función de pertenencia toma un valor mayor o igual que algún valor concreto α de dicho universo de discurso que satisface:

$$A_\alpha = \{x : x \in \Omega, \mu_A(x) \geq \alpha, \alpha \in [0,1]\} \quad (1.5)$$

En la Figura 1.2 se puede observar un ejemplo.

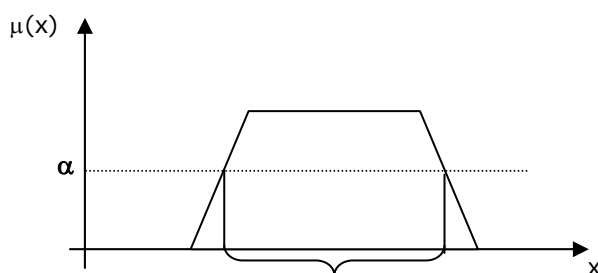


Figura 1.2: α -corte en un Trapecio.

➤ **Teorema de Representación:**

Todo subconjunto difuso A puede ser obtenido a partir de la unión de sus α -cortes:

$$A = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} A_\alpha \quad (1.6)$$

➤ **Conjunto Difuso Convexo o Cóncavo:**

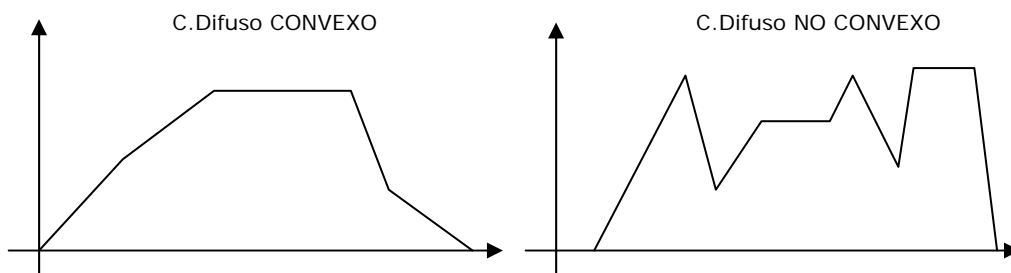


Figura 1.3: Ejemplos de Conjuntos Difusos CONVEXOS y NO CONVEXOS.

Haciendo uso del Teorema de Representación se establece el concepto de conjunto difuso como aquel en que todos sus α -cortes son convexos:

$$\forall x, y \in \Omega, \forall \lambda \in [0,1]: \mu_A(\lambda \cdot x + (1 - \lambda) \cdot y) \geq \min(\mu_A(x), \mu_A(y)) \quad (1.7)$$

En la Figura 1.3 se puede observar un ejemplo de cada uno de los modelos.

➤ **Núcleo (Core):**

El núcleo de un conjunto difuso A , definido sobre Ω es un subconjunto de dicho universo que satisface:

$$\text{Kern}(A) = \{x \in \Omega, \mu_A(x) = 1\} \quad (1.8)$$

➤ **Altura (Height):**

La altura de un conjunto difuso A , definido sobre Ω se define como:

$$\text{Hgt}(A) = \sup_{x \in \Omega} \mu_A(x) \quad (1.9)$$

➤ **Conjunto difuso Normalizado:**

Un Conjunto Difuso es normalizado sí y sólo sí:

$$\exists x \in \Omega, \mu_A(x) = \text{Hgt}(A) = 1 \quad (1.10)$$

1.1.2.3 Operaciones sobre Conjuntos Difusos

A la hora de hablar de operaciones sobre conjuntos difusos hay que saber diferenciar entre las operaciones que afectan un conjunto difuso, para modificar su función de pertenencia, y las operaciones que se aplican entre dos o más conjuntos, para obtener otro.

A las operaciones que afectan a un único conjunto difuso para modificar su función de pertenencia se las denomina *operaciones unarias* e incluyen a las siguientes:

- **Normalización**, se usa para hacer que la altura del conjunto difuso al que se aplica sea uno.
- **Concentración**, eleva a una potencia mayor que 1 a la función de pertenencia.
- **Dilatación**, eleva a una potencia menor que 1 y mayor que 0 a la función de pertenencia.
- **Intensificación del contraste**, Aumenta de un modo significativo los valores mayores a $\frac{1}{2}$ y disminuye los menores.
- **Difuminación**, operación contraria a la intensificación del contraste

Sobre varios conjuntos difusos se pueden aplicar varias operaciones, en esta memoria las vamos a clasificar en dos conjuntos: las operaciones de la lógica clásica y las operaciones de comparación de conjuntos difusos.

Son tres las operaciones de la lógica clásica que se transportan a la teoría de conjuntos difusos:

- **Unión.** La extensión de la operación unión a los conjuntos difusos implica la aparición del concepto *s-norma*, modelo genérico de la operación unión que cumple unas restricciones generales para su aplicación a los conjuntos difusos, existen múltiples s-normas.
- **Intersección.** La extensión de la operación intersección a los conjuntos difusos implica la aparición del concepto *t-norma*, modelo genérico de la operación intersección que cumple unas restricciones generales para su aplicación a los conjuntos difusos, existen múltiples s-normas.
- **Complemento.** En la teoría de conjuntos difusos existen varios operadores que cumplen con las restricciones del concepto negación fuerte, que establece las propiedades fundamentales de la operación complemento. Generalmente se usa la negación normal, establecida por Zadeh.

Para la comparación de conjuntos difusos se usan las siguientes operaciones:

- **Medida de Distancias.** Este método considera una función de distancia entre los dos conjuntos difusos, lo hace de un modo funcional, no hay que olvidar que los conjuntos difusos son funcionales por definición.
- **Índices de Igualdad.** Basado en el concepto igualdad, mide el grado con el que un conjunto difuso es igual a otro, es decir hace de la igualdad entre dos conjuntos difusos otro conjunto difuso.
- **Medida de Posibilidad y Necesidad.** Son dos valores concretos situados en el intervalo $[0,1]$, la posibilidad mide con que grado dos conjuntos se superponen la necesidad con que grado un conjunto difuso está incluido en otro.
- **Medida de Compatibilidad.** Es un conjunto difuso que indica en que medida un conjunto difuso es compatible con otro.

Toda la información referente a las distintas operaciones mencionadas en este apartado se puede encontrar ampliamente desarrollada en el segundo capítulo de esta memoria o en el tema 3 del software.

1.1.3 Relaciones Difusas

Si en la teoría de conjuntos clásicos se define una relación como un conjunto de tuplas (pares ordenados), en la teoría de los conjuntos difusos se define una relación difusa como un conjunto difuso de tuplas que puede ser representada mediante una función de pertenencia.

Sean U y V dos universos no finitos (continuos) y $\mu_R : U \times V \rightarrow [0,1]$, entonces

$$R = \int_{U \times V} \mu_R(u, v) / (u, v) \quad (1.11)$$

Es importante enfatizar que una relación abarca funciones pero no en el sentido contrario, es decir, todas las funciones son relaciones, pero no todas las relaciones son funciones. Obsérvese que las funciones tienen una dirección de construcción implícita, en contraste, las relaciones poseen una dirección libre, lo que las convierte en un importante concepto y diferencia computacional. Aunque uno puede fácilmente computar f de cualquier x , dada $f(x)$, esto no es implícitamente automático en su determinación para $f^{-1}(y)$. La computación con relaciones es muy distinta a las funciones.

Las relaciones difusas generalizan el concepto genérico de relación al admitir la noción de pertenencia parcial (asociación) entre los puntos en el universo de discurso.

Las definiciones de operaciones básicas sobre relaciones difusas están estrechamente correspondidas con las operaciones sobre conjuntos difusos. Así en el caso de operaciones sobre conjuntos difusos, todos estos son definidos de forma relacional:

- **Unión.**
- **Intersección.**
- **Complemento.**
- **Inclusión.**
- **Igualdad.**

Además de estas operaciones, las relaciones difusas pueden ser compuestas mediante la adición de diferentes operadores sobre conjuntos. Así encontramos las siguientes operaciones:

- **Sup-t Composición.** En la que el operador básico es una T-norma.
- **Inf-s Composición.** En la que el operador básico es una S-norma.

Pero hay dos operaciones que destacan en el ámbito de las relaciones difusas, ya que se usan para modificar el tamaño de las mismas:

- **Proyección Cilíndrica.** Esta operación reduce la dimensión de la relación, así el operador de proyección permite trasladar una relación terciaria a una binaria, una binaria a un conjunto difuso o un conjunto difuso a un valor crisp (puntual).

- **Extensión Cilíndrica.** Está considerada como el operador opuesto a la proyección. Extiende conjuntos difusos a relaciones binarias, relaciones binarias a terciarias, etc.

Toda la información referente a las relaciones difusas y sus operaciones mencionadas en este apartado se puede encontrar ampliamente desarrollada en el segundo capítulo de esta memoria o en el tema 4 del software.

1.1.4 Números Difusos

El concepto de número difuso fue introducido por primera vez en [Zadeh75] con el propósito de analizar y manipular valores numéricos aproximados, por ejemplo: "próximo a 0", "casi 5", etc. El concepto ha sido refinado sucesivamente y en esta memoria entenderemos por número difuso lo siguiente [Dubois85]:

Sea A un subconjunto difuso de Ω y $\mu_A(x)$ su función de pertenencia cumpliendo:

1. $\forall x, y \in \Omega, \forall \mu_A(t) \geq \min(\mu_A(x), \mu_A(y))$, es decir, que es CONVEXO.
2. $\mu_A(x)$ es semi-continua superiormente.
3. El soporte de A es un conjunto acotado.

entonces diremos que A es un **número difuso**.

Un caso particular de números difusos que se obtiene cuando consideramos sus funciones como funciones lineales. A un número difuso de este tipo lo llamaremos *triangular o trapezoidal*. Si además se trata de un conjunto difuso normalizado, a este número se le dará el tratamiento de número difuso trapezoidal normalizado, representado en la Figura 1.3.

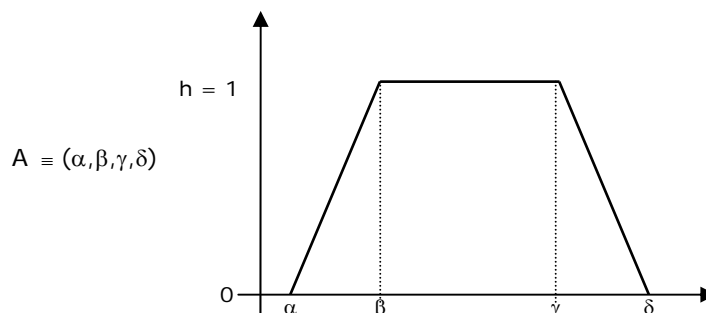


Figura 1.3: Número difuso trapezoidal normalizado.

1.1.5 El Principio de Extensión

Una de las nociones más importantes en teoría de conjuntos difusos es el *principio de extensión*, propuesto en [Zadeh75]. Se usa para transformar cantidades difusas, que tengan iguales o distintos universos, según una función de transformación en esos universos.

Gracias al Principio de Extensión es posible extender las operaciones aritméticas clásicas al tratamiento de números difusos. De esta forma las cuatro operaciones principales quedan extendidas en:

- **Suma Extendida.**
- **Diferencia Extendida.**
- **Producto Extendido.**
- **División Extendida.**

Todos estos conceptos se pueden encontrar ampliamente desarrollados en el segundo capítulo de esta memoria o en el tema 4 del software.

1.2 CONTROL DIFUSO

En este apartado se pretende dar al lector de esta memoria una breve introducción sobre los conceptos fundamentales del control difuso, base didáctica del desarrollo introducido en el software y por consiguiente en el segundo capítulo de esta memoria.

1.2.1 Introducción al Control

El término "Control Difuso" está compuesto por dos palabras, y en el apartado 1.1 de esta memoria se ha introducido el significado del término "Difuso". Es por ello que antes de empezar a referirnos al control difuso debemos hacer una pequeña parada sobre el término "Control", así como de la terminología asociada a este.

Desde que James Watt realizase en el siglo XVIII el primer trabajo significativo en control automático por medio del regulador de velocidad centrífugo para el control de la velocidad de una máquina de vapor [Ogata03], la teoría de control ha evolucionado enormemente pasando de la teoría clásica, que trata los sistemas con una entrada y una salida, o función de transferencia, a la teoría de control moderna, basada en el análisis, en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados.

Existen una serie de términos básicos que establecen una pequeña parte de la jerga utilizada en los sistemas de control y son, según [Ogata03]:

- **Variable Controlada:** Se trata de la cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente la variable controlada será la salida (el resultado).
- **Variable Manipulada:** Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.
- **Controlar:** Significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación en el valor medido a partir de un valor deseado.
- **Plantas:** A cualquier objeto físico que se va a controlar.
- **Procesos:** A cualquier operación que se va a controlar.

- **Sistemas:** Es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.
- **Perturbaciones:** Se trata de una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema.
- **Control realimentado (negativo):** Se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones impredecibles, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base a ésta diferencia.
- **Sistemas de Control Realimentados o en Lazo Cerrado:** Se trata de un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control.
- **Sistemas de Control en Lazo Abierto:** Son aquellos sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En otras palabras, no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones no realiza la tarea deseada.

En la Figura 1.4 se visualiza mediante un diagrama de bloques un sistema de control industrial, formado por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor.

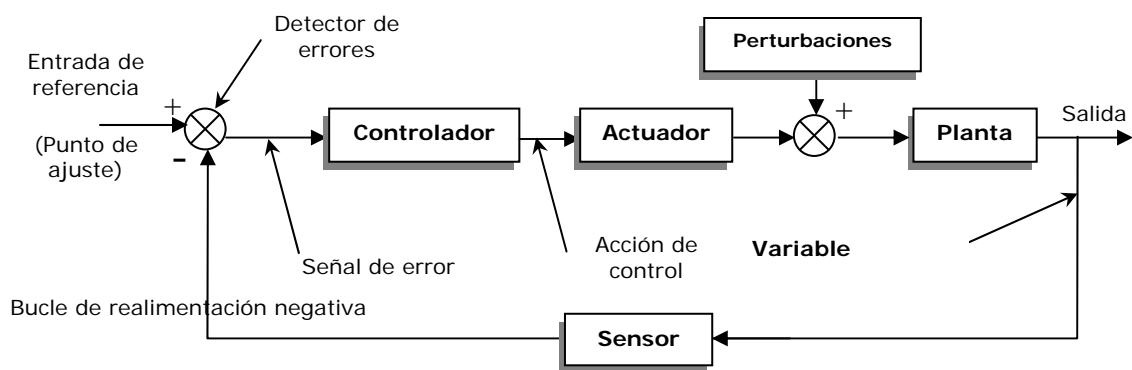


Figura 1.4: Diagrama de bloques de un sistema de control industrial genérico.

Básicamente, un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina *acción de control*.

A la hora de describir un sistema es necesario obtener un modelo matemático del mismo, el cual se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien. Una aproximación alternativa al control de este tipo de

procesos complejos consiste en investigar las estrategias de control empleadas por los operadores humanos.

A partir de esta idea se forma el control difuso como una alternativa al diseño de sistemas de control clásicos en donde ya sea porque los parámetros son altamente complejos o desconocidos y/o su comportamiento no es lineal se hace necesario buscar otro camino al de obtener un modelo matemático del sistema a controlar y del controlador.

1.2.2 Estructura de un Controlador Difuso

Como se comentó anteriormente los sistemas reales presentan, en general, parámetros muy complejos o desconocidos y un comportamiento no lineal; ante esta situación la obtención de un modelo matemático del sistema mediante ecuaciones diferenciales puede convertirse en una tarea ardua y en el mejor de los casos el tratamiento de dicha información puede resultar un factor muy determinante (tiempo de computación).

Es por ello que, basándonos en la experiencia del operador humano a la hora de controlar un proceso, podemos mediante los conjuntos difusos convertir las reglas de control que proporciona el operador humano, en estrategias de control automáticas. Esencialmente, los sistemas de control difuso son concebidos con el propósito de incorporar la experiencia del operador o técnico del proceso al sistema de control.

Se podría decir que un controlador difuso es un algoritmo de control que se basa en una colección de reglas de control lingüísticas que constituyen el protocolo de control. Estas reglas expresan las relaciones cruzadas que existen entre las variables de medida del proceso y las variables de control. Dichas reglas están relacionadas entre sí por medio de una implicación difusa y una regla composicional de inferencia, junto con un mecanismo de concreción (defuzzificación), es decir, un mecanismo que traduce la acción de control difuso en una no-difusa (concreta). De forma inversa al de concreción se encuentra el mecanismo de difuminación (fuzzificación) que convierte los datos reales de entrada en valores lingüísticos difusos. Todos estos bloques que a continuación se comentan conforman la estructura genérica de un controlador difuso (Figura 1.5).

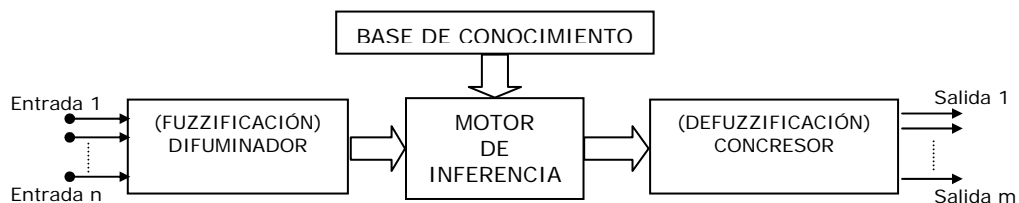


Figura 1.5: Estructura genérica de un controlador difuso.

Los siguientes apartados se centrarán en explicar de una manera escueta el funcionamiento de cada uno de los componentes de un controlador difuso, se puede encontrar información más detallada sobre ellos en el tema 6 del software o en el capítulo 2 de esta memoria.

1.2.2.1 Módulo Difuminador

El bloque difusor o difuminador básicamente se encarga de recibir las múltiples entradas concretas (valores críps de entrada) que llegan al sistema y les asocia valores lingüísticos referentes a los distintos conjuntos difusos (Figura 1.6). Además, el bloque difusor es capaz de generar un escalado entre los valores físicos de las variables de medida del proceso a un universo de discurso normalizado, esta funcionalidad es opcional.

El proceso de difuminación consiste en trasladar al universo de discurso de la variable la función de pertenencia asociada al de difuminación de forma que el conjunto difuso quede centrado con respecto al valor puntual de entrada para esa variable medido en ese instante de tiempo. Posteriormente se obtendrá un valor de posibilidad para cada etiqueta, expresando en qué medida el valor actual es similar o pertenece a las etiquetas. El valor de posibilidad será utilizado por el motor de inferencia en los antecedentes de las reglas que hagan mención a dicha variable.

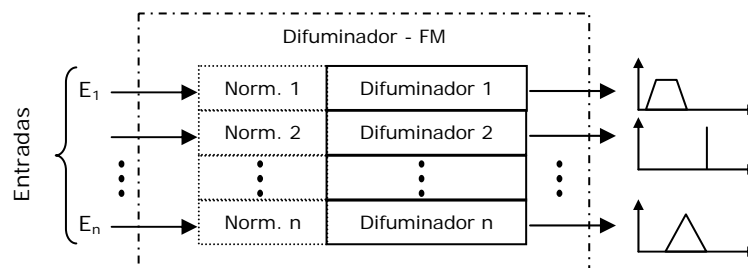


Figura 1.6: Conversión Escalar-Difusa del Bloque de Difuminación.

1.2.2.2 Base del Conocimiento

Un sistema difuso se caracteriza por un conjunto de sentencias lingüísticas basadas en el conocimiento experto. El conjunto de reglas de control forman la Base de Conocimiento, y contienen la inteligencia asociada al dominio de la aplicación y los objetivos de control.

La Base de Conocimiento posee dos funciones principales:

1. Proporciona las definiciones necesarias para determinar las reglas lingüísticas de control y la manipulación de los datos difusos del controlador.
2. Almacena los objetivos y criterios de control del dominio de los expertos mediante un conjunto de reglas lingüísticas de control.

Dicho conjunto de reglas lingüísticas de control se expresa, por lo general, mediante sentencias difusas SI-ENTONCES (*IF-THEN*) que se implementan fácilmente por sentencias condicionales difusas en términos de la lógica difusa. Un condicional difuso Si-Entonces se expresa simbólicamente como:

Si <proposición difusa> entonces <proposición difusa>

donde <proposición difusa> podrá ser única o compuesta mediante la unión de conectores (y/o) entre proposiciones más simples. Cada regla difusa describe la relación causal entre el estado del proceso (variables de estado o entrada) y las variables de salida (variables de control) del proceso. Un ejemplo de regla difusa (regla lingüística de control) es: “Si *Temperatura es baja* y *Ph es básico* entonces *Riego es poco*”

Se pueden encontrar varios tipos de reglas difusas, principalmente las podemos clasificar como:

- **Reglas con excepciones.**
- **Reglas graduales.**
- **Reglas conflictivas.**
- **Reglas de control difuso de evaluación del estado del proceso.**
- **Reglas de control difuso para la evaluación de objetos**

Con respecto a los métodos empleados durante el diseño del controlador para obtener las distintas reglas difusas de control podemos encontrar los siguientes:

- **Conocimiento basado en la experiencia de expertos y conocimiento de ingeniería del control.**
- **Conocimiento basado en las acciones de control de operadores adiestrados.**
- **Conocimiento basado en el modelo difuso de un proceso.**
- **Conocimiento basado en aprendizaje.**

1.2.2.3 Motor de Inferencia

El *Motor de Inferencia* constituye el núcleo del controlador difuso. Es el encargado de inferir las acciones de control simulando el proceso de decisión humano mediante el uso de una implicación difusa y las reglas de inferencia de la lógica difusa. Utiliza las técnicas de los Sistemas Basados en Reglas para la inferencia de los resultados.

El proceso de inferencia difusa se basa en el concepto *Razonamiento Aproximado*, a continuación se describe dicho concepto formalizado por Zadeh.

Razonamiento Aproximado: proceso de obtener consecuencias (posiblemente imprecisas) a partir de una colección de premisas constituidas por afirmaciones o hechos vagos e imprecisos. Representa, en general, la capacidad humana de tomar decisiones racionales en

ambientes complejos y/o inciertos, hecho que distingue la inteligencia humana de las capacidades de una máquina.

El *Modus Ponens* (la regla básica de deducción en la lógica de predicados) es el método de inferencia mejor conocido y más utilizado. Puede establecerse en los siguientes términos:

Modus Ponens: Supuesto que la implicación "Si p entonces q " es cierta y dado que ocurre p (es decir, que el hecho o proposición p es cierta), entonces se ha de concluir que el hecho o proposición q también es cierto:

$$\begin{array}{l} p \rightarrow q \\ p \\ \hline q \end{array} \quad (1.12)$$

Desde el punto de vista del Razonamiento Aproximado, la situación que interesa es la deducción cuando la información disponible es imprecisa, incompleta o no totalmente fiable, es decir, cuando las proposiciones contienen predicados difusos. Para este caso puede usarse el "*Modus Ponens*" generalizado, que se establece en los siguientes términos:

$$\begin{array}{l} X \text{ es } A \rightarrow Y \text{ es } B \\ X \text{ es } A' \\ \hline Y \text{ es } B' \end{array} \quad (1.13)$$

donde, X e Y son variables sobre universos de discurso U y V respectivamente, y además A , B , A' y B' son conjuntos difusos (o etiquetas lingüísticas) de los respectivos universos de discurso, (que también pueden considerarse como informaciones difusas o restricciones flexibles relativas a las mencionadas variables). La conclusión, en este caso, viene definida por un conjunto difuso B' sobre el universo de discurso de Y .

Ahora bien, el problema que se plantea ahora es como obtener ese nuevo conjunto difuso B' . La respuesta nos la da Zadeh a través de la función nombrada como *Regla Composicional de Inferencia* que se comenta a continuación.

Regla Composicional de Inferencia. Herramienta introducida por Zadeh en 1973 para traducir el Modus Ponens de la lógica clásica a la lógica difusa. La regla introduce una relación difusa R que liga los valores de X e Y , el conjunto difuso B' ha de estar engendrado o producido por A' sobre Y a través de R . Por tanto, puede escribirse $B' = A' \bullet R$ y la cuestión ahora es como construir F y la composición \bullet para obtener B' .

A partir de aquí, el desarrollo matemático para resolver este problema nos conduce a que la expresión general de la regla composicional es la siguiente:

$$B'(Y) = \text{Sup}_{x \in X} \{ A'(X) \text{ t } I(A(X), B(Y)) \} \quad (1.14)$$

donde t es una t-norma y I es una Función de Implicación.

A su vez se pueden encontrar una serie de funciones de implicación caracterizadas por estar encasilladas dentro de una serie de familias. La clasificación fue propuesta por Trillas y Valverde en [Trillas85] y está constituida por los siguientes modelos:

- Implicaciones fuertes o *S-Implicaciones*.
- Implicaciones residuales o *R-Implicaciones*.
- Implicaciones de la mecánica cuántica o *QM-Implicaciones*.

Además de estas se pueden utilizar t-normas como funciones de implicación.

Resumiendo, el **Proceso General de Inferencia** es el siguiente:

1. **Emparejar Antecedentes y Entradas:** Para cada regla se calcula el grado de emparejamiento entre cada proposición atómica de su antecedente y el valor correspondiente de la entrada (difuminado o no).
2. **Grado de Activación o Agregación de los Antecedentes:** Para cada regla se calcula el grado de activación aplicando una conjunción (t-norma) o disyunción (s-norma) según corresponda a los valores anteriores del primer paso.
3. **Resultado de cada Regla:** Para cada regla se calcula su valor resultante según su grado de activación y la semántica elegida para la regla. Este es el paso más largo y complejo pues para cada valor en las salidas se debe calcular el mayor valor de la operación, para todos los posibles valores de las entradas (operación Sup_x).
4. **Regla de Combinación:** Agregación de todos los resultados individuales obtenidos de cada una de las reglas aplicadas.

1.2.2.4 Módulo Concesor

Las variables de salida del controlador difuso deben presentarse de forma concreta o determinista (valores críps), pues cualquier proceso industrial utiliza actuadores ya sean mecánicos, neumáticos, eléctricos o de cualquier otro tipo que aceptan únicamente señales concretas (sin ambigüedad).

Una vez obtenido el conjunto difuso A tras el proceso de inferencia sobre la variable de salida, se determina el proceso por el cual el conjunto difuso inferido es convertido a valor numérico concreto representativo de dicho conjunto difuso.

Para encontrar un valor que sea representativo del conjunto difuso resultante tras el proceso de inferencia varios son los métodos que pueden tomarse. Estos métodos van a clasificarse en dos grupos principales:

- **Grupo A:** Están basados en el nuevo conjunto A agregando las funciones de pertenencia de las variables de salida de todas las reglas.
- **Grupo B:** Están basados directamente en los conjuntos B_i resultantes de cada regla individualmente (sin hacer la agregación).

La diferencia entre un grupo y otro es la producida por aplicación del operador de agregación sobre los conjuntos B_i para la obtención de A, como se puede observar en la Figura 1.7.

$$\text{➤ } A(x) = \bigcup_{i=1}^n B_i(x) \quad (1.15)$$

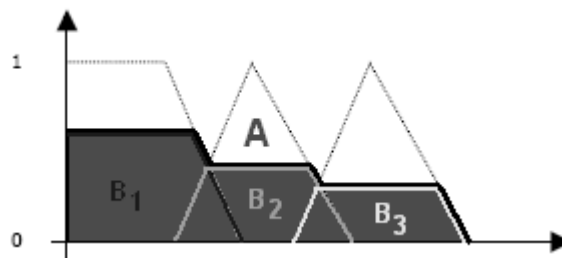


Figura 1.7: Diferencia entre el conjunto difuso A y los conjuntos B_i

A la hora de implementar los algoritmos que realicen dichos métodos de concreción, ya sean los del grupo A o B, es necesario realizar un análisis de los valores representativos (G, W, S y H) de un conjunto difuso:

- **G - Punto de Máximo Criterio (PMC) o Media de Máximos (MoM).** El PMC de un conjunto difuso A equivale al valor del universo de discurso que maximiza su función de pertenencia. En función del número de puntos que maximizan la función y según el tipo de función de pertenencia se definen los siguientes casos sobre la expresión del PMC: PMC único, mono-intervalar y multi-intervalar.
- **W - Centro de Gravedad (CoG).** El Centro de Gravedad de un conjunto difuso A viene dado por la expresión:

$$\text{CoG}(A) = \frac{\int x \cdot A(x) dx}{\int A(x) dx} \quad (1.16)$$

- **S – Área.** El área de un conjunto difuso A viene dada por la expresión obtenida anteriormente en el CoG de forma que:

$$\int_x A(x) dx \quad (1.17)$$

- **H – Altura.** La altura de un conjunto difuso A viene dada por la expresión:

$$\text{Altura (A)} = \sup_{x \in \Omega} \mu_A(x) \quad (1.18)$$

siendo Ω el universo de discurso del conjunto difuso A.

A partir de estos valores se obtienen los distintos métodos de concreción que se pueden encontrar en los controladores difusos.

1.2.3 Métodos de Ajuste de Controladores Difusos

Los controladores difusos contienen un conjunto de parámetros que pueden verse alterados para modificar el funcionamiento del controlador. Estos son los siguientes:

- **Factor de Escala (FE):** Las entradas y salidas del controlador pueden escalarse variando los límites de su universo de discurso y modificando proporcionalmente las etiquetas.
- **Modificación de los Conjuntos Difusos:** Se trata de modificar la definición de las etiquetas lingüísticas. Con este tipo de cambio podemos aumentar la sensibilidad (ganancia) del controlador para valores de cierta zona del universo.
- **Modificación de las Reglas de la Base de Conocimiento:** Se trata de modificar el contenido de las reglas. Los controladores que realizan ésta función se denominan controladores Autoorganizativos.
- **Efecto Ventana:** Cuando la salida de un sistema de control difuso está en cierto rango, entonces se puede cambiar el banco de reglas para conseguir mayor especificidad.

1.2.4 Tipos de Controladores Difusos

Atendiendo al modo de operar de los controladores difusos pueden distinguirse los siguientes tipos:

- **Controladores Difusos Directos:** las características del controlador se establecen por la naturaleza de las variables de entrada y salida utilizada.
- **Controladores Difusos Adaptativos:** pueden reajustarse automáticamente para hacer frente a las nuevas características del proceso. De este modo, pueden hacer frente a cierto número de procesos con una no-linealidad implícita.

- **Controladores Difusos Auto-Organizados (SOC - Self-Organising Controller):**
Es un sistema capaz de modificar automáticamente y sin intervención humana su base de conocimiento.
- **Controladores Difusos con Auto-Aprendizaje:** Se encuentra entre una de las técnicas más recientes referentes a control difuso. En su mayor parte responden a procedimientos y técnicas de aprendizaje del tipo gradiente descendente.
- **Controladores basados en modelos borrosos. Control Predictivo:** La aplicación de las técnicas de modelado precisan una serie de simplificaciones sobre los parámetros relativos a antecedentes y consecuentes.
- **Controladores Difusos Híbridos:** Se denominan así a aquellos sistemas de control formados por dos controladores interconectados, de los cuales uno es convencional (como los PID), y otro es difuso.

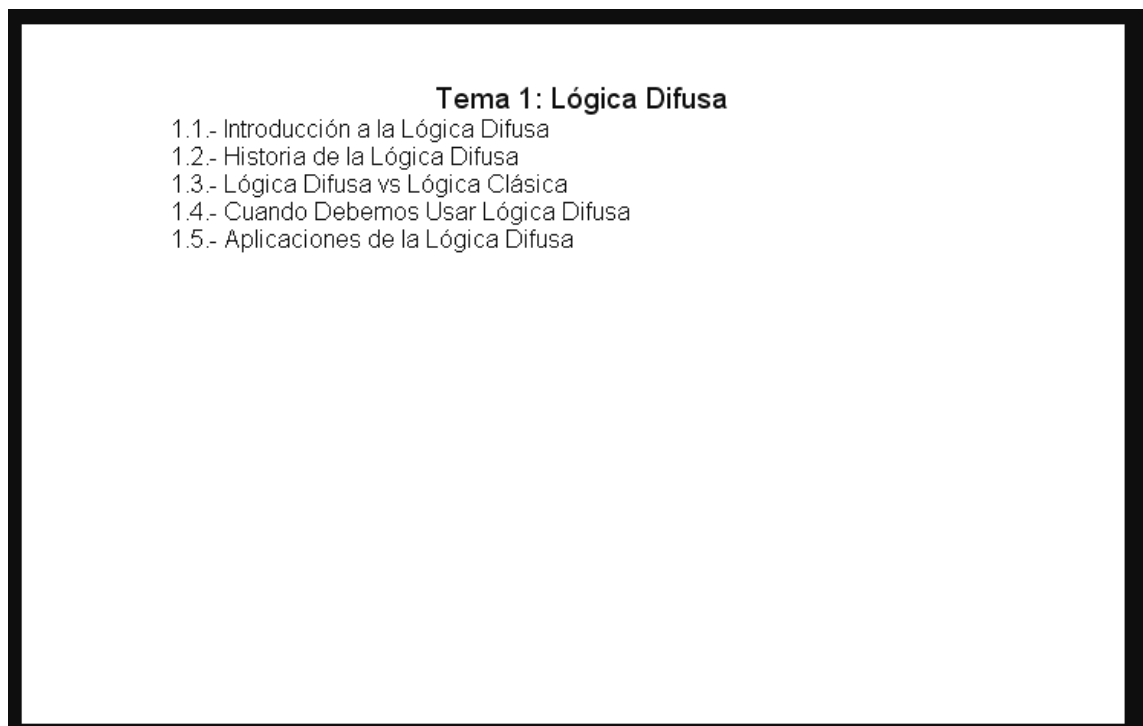
CAPÍTULO 2 Libro Electrónico SDICD

En este capítulo se recogerán los contenidos incluidos dentro del programa SDICD. Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso es una herramienta desarrollada para que cualquier persona en general y los estudiantes de la Universidad de Málaga en particular puedan aprender los conceptos fundamentales que intervienen en el control difuso, como tal tiene una estructura de libro, dividido en 7 temas diferenciados para un correcto aprendizaje de la materia. El libro está compuesto por 151 presentaciones que se mostrarán a lo largo de este capítulo, en el capítulo 3 se explica con detenimiento todos y cada uno de los detalles del programa que puedan aparecer en las presentaciones.

➤ **Página 0, PORTADA:**



➤ **Página 1, ÍNDICE GENERAL**



➤ **Página 2, ÍNDICE GENERAL**

Tema 2: Teoría de Conjuntos Difusos

- 2.1.- Los Conjuntos Difusos dentro de la Teoría de Conjuntos
- 2.2.- Conceptos sobre Conjuntos Difusos
- 2.3.- ¿Qué es una Función de Pertenencia?
- 2.4.- Tipos de Funciones de Pertenencia
 - 2.4.1.- Función Triangular
 - 2.4.2.- Función Gamma
 - 2.4.3.- Función S
 - 2.4.4.- Función Gaussiana
 - 2.4.6.- Función Pseudo-Exponencial
 - 2.4.5.- Función Trapezoidal
 - 2.4.7.- Función Trapecio Extendido
- 2.5.- Determinación de la Función de Pertenencia
 - 2.5.1.- Método Horizontal
 - 2.5.2.- Método Vertical
 - 2.5.3.- Método de Comparación de Parejas
 - 2.5.4.- Método Basado en la Especificación del Problema
 - 2.5.5.- Método Basado en la Optimización de parámetros
 - 2.5.6.- Método Basado en la Agrupación Difusa
 - 2.5.6.1.- Algoritmo Fuzzy Isodata

➤ **Página 3, ÍNDICE GENERAL**

Tema 3: Conceptos y Operaciones con Conjuntos Difusos

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 3.1.- Conceptos sobre Conjuntos Difusos <ul style="list-style-type: none"> 3.1.1.- Igualdad 3.1.2.- Inclusión 3.1.3.- Soporte 3.1.4.- Núcleo 3.1.5.- Altura 3.1.6.- Conjunto Difuso Normalizado 3.1.7.- Alfa-Corte 3.1.8.- Conjunto Difuso Convexo y Concavo 3.2.- Operaciones con Conjuntos Difusos <ul style="list-style-type: none"> 3.2.1.- Operaciones Unarias sobre Conjuntos Difusos <ul style="list-style-type: none"> 3.2.1.1.- Normalización 3.2.1.2.- Concentración 3.2.1.3.- Dilatación 3.2.1.4.- Intensificación del Contraste 3.2.1.5.- Difuminación 3.2.2.- Unión e Intersección 3.2.3.- Normas y Conormas Triangulares 3.2.4.- T-norma de Mínimo y S-norma del Máximo 3.2.5.- Principales T-Normas y T-Conormas <ul style="list-style-type: none"> 3.2.5.1.- Principales T-Normas 3.2.5.2.- Principales S-Normas 3.2.6.- Complemento | <ul style="list-style-type: none"> 3.2.7.- Comparación <ul style="list-style-type: none"> 3.2.7.1.- Medida de Distancias 3.2.7.2.- Índices de Igualdad 3.2.7.3.- Medidas de Posibilidad y Necesidad 3.2.7.4.- Medidas de Compatibilidad <ul style="list-style-type: none"> 3.2.7.4.1.- Propiedades de la Compatibilidad |
|--|---|

➤ **Página 4, ÍNDICE GENERAL**

Tema 4: Relaciones Difusas y Números Difusos

- 4.1.- Relaciones Difusas
 - 4.1.1.- Ejemplo sobre Relaciones Difusas
- 4.2.- Operaciones con Relaciones Difusas
 - 4.2.1.- Operaciones de Conjuntos
 - 4.2.2.- Composición de Relaciones Difusas
 - 4.2.3.- Proyección Cilíndrica
 - 4.2.3.1.- Ejemplo sobre Proyección Cilíndrica
 - 4.2.4.- Extensión Cilíndrica
 - 4.2.4.1.- Ejemplo sobre Extensión Cilíndrica
- 4.3.- Números Difusos
- 4.4.- Número Difuso Trapezoidal Normalizado
- 4.5.- El Principio de Extensión
 - 4.5.1.- Generalización del Principio de Extensión
- 4.6.- Aritmética Difusa

➤ **Página 5, ÍNDICE GENERAL**

Tema 5: Conceptos Básicos de Control

- 5.1.- Introducción Histórica al Control
- 5.2.- Terminología Básica
- 5.3.- Diagrama de Bloques de un Sistema de Control Genérico
- 5.4.- Ejemplo de Sistema Controlado
- 5.5.- Clasificación de los Controladores
- 5.6.- Sistemas Matemáticos de Control

➤ **Página 6, ÍNDICE GENERAL**

Tema 6: Controladores Difusos	
6.1.- Introducción	6.5.- Motor de Inferencia
6.2.- Componentes de un Controlador Difuso	6.5.1.- Razonamiento Aproximado
6.2.1.- Estructura de un Controlador Difuso	6.5.2.- Modus Ponens
6.3.- Módulo Difuminador	6.5.3.- Regla Composicional de Inferencia
6.3.1.- Funciones del Módulo Difuminador	6.5.3.1.- Regla Composicional de Inferencia 2
6.3.2.- Proceso de Difuminación o Codificación	6.5.4.- S-implicaciones
6.3.3.- Ejemplo de Difuminación(1)	6.5.5.- R-implicaciones
6.3.4.- Ejemplo de Difuminación(2)	6.5.6.- QM-implicaciones
6.4.- Base del Conocimiento	6.5.7.- T-normas como Funciones de Implicación
6.4.1.- Funciones de la Base del Conocimiento	6.5.8.- Funcionamiento del motor de Inferencia
6.4.2.- Proposiciones Difusas del Conjunto de Reglas	6.5.8.1.- Cálculos que se Realizan con Reglas Difusas
6.4.2.1.- Proposiciones Difusas Básicas: And, Or y Not	6.5.8.2.- Operadores que Influyen en la Inferencia
6.4.2.2.- Proposiciones Difusas Cualificadas y Cuantificadas	6.5.8.3.- Ejemplo
6.4.3.- Sentencias Difusas Si-Entonces	6.5.8.4.- Resumen del Proceso general de Inferencia
6.4.4.- Tipos de Reglas	6.6.- Módulo Concesor
6.4.4.1.- Reglas con Excepciones	6.6.1.- Funcionalidad del Módulo Concesor
6.4.4.2.- Reglas Graduales	6.6.2.- Métodos de Concesión
6.4.4.3.- Reglas Conflictivas	6.6.2.1.- Valores Representativos de un Conjunto Difuso
6.4.4.4.- Reglas de Evaluación del Estado del Proceso	6.6.2.1.1.- Punto de Máximo Criterio - G
6.4.4.5.- Reglas de Control Difuso para la Evaluación de Objetos	6.6.2.1.2.- Centro de Gravedad - W
6.4.5.- Fuente y Obtención de las Reglas de Control Difuso	6.6.2.1.3.- Área - S
6.4.5.1.- Experiencia de Expertos	6.6.2.1.4.- Altura - H
6.4.5.2.- Acciones de Control de Operadores Adiestrados	6.6.2.2.- Métodos del Grupo A (1)
6.4.5.3.- Modelo Difuso de un Proceso	6.6.2.3.- Métodos del Grupo A (2)
6.4.5.4.- Aprendizaje	6.6.2.4.- Métodos del Grupo B (1)
	6.6.2.5.- Métodos del Grupo B (2)

➤ **Página 7, ÍNDICE GENERAL**

Tema 7: Métodos de Ajuste y Tipos de Controladores Difusos	
7.1.- Métodos de Ajuste	
7.1.1.- Factor de Escala	
7.1.2.- Modificación de los Conjuntos Difusos	
7.1.3.- Modificación de las Reglas de la Base del Conocimiento	
7.1.4.- Efecto Ventana	
7.2.- Tipos de Controladores Difusos	
7.2.1.- Controladores Difusos Directos	
7.2.2.- Controladores Difusos Adaptativos	
7.2.3.- Controladores Difusos Auto-Organizados	
7.2.4.- Controladores Difusos con Auto-Aprendizaje	
7.2.5.- Controladores Basados en Modelos Borrosos	
7.2.6.- Controladores Difusos Híbridos	

➤ **Página 8, TEMA 1: LÓGICA DIFUSA**

- 1.1.- Introducción a la Lógica Difusa
- 1.2.- Historia de la Lógica Difusa
- 1.3.- Lógica Difusa vs Lógica Clásica
- 1.4.- Cuando Debemos Usar Lógica Difusa
- 1.5.- Aplicaciones de la Lógica Difusa

➤ **Página 9, 1.1 INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA**

Los humanos, para comunicarnos, usamos sentencias del tipo "Si marchamos temprano, no deberíamos encontrar embotellamientos para salir de la ciudad" o "Es casi cierto que este mediodía la circulación en la autopista será lenta". Informaciones en las que la **incertidumbre** aparece de un modo explícito (casi cierto, temprano) o implícito (no deberíamos encontrar).

Estas sentencias resaltan que las informaciones que una persona manipula suelen ser incompletas por distintas razones. Uno de los retos de la informática y, más particularmente, de la inteligencia artificial es, precisamente, desarrollar **sistemas** capaces de aceptar esta clase de informaciones imperfectas y utilizarlas de la manera más satisfactoria posible.

La **lógica clásica** no permite trabajar más que con lo que es verdaderamente cierto o verdaderamente falso, con ella no es posible deducir provisionalmente **conclusiones plausibles**. En cuanto al tratamiento de la incertidumbre permitido por la **teoría de la probabilidad**, en la práctica, necesita datos estadísticos no siempre disponibles. Además, con las probabilidades, expresar la falta de certidumbre en una eventualidad equivale a expresar la certidumbre de la eventualidad contraria.

La **lógica difusa**, por su parte, nos permite desarrollar modelos en los que existe incertidumbre o hay informaciones imprecisas. El temario que a continuación se desarrolla es una introducción a esta técnica que ha evolucionado a pasos sorprendentes a partir del último tercio del siglo XX.

➤ **Página 10, 1.2 HISTORIA DE LA LÓGICA DIFUSA**

El término **conjunto difuso** aparece por primera vez en 1965 cuando el profesor **Lotfi A. Zadeh** (en la imagen) publicó un artículo titulado "Fuzzy sets" [Zadeh65], en este artículo el Dr. Zadeh presentó unos conjuntos sin límites precisos, los cuales, según él juegan un importante papel en el reconocimiento de formas, interpretación de significados, y especialmente en la abstracción, la esencia del proceso de razonamiento del ser humano. Posteriormente el propio Zadeh ha realizado numerosos avances teóricos y ha colaborado con otros investigadores en el desarrollo de la **lógica difusa**.



Paralelamente, otros investigadores han desarrollado proyectos en este campo, así el profesor **Mamdani** desarrolló en 1975 una estrategia para el control de procedimientos y presentó los resultados más esperanzadores que se han obtenido sobre la conducción de un motor a vapor [Mamdani75]. La primera aplicación industrial real de la lógica difusa fue en 1978, cuando la sociedad danesa F.L. Smidth realizó el control de un horno de cemento.

Pero es en Japón a finales de los años ochenta donde aumentó de manera significativa el uso de la lógica difusa por parte de la industria, donde se desarrollaron depuradoras industriales, grúas portuarias, metros, sistemas de ventilación y climatización. Además fue allí donde comenzaron a comercializarse lavadoras, cámaras fotográficas y otros aparatos con la etiqueta **fuzzy logic**. También comenzó a utilizarse este método en campos tan alejados de la industria como son la banca o los diagnósticos médicos.

➤ **Página 11, LÓGICA DIFUSA VS LÓGICA CLÁSICA**

El gran inconveniente de la **lógica clásica**, también conocida como bivaluada, es que solo puede tratar información que sea totalmente cierta o totalmente falsa, y no le es posible manipular información imprecisa o incompleta. La **lógica difusa** soporta modos de **razonamiento aproximado** en lugar de exacto, aproximándose así al modo de razonamiento humano. Se trata de una lógica multivaluada, sus características principales son:

1. El razonamiento exacto es considerado como un caso particular del razonamiento aproximado. Por lo que podemos afirmar que cualquier **sistema lógico** puede ser representado en términos de lógica difusa.
2. El conocimiento es interpretado como un conjunto de restricciones flexibles, es decir, difusas, sobre un conjunto de variables, tales como temperatura, presión, distancia, etc.
3. La **inferencia** es considerada como un proceso de propagación de dichas restricciones, Si temperatura es alta y volumen es constante, presión es alta.
4. En lógica difusa todo problema es un **problema de grados**, es decir que lo que cierto puede serlo con un cierto grado, midiendo este su veracidad.

➤ **Página 12, 1.4 CUANDO DEBEMOS USAR LA LÓGICA DIFUSA**

El uso de la **lógica difusa** está recomendado para:

1. **Procesos** complejos sin modelo de solución sencillo.
2. Procesos no lineales.
3. Cuando haya que introducir la experiencia de un operador **experto** que se base en conceptos imprecisos obtenidos de su experiencia.
4. Cuando el sistema a controlar no es completamente conocido.
5. Cuando el ajuste de una variable puede producir el desajuste de otras.
6. Cuando se quieran representar y operar con conceptos que tengan imprecisión o **incertidumbre**.

En definitiva, el uso de esta tecnología es conveniente en cualquier sistema en el que las restricciones de la **lógica clásica** produzcan situaciones indeseables.

➤ **Página 13, 1.5 APLICACIONES DE LA LÓGICA DIFUSA**

En la mayoría de sus aplicaciones actuales, la **lógica difusa** permite tener en cuenta todos los conocimientos cualitativos de diseñadores y de operadores en la automatización de sistemas. Entre muchas otras, ejemplos del uso de este método en la actualidad son:

1. Lavadoras sin reglaje y detectores de movimiento han servido para que los consumidores conozcan la **tecnología fuzzy**.
2. Transmisiones automáticas, controles de inyección y de antichoque, equipos de climatización, han implantado la lógica difusa en la automoción.
3. Control de tráfico, control de vehículos, control de compuertas en plantas hidroeléctricas, centrales térmicas, control de metros y ascensores demuestran la gran implantación que ha tenido esta técnica en el control de sistemas.
4. El uso de la lógica difusa se extiende a los campos de la predicción de terremotos, la predicción meteorológica.
5. Seguimiento de objetos mediante el uso de cámaras, reconocimiento de texto manuscrito y reconocimiento de objetos.
6. Sistemas de información o conocimiento, el uso de los llamados **sistemas expertos** y de las **bases de datos difusas** está cada vez más extendido. Se puede estudiar los avances en este campo en Galindo06 y Galindo08.

➤ **Página 14, TEMA 2: TEORÍA DE CONJUNTOS DIFUSOS**

2.1.- Los Conjuntos Difusos dentro de la Teoría de Conjuntos
2.2.- Conceptos sobre Conjuntos Difusos
2.3.- ¿Qué es una Función de Pertenencia?
2.4.- Tipos de Funciones de Pertenencia
2.4.1.- Función Triangular
2.4.2.- Función Gamma
2.4.3.- Función S
2.4.4.- Función Gaussiana
2.4.6.- Función Pseudo-Exponencial
2.4.5.- Función Trapezoidal
2.4.7.- Función Trapecio Extendido
2.5.- Determinación de la Función de Pertenencia
2.5.1.- Método Horizontal
2.5.2.- Método Vertical
2.5.3.- Método de Comparación de Parejas
2.5.4.- Método Basado en la Especificación del Problema
2.5.5.- Método Basado en la Optimización de parámetros
2.5.6.- Método Basado en la Agrupación Difusa
2.5.6.1.- Algoritmo Fuzzy Isodata

➤ **Página 15, 2.1 LOS CONJUNTOS DIFUSOS DENTRO DE LA TEORÍA DE CONJUNTOS**

La noción de **conjunto** da origen a numerosas teorías matemáticas. En la teoría de **conjuntos clásicos** un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto, así dentro del campo frutas, se puede definir claramente un conjunto de manzanas, pero es muy difícil definir el conjunto manzanas maduras, ya que no se puede definir con claridad el límite en el cual una manzana pasa a estar madura.

La pertenencia de un elemento a un conjunto de este tipo pasa a ser un concepto "difuso o borroso". Dicha pertenencia puede ser cuantificada por un grado. Dicho grado se denomina habitualmente **grado de pertenencia** de dicho elemento al conjunto y toma un valor por convenio en el intervalo $[0,1]$ dentro del conjunto de los números reales. Si dicho valor es 0 significa que dicho elemento no pertenece al conjunto, si es 1 pertenece completamente al conjunto y si es otro valor pertenece parcialmente al conjunto con un grado del intervalo $(0, 1)$.

A partir de estas bases se puede definir un **conjunto difuso** A dentro de un **universo de discurso** X (intervalo finito o infinito dentro del cual un conjunto difuso puede tomar un valor) como un conjunto de pares del modo:

$$A = \{ A(x) / x : x \in X, A(x) \in [0,1 \in \mathbb{R}] \}$$

Donde $A(x)$ es el grado de pertenencia de x al conjunto difuso A y x es el elemento del universo X sobre el que se define A.

➤ **Página 16, 2.2 CONCEPTOS SOBRE CONJUNTOS DIFUSOS**

De la definición de conjunto difuso se derivan dos conceptos: el **universo del discurso** y la **etiqueta lingüística**.

UNIVERSO DEL DISCURSO: es el conjunto de todos los elementos que pueden pertenecer a un **conjunto difuso**. Se distinguen dos tipos de universos: los **discretos** y los **infinitos**. Los primeros se representarán como un conjunto de pares de valores y los segundos estarán representados por la llamada **función de pertenencia** al conjunto en cuestión, como se verá en el siguiente apartado.

ETIQUETA LINGÜÍSTICA: Es aquella palabra, en lenguaje natural, que expresa o identifica a un conjunto difuso, que puede estar formalmente definido o no. Así la función de pertenencia de un conjunto difuso A , $A(x)$, expresa el grado en que x verifica la categoría especificada por A . Así podemos encontrar tantas etiquetas como conceptos abstractos que se puedan cuantificar en mayor o menor medida. Como ejemplo de etiqueta puede valer cualquier cualidad de una cosa: joven, viejo, frío, caliente, barato, caro, limpio, sucio...

La representación de conjuntos difusos puede ser variada y depende de la naturaleza del universo del discurso (establece el contexto) sobre el que definamos el conjunto difuso, por ejemplo: podemos encontrar una persona y un edificio con la cualidad "alto", pero evidentemente no medirán lo mismo.

➤ **Página 17, 2.3 ¿QUÉ ES UNA FUNCIÓN DE PERTENENCIA?**

Un **conjunto difuso** está definido por su **función de pertenencia**, que corresponde a la noción **función característica** en la **lógica clásica**. Para una mejor comprensión del tema lo ilustraremos con un ejemplo visual comparando un conjunto clásico con su homónimo difuso.

Queremos definir el **conjunto** de personas con un peso denominado medio. Utilizando la lógica clásica podemos decir que un varón de 40 años posee un peso medio cuando su peso está comprendido entre 70 y 80 kg. La función característica da 1 para los valores $[70,80]$ y 0 en el resto. Un conjunto difuso de las personas de talla media puede ser el siguiente, 1 para los valores $[72,78]$, 0.9 para $\{71,81\}$, 0.8 para $\{70,80\}$... y 0 para los valores fuera del conjunto $[62,88]$. Gráficamente quedaría:



El profesor Bart Kosko, en [kosko92], demuestra que la teoría de conjuntos clásicos es una simplificación de la teoría de conjuntos difusos, ya que en la extensión vectorial que él aplica a sus funciones de pertenencia, los vectores pertenecientes a los conjuntos clásicos se forman mediante los valores naturales 1 y 0, mientras que para los conjuntos clásicos usa todos los reales del intervalo $[0,1]$.

➤ **Página 18, 2.4 TIPOS DE FUNCIONES DE PERTENENCIA**

Según la forma de la **función de pertenencia**, se tendrán distintas clases de **conjuntos difusos**. Zadeh propuso una serie de funciones de pertenencia que se podrían clasificar en dos grupos: **lineales** y **curvas**. Las lineales son aquellas formadas por líneas rectas, mientras que las curvas poseen formas gaussianas [Zadeh65].

A continuación se van a mostrar los distintos tipos de funciones de pertenencia que propuso Zadeh, todos estos tipos se pueden clasificar como **conjuntos difusos convexos**, con la excepción del **trapecio extendido** que se considera un **conjunto difuso no convexo**.

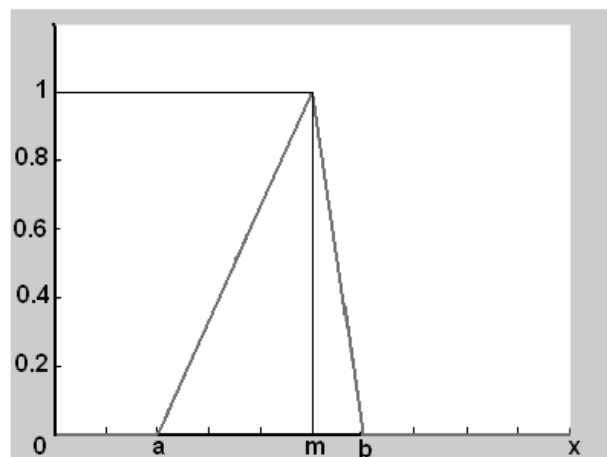
- 2.4.1.- Función Triangular
- 2.4.2.- Función Gamma
- 2.4.3.- Función S
- 2.4.4.- Función Gaussiana
- 2.4.6.- Función Pseudo-Exponencial
- 2.4.5.- Función Trapezoidal
- 2.4.7.- Función Trapecio Extendido

➤ **Página 19, 2.4.1 FUNCIÓN TRIANGULAR**

Es una **función de pertenencia lineal** definida por sus límites inferior "a" y superior "b" y el valor modal "m", tal que $a < m < b$. El grado de pertenencia para m será 1, y 0 para los valores exteriores al intervalo (a,b).

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ (x-a)/(m-a) & \text{si } x \in (a, m] \\ (b-x)/(b-m) & \text{si } x \in [m, b) \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

Representación



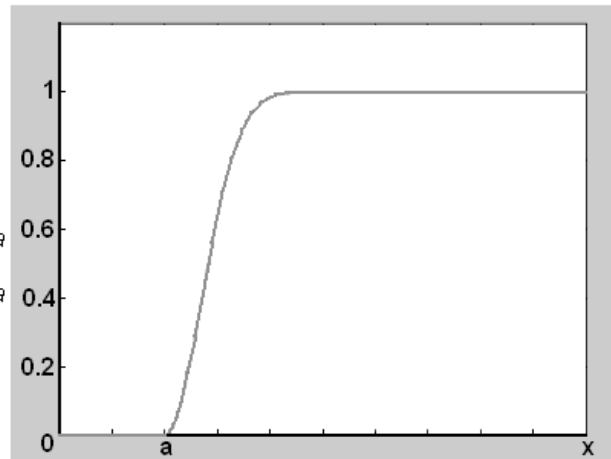
➤ **Página 20, 2.4.2 FUNCIÓN GAMMA**

Función de pertenencia curva definida por su limite inferior "a" y el valor de "k">0. Se caracteriza por un rápido crecimiento a partir de "a". Cuanto mayor sea el valor de "k" mayor aún será el crecimiento. Tiene varias formulaciones posibles.

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 1 - e^{-k(x-a)^2} & \text{si } x > a \end{cases}$$

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{k(x-a)^2}{1+k(x-a)^2} & \text{si } x > a \end{cases}$$

Representación

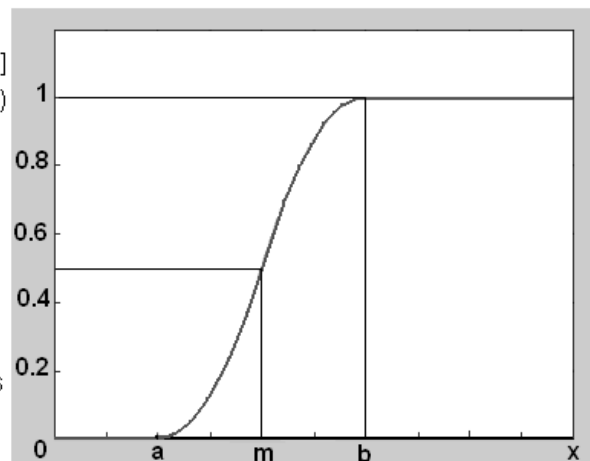


➤ **Página 21, 2.4.3 FUNCIÓN S**

Función de pertenencia curva definida por sus límites inferior "a", superior "b" y el valor del punto de inflexión "m". Generalmente $m=(a+b)/2$. El crecimiento será más lento cuanto mayor sea la distancia entre los puntos.

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{2[(x-a)/(b-a)]^2}{1+2[(x-a)/(b-a)]^2} & \text{si } x \in (a, m) \\ \frac{2[(x-a)/(b-a)]^2}{1+2[(x-a)/(b-a)]^2} & \text{si } x \in [a, m) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

Representación



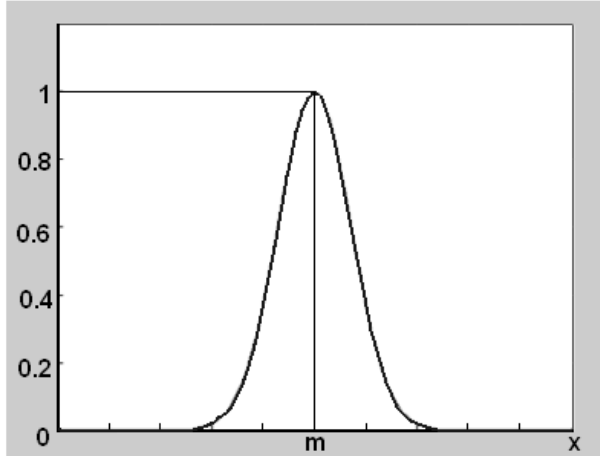
Nótese que tanto la **función Gamma** como la **función S** sirven para representar los denominados **conceptos difusos**, que es como se denomina a los conjuntos cuyo **grado de pertenencia** es creciente de tal forma que a partir de cierto valor el grado es siempre 1 (o un valor muy cercano). Ejemplos de conceptos difusos son los conjuntos con etiquetas "muy caliente" o "muy alto" para variables de temperatura y altura respectivamente. También existen los denominados **conceptos difusos inversos** que son aquellos que son decrecientes y el grado vale 0 a partir de un cierto valor "muy frío" o "muy bajo" son ejemplos de conceptos difusos inversos.

➤ **Página 22, 2.4.4 FUNCIÓN GAUSIANA**

Función de pertenencia Curva definida por valor medio "m" y el valor "k">0. Representa una típica campana de Gauss que será más estrecha cuanto mayor sea el valor de "k".

$$A(x) = e^{-k(x-m)^2}$$

Representación

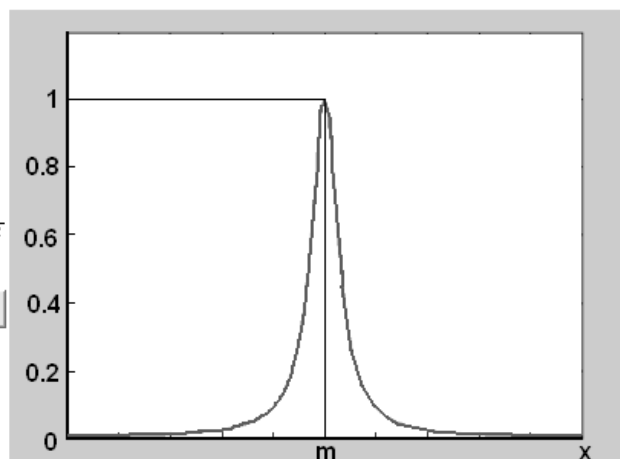


➤ **Página 23, 2.4.5 FUNCIÓN PSEUDO-EXPONENCIAL**

Función de pertenencia curva definida por su valor medio "m" y el valor "k">1. Cuanto mayor sea el valor de k el crecimiento será más rápido aún y la campana será más estrecha.

$$A(x) = \frac{1}{1+k(x-m)^2}$$

Representación

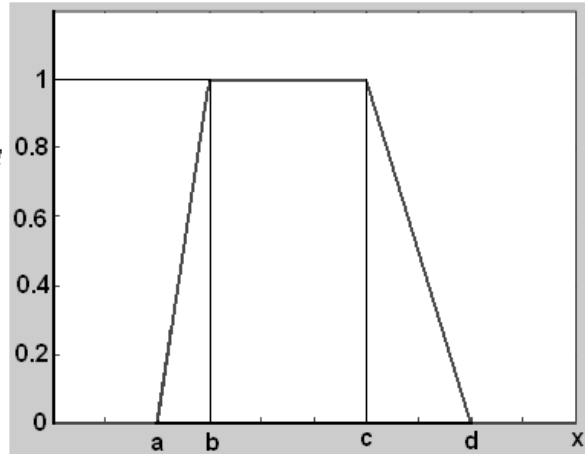


➤ **Página 24, 2.4.6 FUNCIÓN TRAPEZOIDAL**

Función de Pertenencia lineal definida por su límites inferior "a" y superior "d" (con **grado de pertenencia 0**) y dos puntos intermedios: "b" y "c" (con grado de pertenencia 1). Al intervalo [a,d] se le denomina **soporte** y al [b,c] se le denomina **núcleo**.

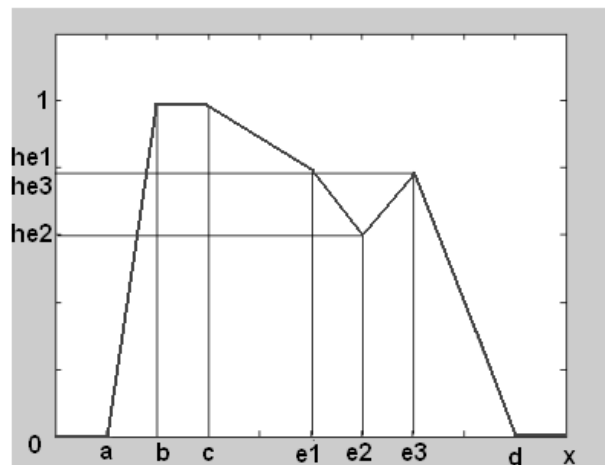
$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \text{ o } x \geq d \\ (x-a)/(b-a) & \text{si } x \in (a,b] \\ 1 & \text{si } x \in (b,c) \\ (d-x)/(d-c) & \text{si } x \in [c,d) \end{cases}$$

Representación



➤ **Página 25, 2.4.7 FUNCIÓN TRAPEZIO EXTENDIDO**

Función de pertenencia lineal definida por los cuatro valores de un trapecio [a,b,c,d], y una lista de puntos entre estos. Este tipo de función se puede adaptar a la definición de cualquier concepto con facilidad de representación y cálculo.



Este modelo permite mucha flexibilidad y cálculos sencillos. Se pueden definir funciones convexas y cóncavas, como se muestra en el ejemplo anterior.

➤ **Página 26, 2.5 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE PERTENENCIA**

Las **funciones de pertenencia** pueden calcularse de diversas formas. Pedrycz, en sus escritos propuso que el método a elegir dependerá de la aplicación en particular, del modo en que se manifieste la **incertidumbre** y en el que ésta sea medida durante los experimentos [Pedrycz98]. A continuación se detallan algunos de estos métodos. Tengase en cuenta que un sistema puede funcionar mal si sus funciones están mal calculadas.

2.5.1.- Método Horizontal

2.5.2.- Método Vertical

2.5.3.- Método de Comparación de Parejas

2.5.4.- Método Basado en la Especificación del Problema

2.5.5.- Método Basado en la Optimización de parámetros

2.5.6.- Método Basado en la Agrupación Difusa

2.5.6.1.- Algoritmo Fuzzy Isodata

➤ **Página 27, 2.5.1 MÉTODO HORIZONTAL**

Este método se basa en las respuestas de N **expertos** a una pregunta del formato: ¿Puede x ser considerado compatible en el concepto A ? Las posibles respuestas serán SI y NO, el grado de pertenencia de x a A se calcula del siguiente modo:

$$A(x) = (\text{Respuestas Afirmativas}) / N$$

➤ **Página 28, 2.5.2 MÉTODO VERTICAL**

Se escogen varios valores para α , para construir varios de sus **α -cortes**. Ahora la pregunta es la siguiente: "Para esos valores de α predeterminados ¿Identifique los valores del universo X que pertenecen a A con grado no menor que α ?".

A partir de esos α -cortes se identifica el **conjunto difuso** A usando el llamado **Teorema de Representación**, que se estudiará más detalladamente junto con el concepto alfa-corte en el apartado 3.1.4.

➤ **Página 29, 2.5.3 MÉTODO DE COMPARACIÓN DE PAREJAS**

Tenemos que calcular la **función de pertenencia** de un **conjunto difuso** A, sobre un **universo de discurso** X de n valores. Para ello calcularemos primero el valor de la matriz recíproca M, para ello se cuantifica numéricamente el nivel de prioridad o mayor pertenencia de una pareja de valores: x_i respecto a x_j .

$$M = \begin{bmatrix} \frac{A(x_1)}{A(x_1)} & \frac{A(x_2)}{A(x_1)} & \dots & \frac{A(x_n)}{A(x_1)} \\ \frac{A(x_2)}{A(x_1)} & \frac{A(x_2)}{A(x_2)} & \dots & \frac{A(x_n)}{A(x_2)} \\ \dots & \dots & \frac{A(x_j)}{A(x_j)} & \dots \\ \frac{A(x_n)}{A(x_1)} & \frac{A(x_n)}{A(x_2)} & \dots & \frac{A(x_n)}{A(x_n)} \end{bmatrix}$$

Todos los valores de la diagonal principal son 1
 Cumple la propiedad de Reciprocidad: $(a_{hi}, a_{ih})=1$
 Cumple la propiedad transitiva: $(a_{hi}, a_{ik})=a_{hk}$

La consistencia de los datos será proporcional al autovalor de la matriz, por lo que si éste es muy bajo sería conveniente repetir los experimentos. Una vez obtenido un valor válido se toman las parejas de valores como el conjunto difuso A.

➤ **Página 30, 2.5.4 MÉTODO BASADO EN LA ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Este método consiste en elegir una función numérica que se aproxime a las características del **sistema**. En este caso el error existente entre la función real del sistema y la aproximada se define como un **conjunto difuso** que mide la calidad de la aproximación.

➤ **Página 31, 2.5.5 MÉTODO BASADO EN LA OPTIMIZACIÓN DE PARAMETROS**

La forma de un **conjunto difuso** A, depende de unos parámetros, denotados por el vector p , representado por $A(x; p)$. Se obtienen algunos resultados experimentales en la forma de parejas (E_k, G_k) , donde E_k representa al elemento y G_k al **grado de pertenencia** de este al conjunto, siendo $k=1, 2, \dots, n$.

El problema consiste en optimizar el vector p , por ejemplo minimizando el error cuadrático:

$$\min_p \sum_{k=1}^N [G_k - A(E_k; p)]^2$$

➤ **Página 32, 2.5.6 MÉTODO BASADO EN LA AGRUPACIÓN DIFUSA**

Se trata de agrupar los objetos del **universo** en grupos (solapados) cuyos niveles de pertenencia a cada grupo son vistos como grados difusos. Existen varios algoritmos de **Fuzzy Clustering** (agrupación difusa), pero el más aceptado es el **algoritmo de fuzzy isodata**, también conocido como **algoritmo de Bezdek** que podemos encontrar en [Bezdek81].

Supongamos N elementos (x_1, x_2, \dots, x_n) , entre los que existe una medida de distancia entre cada dos elementos $\|x_i - x_j\|$, creando una matriz $F = [f_{ij}]$, de c filas y n columnas de valores comprendidos entre 0 y 1, que denota el grado de pertenencia de x_j al grupo i-ésimo y se cumple que:

En cada fila i corresponden a los **grados de pertenencia** de los N elementos al grupo i-ésimo.

$$\forall j=1, 2, \dots, N: \sum_{i=1}^c f_{ij} = 1, \text{ y que } \forall i=1, 2, \dots, N: \sum_{j=1}^N f_{ij} = (0, N).$$

➤ **Página 33, 2.5.6.1 ALGORITMO FUZZY ISODATA**

El Algoritmo Fuzzy Isodata consiste en la siguiente secuencia de operaciones:

1. $k:=0$; hayar una matriz inicial $F(k)$, definida en el apartado anterior.

2. Usando $F(k)$, calcular los centroides $v_i(k) = \frac{\sum_{j=1}^N f_{ij}^2(k) x_j}{\sum_{j=1}^N f_{ij}^2(k)}$

3. Calcular $F(k+1)$: $(f_{ij}(k+1))^{-1} = \sum_{h=1}^c \left(\frac{\|x_j - v_i\|}{\|x_j - v_h\|} \right)^2$

4. Comprobar $F(k)$ con $F(k+1)$: $\begin{cases} \text{si son suficientemente parecidos PARAR} \\ \text{en otro caso } k:=k+1; \text{ IR A PASO 2} \end{cases}$

Obtenemos soluciones locales a la siguiente optimización no lineal, cumpliendo la matriz $F[f_{ij}]$ las condiciones anteriores

$$\min_{v_i} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^c f_{ij}^2 \|x_j - v_i\|^2$$

➤ **Página 34, TEMA 3: CONCEPTOS Y OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS**

3.1.- Conceptos sobre Conjuntos Difusos	3.2.7.- Comparación
3.1.1.- Igualdad	3.2.7.1.- Medida de Distancias
3.1.2.- Inclusión	3.2.7.2.- Índices de Igualdad
3.1.3.- Soporte	3.2.7.3.- Medidas de Posibilidad y Necesidad
3.1.4.- Núcleo	3.2.7.4.- Medidas de Compatibilidad
3.1.5.- Altura	3.2.7.4.1.- Propiedades de la Compatibilidad
3.1.6.- Conjunto Difuso Normalizado	
3.1.7.- Alfa-Corte	
3.1.8.- Conjunto Difuso Convexo y Concavo	
3.2.- Operaciones con Conjuntos Difusos	
3.2.1.- Operaciones Unarias sobre Conjuntos Difusos	
3.2.1.1.- Normalización	
3.2.1.2.- Concentración	
3.2.1.3.- Dilatación	
3.2.1.4.- Intensificación del Contraste	
3.2.1.5.- Difuminación	
3.2.2.- Unión e Intersección	
3.2.3.- Normas y Conormas Triangulares	
3.2.4.- T-norma de Mínimo y S-norma del Máximo	
3.2.5.- Principales T-Normas y T-Conormas	
3.2.5.1.- Principales T-Normas	
3.2.5.2.- Principales S-Normas	
3.2.6.- Complemento	

➤ **Página 35, 3.1 CONCEPTOS SOBRE CONJUNTOS DIFUSOS**

Sobre los **conjuntos difusos** se definen una serie de conceptos que nos permiten caracterizar, tratar y comparar dichos conjuntos:

- 3.1.1.- Igualdad
- 3.1.2.- Inclusión
- 3.1.3.- Soporte
- 3.1.4.- Núcleo
- 3.1.5.- Altura
- 3.1.6.- Conjunto Difuso Normalizado
- 3.1.7.- Alfa-Corte
- 3.1.8.- Conjunto Difuso Convexo y Concavo

➤ **Página 36, 3.1.1 IGUALDAD**

Dos **conjuntos difusos** A y B sobre un mismo **universo** X son iguales si cumplen:

$$A=B \Leftrightarrow \forall x \in X, A(x) = B(x)$$

➤ **Página 37, 3.1.2 INCLUSIÓN**

Dados dos **conjuntos difusos** A y B sobre un mismo **universo** X, diremos que A está incluido en B si cumple:

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x \in X, B(x) \geq A(x)$$

➤ **Página 38, 3.1.3 SOPORTE**

El **soporte** de un **conjunto difuso** A definido sobre un **universo** X es un subconjunto de dicho universo que cumple la siguiente norma:

$$\text{supp}(A) = \{x \in X, \mu_A(x) > 0\}$$

Es decir, el soporte de un conjunto difuso lo componen todos los elementos del conjunto cuyo **grado de pertenencia** no es cero.

➤ **Página 39, 3.1.4 NÚCLEO**

El **núcleo** (kernel) de un **conjunto difuso** A , definido sobre un **universo** X es un subconjunto de dicho universo en el cual todos sus elementos tiene **grado de pertenencia** con valor 1:

$$\text{kern}(A) = \{x \in X, A(x) = 1\}$$

➤ **Página 40, 3.1.5 ALTURA**

La **altura** de un **conjunto difuso** A, definido sobre un **universo** X se define como:

$$\text{Hgt}(A) = \sup_{x \in X} A(x)$$

Es decir, la altura es el mayor de los grados de pertenencia de los elementos del conjunto.

➤ **Página 41, 3.1.6 CONJUNTO DIFUSO NORMALIZADO**

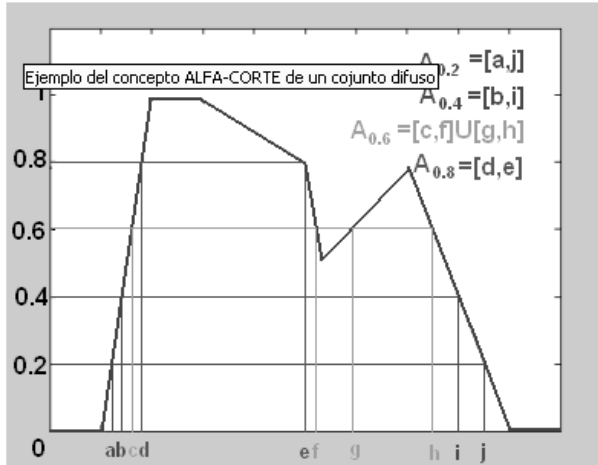
Se dice que un **conjunto difuso** está **normalizado** sí y solo sí su **altura** es uno:

$$\exists x \in X, A(x) = \text{Hgt}(A) = 1$$

➤ **Página 42, 3.1.7 ALFA-CORTE**

Un **alfa - corte** A_α es un subconjunto no difuso de elementos del **universo** X , cuya **función de pertenencia** toma un valor mayor o igual al valor α , se denota de la siguiente manera:

$$A_\alpha = \{x : x \in X, A(x) \geq \alpha, \alpha \in [0, 1]\}$$



En el ejemplo de la izquierda se representan distintos α -cortes de un **trapecio extendido**. Como se puede ver, $A_{0.2}$, $A_{0.4}$ y $A_{0.8}$ están formados por un intervalo de valores del universo y $A_{0.6}$ por dos de estos intervalos.

A partir de aquí se define el **teorema de representación**, que dice que todo subconjunto difuso A puede ser obtenido a partir de la unión de sus alfa-cortes.

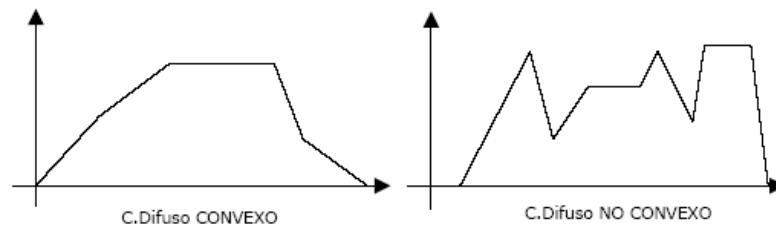
$$A = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} A_\alpha$$

➤ **Página 43, 3.1.8 CONJUNTO DIFUSO CONVEXO Y CONCAVO**

Haciendo uso del **Teorema de Representación** se establece el término **conjunto difuso convexo** como aquel en el que todos sus **alfa - cortes** son convexos.

$$\forall x, y \in X, \forall \lambda \in [0, 1] : A(\lambda \cdot x + (1-\lambda) \cdot y) \geq \min(A(x), A(y))$$

A los conjuntos difusos que no cumplen esta expresión se les denomina **concavos** o no convexos. En el siguiente ejemplo se muestra la representación gráfica de la **función de pertenencia** de un **conjunto difuso convexo** y otro no convexo.



➤ **Página 44, 3.2 OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS**

Sobre **conjuntos difusos** se definen una serie de operaciones que nos permiten tratarlos y compararlos. En sus estudios de **bases de datos difusas**, F.E. Petry [Petry96], introdujo las siguientes operaciones:

- 3.2.1.- Operaciones Unarias sobre Conjuntos Difusos
- 3.2.2.- Unión e Intersección
- 3.2.3.- Normas y Conormas Triangulares
- 3.2.4.- T-norma de Mínimo y S-norma del Máximo
- 3.2.5.- Principales T-Normas y T-Conormas
 - 3.2.5.1- Principales T-Normas
 - 3.2.5.2- Principales S-Normas
- 3.2.6.- Complemento
- 3.2.7.- Comparación

➤ **Página 45, 3.2.1 OPERACIONES UNARIAS SOBRE CONJUNTOS DIFUSOS**

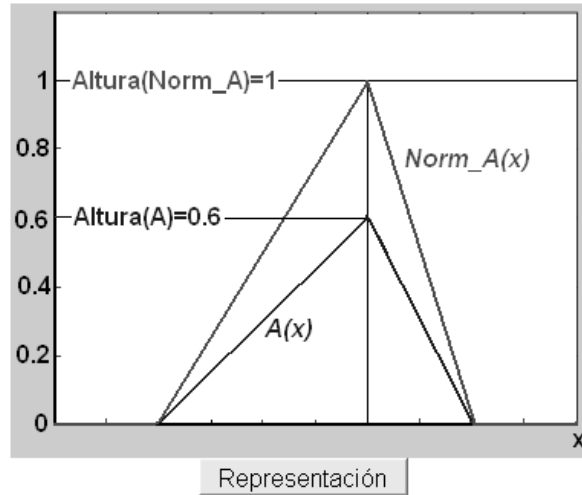
Sobre un **conjunto difuso** se pueden aplicar una serie de operaciones que nos permiten modificarlo para poder resaltar alguna peculiaridad del mismo. Estas operaciones son:

- 3.2.1.1.- Normalización
- 3.2.1.2.- Concentración
- 3.2.1.3.- Dilatación
- 3.2.1.4.- Intensificación del Contraste
- 3.2.1.5.- Difuminación

➤ **Página 46, 3.2.1.1 NORMALIZACIÓN**

Operación que se usa para convertir un conjunto difuso no normalizado en uno **normalizado** dividiendo la **función de pertenencia** del mismo por su **altura**.

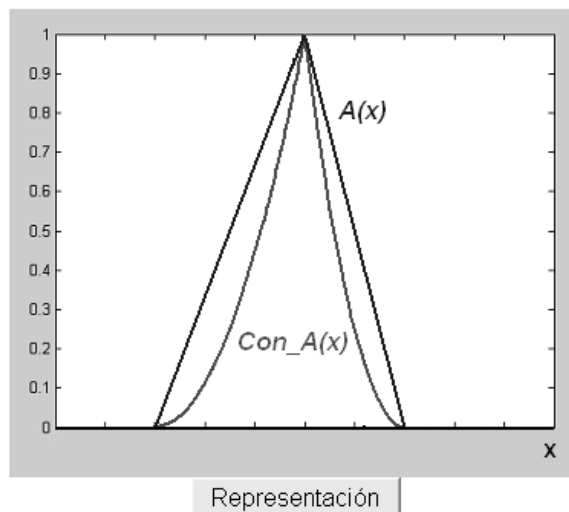
$$\text{Norm}_A(x) = A(x) / \text{Altura}(A)$$



➤ **Página 47, 3.2.1.2 CONCENTRACIÓN**

Operación a través de la cual la **función de pertenencia** de un **conjunto difuso** tomará valores más pequeños, concentrándose en los valores con mayor **grado de pertenencia**.

$$\text{Con}_A(x) = A^p(x), \text{ con } p > 1 \text{ (normalmente } p=2)$$

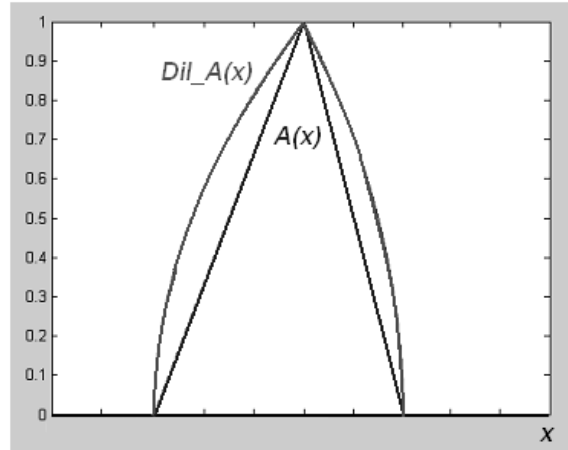


➤ **Página 48, 3.2.1.3 DILATACIÓN**

Operación a través de la cual la **función de pertenencia** de un **conjunto difuso** tomará valores más grandes. Es el efecto contrario a la **concentración**. Se puede aplicar de dos modos:

$$\text{Dil}_A(x) = A^p(x), \text{ con } p \in (0, 1) \text{ (normalmente } p=0.5)$$

$$\text{Dil}_A(x) = 2A(x) - A^2(x)$$

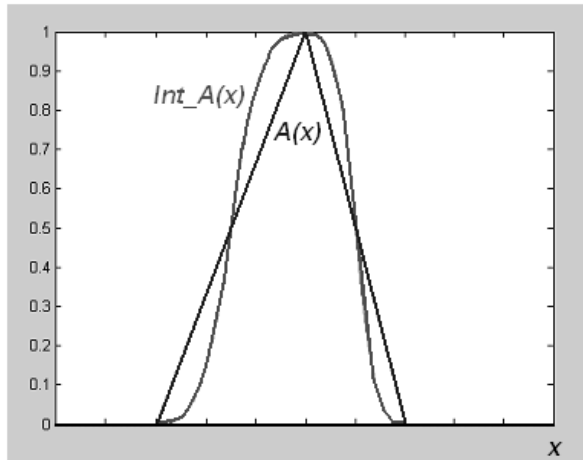


Representación

➤ **Página 49, 3.2.1.4 INTENSIFICACIÓN DEL CONTRASTE**

Operación a través de la cual la **función de pertenencia** de un **conjunto difuso** aumentará su valor si es mayor a 1/2 y disminuirá en caso contrario.

$$\text{Int}_A(x) = \begin{cases} 2^{p-1} A^p(x) & \text{si } A(x) \leq 0.5 \\ 1 - 2^{p-1} (1 - A(x))^p & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \text{con } p > 1, \text{ Cuanto mayor es } p, \text{ mayor intensificación.}$$

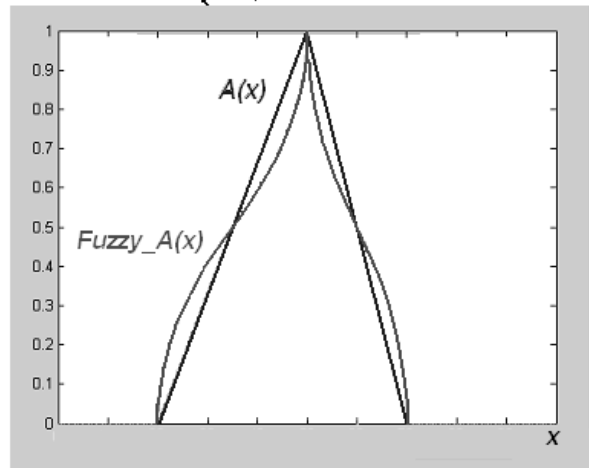


Representación

➤ **Página 50, 3.2.1.5 DIFUMINACIÓN**

Operación a través de la cual la **función de pertenencia** de un **conjunto difuso** se transformará de modo contrario a la **intensificación del contraste**, aumentará su valor si es menor a 1/2 y disminuirá en caso contrario.

$$\text{Fuzzy}_A(x) = \begin{cases} \sqrt{A(x)/2} & \text{si } A(x) \leq 0.5 \\ 1 - \sqrt{(1-A(x))/2} & \text{en otro caso} \end{cases}$$



Representación

➤ **Página 51, 3.2.2 UNIÓN E INTERSECCIÓN**

Si A y B son dos **conjuntos difusos** sobre un **universo del discurso** X, la **función de pertenencia** de la **unión** de ambos conjuntos viene dada por:

$$(A \cup B)(x) = f(A(x), B(x)), x \in X$$

Para los mismos conjuntos difusos A y B definidos sobre un universo de discurso X, la función de pertenencia de la **intersección** de ambos conjuntos viene dada por:

$$(A \cap B)(x) = g(A(x), B(x)), x \in X$$

Según la teorías de Schweizer y Sklar [Sklar83] se define f como una **t-norma** y g como una **t-conorma**, conceptos que se desarrollan en los siguientes apartados.

➤ **Página 52, 3.2.3 NORMAS Y CONORMAS TRIANGULARES**

Los conceptos **norma** y **conorma triangular** derivan de las teorías de Menger [Menger42] y de las de Schweizer y Sklar [Sklar83], ampliamente desarroyadas por Butnario y Klement en [Butnario93]. Estos conceptos establecen modelos genéricos para operaciones de **unión e intersección**, las cuales deben cumplir ciertas propiedades.

1. Se llama **norma triangular** o **t-norma** a la operación binaria $t:[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ que cumple las siguientes propiedades:

Conmutativa: $x t y = y t x$

Asociativa: $x t (y t z) = (x t y) t z$

Monotonicidad: si $x \leq y, w \leq z$, entonces $x t w \leq y t z$

Condiciones Frontera: $\begin{cases} x t 0 = 0 \\ x t 1 = x \end{cases}$

2. Se llama **conorma triangular**, **t-conorma** o **s-norma** a la operación binaria $s:[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ que cumple las siguientes propiedades:

Conmutativa: $x s y = y s x$

Asociativa: $x s (y s z) = (x s y) s z$

Monotonicidad: si $x \leq y, w \leq z$, entonces $x s w \leq y s z$

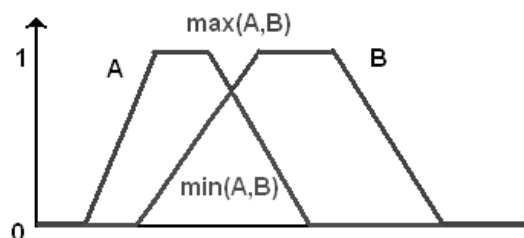
Condiciones Frontera: $\begin{cases} x s 0 = x \\ x s 1 = 1 \end{cases}$

➤ **Página 53, 3.2.4 T-NORMA DEL MÍNIMO Y S-NORMA DEL MÁXIMO**

La función **mínimo** [min()] es una **t-norma**, que corresponde a la operación **intersección** en **conjuntos clásicos** cuyos **grados de pertenencia** están en $\{0, 1\}$. Por eso esta función es la extensión natural de la intersección en **conjuntos difusos**.

La función **máximo** [max()] es una **s-norma**, que corresponde a la operación **unión** en conjuntos clásicos cuyos grados de pertenencia están en $\{0, 1\}$. Por eso, esta función es la extensión natural de la unión en conjuntos difusos.

En el siguiente gráfico se representan las operaciones de unión e intersección, entre dos **conjuntos difusos trapezoidales** A y B.



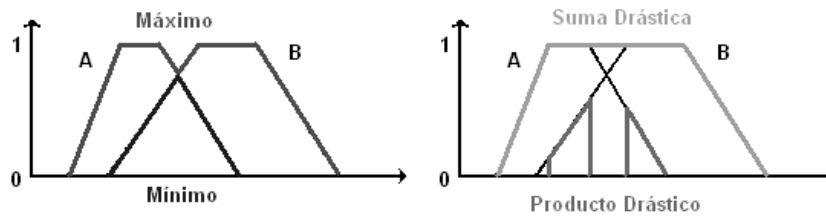
Representación

➤ **Página 54, 3.2.5 PRINCIPALES T-NORMAS Y T-CONORMAS**

Existe un amplio conjunto de **t-normas** y **s-normas** que pueden ser utilizadas como conectivos para modelar la **intersección** y la **unión** respectivamente, en las siguientes páginas se mostrarán los principales de ellas, utilizadas por Dubois [Dubois80], Yager [Yager80] y Pedrycz [Pedrycz98] en sus publicaciones.

Para cada t-norma existe una s-norma dual o conjugada, y viceversa, según la **ley de Norman** aplicada a los **conjuntos difusos** $x \text{ s } y = (1 - x)t(1 - y)$.

Las **normas** y **conormas triangulares** no pueden ordenarse de mayor a menor, sin embargo si que se pueden identificar la función mínimo como la mayor t-norma y el producto drástico como la menor. En el caso de las t-conormas la mayor corresponde a la **suma drástica** y la menor a la función máximo. En la imagen de la parte inferior de la pantalla se pueden ver la representación gráfica de estas funciones para dos conjuntos difusos A y B. Las expresiones de estas y otras t-normas y s-normas se muestran en las páginas siguientes.



➤ **Página 55, 3.2.5.1 PRINCIPALES T-NORMAS**

Las siguientes expresiones corresponden a las principales **t-normas** utilizadas por Dubois [Dubois80], Yager [Yager80] y Pedrycz [Pedrycz98]:

- **Mínimo**..... $f(x,y)=\min(x,y)$
- **Producto Algebraico**..... $f(x,y)=x \cdot y$
- **Producto Drástico**..... $f(x,y)=\begin{cases} x, & \text{si } y=1 \\ y, & \text{si } x=1 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- **Producto Acotado**..... $f(x,y)=\max[0, (1+p)(x+y+1)-pxy]$, donde $p \geq -1$
- **Producto de Hamacher**..... $f(x,y)=\frac{xy}{p+(1-p)(x+y-xy)}$, donde $p \geq 0$
- **Familia Yager**..... $f(x,y)=1-\min(1, [(1-x)^p + (1-y)^p]^{1/p})$, donde $p > 0$
- **Familia Dubois-Prade**..... $f(x,y)=\frac{xy}{\max(x,y,p)}$, donde $p \in [0, 1]$
- **Familia Frank**..... $f(x,y)=\log_p(1 + \frac{(p^x-1)(p^y-1)}{p-1})$, donde $p > 0, p \neq 1$
- **Producto de Einstein**..... $f(x,y)=\frac{xy}{1+(1-x)+(1-y)}$

➤ **Página 56, 3.2.5.2 PRINCIPALES S-NORMAS**

Las siguientes expresiones corresponden a las principales **s - normas** utilizadas por Dubois [Dubois80], Yager [Yager80] y Pedrycz [Pedrycz98]:

- **Máximo**..... $f(x,y)=\max(x,y)$
- **Suma-Producto**..... $f(x,y)=x+y-xy$
- **Suma Drástica**..... $f(x,y)=\begin{cases} x, & \text{si } y=0 \\ y, & \text{si } x=0 \\ 1, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- **Suma Acotada**..... $f(x,y)=\min[1,x+y+pxy]$, donde $p \geq 0$
- **Familia Sugeno**..... $f(x,y)=\min(1,x+y+p-xy)$, donde $p \geq 0$
- **Familia Dubois-Prade**..... $f(x,y)=\frac{(1-x)(1-y)}{\max(1-x,1-y,p)}$, donde $p \in [0,1]$
- **Familia Yager**..... $f(x,y)=\min(1,[x^p+y^p]^{1/p})$, donde $p > 0$
- **Familia Frank**..... $f(x,y)=\log_p(1+\frac{(p^x-1)(p^y-1)}{p-1})$, donde $p > 0, p \neq 1$

➤ **Página 57, 3.2.6 COMPLEMENTO**

La noción de **complemento** se puede construir a partir del concepto de **negación fuerte** establecido por Trillas en [Trillas79], que dice que una función C de $[0, 1]$ en $[0, 1]$ es una negación fuerte si satisface las siguientes condiciones:

1. $C(0)=1$
2. $C(C(a))=a$ (involución)
3. C es estrictamente decreciente
4. C es continua

Existen varios tipos de operadores que satisfacen las propiedades anteriormente mencionadas, nosotros usaremos principalmente la proporcionada por Zadeh en [Zadeh65], llamada **negación**, negación normal o tradicional.

$$C(x) = 1 - x$$

➤ **Página 58, 3.2.7 COMPARACIÓN**

Los **conjuntos difusos**, definidos a través de una **función de pertenencia**, pueden ser comparados de diferentes formas. A continuación se enumeran varios métodos para la **comparación** de conjuntos difusos utilizados hoy día según [Pedrycz98].

3.2.7.1.- Medida de Distancias

3.2.7.2.- Índices de Igualdad

3.2.7.3.- Medidas de Posibilidad y Necesidad

3.2.7.4.- Medidas de Compatibilidad

3.2.7.4.1.- Propiedades de la Compatibilidad

➤ **Página 59, 3.2.7.1 MEDIDA DE DISTANCIAS**

Este método considera una función de **distancia** entre las **funciones de pertenencia** de dos conjuntos de forma que trate de indicar la proximidad entre ambos. Es importante enfatizar la faceta funcional de los **conjuntos difusos** a través de este método y no tanto la perspectiva teórica de los conjuntos difusos. En general la distancia entre dos conjuntos, A y B, definidos en el mismo **universo del discurso** puede ser definida usando la **Distancia Minkowski**.

$$d(A,B) = \left[\int_x |A(x) - B(x)|^p dx \right]^{1/p} \quad \text{con } p \geq 1$$

Hay dos casos específicos que son muy usuales: la **distancia Hamming** donde $p=1$ y la **distancia euclídea** donde $p=2$

$$d(A,B) = \int_x |A(x) - B(x)| dx \quad \text{Distancia Hamming}$$

$$d(A,B) = \left[\int_x |A(x) - B(x)|^2 dx \right]^{1/2} \quad \text{Distancia Euclídea}$$

En el caso de los **universos de discurso discretos** se usan las funciones de distancia y de **similitud**. Refiriendonos por similitud a la función de menor distancia entre los dos conjuntos difusos, siendo sus expresiones:

$$d_n(A,B) \quad \text{para la distancia.}$$

$$1 - d_n(A,B) \quad \text{para la similitud.}$$

➤ **Página 60, 3.2.7.2 ÍNDICES DE IGUALDAD**

Se basa en la expresión lógica de **igualdad**, es decir, dos conjuntos son iguales si A está incluido en B y B lo está en A. En **conjuntos difusos** la igualdad puede cumplirse con cierto grado, en función de la siguiente expresión:

$$(A \equiv B)(x) = \frac{[A(x) \varphi B(x)] \wedge [B(x) \varphi A(x)] + [\bar{A}(x) \varphi \bar{B}(x)] \wedge [\bar{B}(x) \varphi \bar{A}(x)]}{2}, \text{ con } A(x) \varphi B(x) = \sup_{c \in [0,1]} [A(x) \wedge c \leq B(x)]$$

Donde la **conjunción** (\wedge) se modela por la **norma triangular del mínimo** y la **inclusión** es representada por el operador φ (phi), incluida por una **t-norma** continua. Si tomamos como t-norma el producto acotado con $p=0$ obtenemos:

$$A(x) \varphi B(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } A(x) < B(x) \\ B(x) - A(x) & \text{si } A(x) \geq B(x) \end{cases} \Rightarrow (A \equiv B)(x) = \begin{cases} A(x) - B(x) + 1 & \text{si } A(x) > B(x) \\ B(x) - A(x) + 1 & \text{si } A(x) \geq B(x) \end{cases}$$

Para obtener un único valor para cada valor del conjunto se pueden elegir entre tres **índices** distintos: uno optimista, uno pesimista y un medio, cuyas expresiones se indican en la parte inferior. La relación entre los distintos índices es: $(A \equiv B)_{\text{pes}} \leq (A \equiv B)_{\text{avg}} \leq (A \equiv B)_{\text{opt}}$

Índice de Igualdad Optimista: $(A \equiv B)_{\text{opt}} = \sup_{x \in \Omega} (A \equiv B)(x)$

Índice de Igualdad Medio: $(A \equiv B)_{\text{avg}} = \left(\frac{1}{\text{card}(x)} \right) \int_x (A \equiv B)(x) dx$

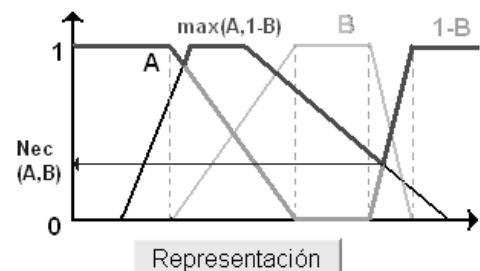
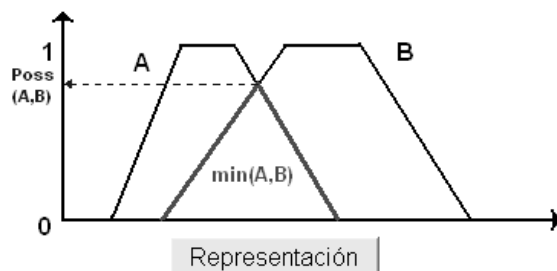
Índice de Igualdad Pesimista: $(A \equiv B)_{\text{pes}} = \inf_{x \in \Omega} (A \equiv B)(x)$

➤ **Página 61, 3.2.7.3 MEDIDAS DE POSIBILIDAD Y NECESIDAD**

Esta técnica utiliza los **conjuntos difusos** como **distribuciones de posibilidad**, donde $A(x)$ mide la **posibilidad** de que el dato buscado sea x , esta noción fue introducida por **Zadeh** en [Zadeh78]. La posibilidad $\text{Poss}(A,B)$ mide en que medida A y B se superponen, mientras que la **necesidad** $\text{Nec}(A,B)$, mide el grado en el que B está incluido en A.

$$\text{Poss}(A,B) = \sup_{x \in \Omega} [\min(A(x), B(x))]$$

$$\text{Nec}(A,B) = \inf_{x \in \Omega} [\max(A(x), 1 - B(x))]$$



Las medidas de posibilidad y necesidad cumplen las siguientes relaciones:

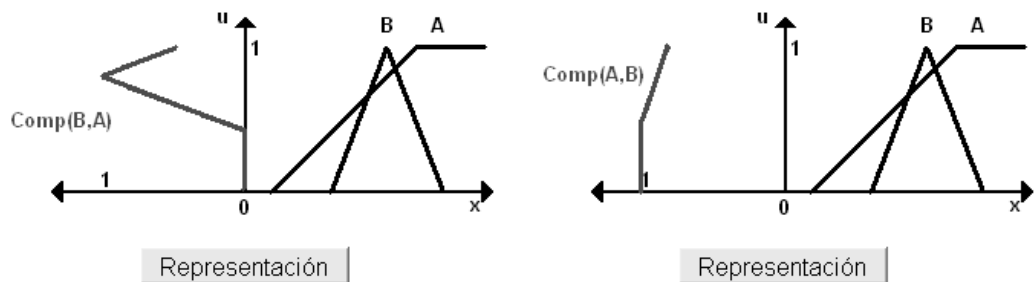
$$\begin{aligned} \text{Poss}(A,B) &= \text{Poss}(B,A) \\ \text{Nec}(A,B) &\neq \text{Nec}(B,A) \\ \text{Nec}(A,B) + \text{Poss}(\bar{A},B) &= 1 \end{aligned}$$

➤ **Página 62, 3.2.7.4 MEDIDAS DE COMPATIBILIDAD**

Usamos esta técnica para obtener en que medida cierto **conjunto difuso** es compatible con otro definido en su mismo espacio. El resultado es un conjunto difuso definido en el intervalo $[0, 1]$, denominado **conjunto difuso de compatibilidad** ($Comp(B, A)$), en el que a cada valor "u" del universo le corresponde el mayor valor de $B(x)$ para los valores de x en que $A(x)=u$.

$$Comp(B, A) = \text{Sup}_{u=A(x)} \{B(x)\}, u \in [0, 1]$$

A continuación se muestran a modo de ejemplo las medidas de compatibilidad entre dos conjuntos difusos A y B. Puede observarse que A es un **concepto difuso** y B un **valor difuso**, y que $comp(B, A)$ no es igual a $comp(A, B)$. Para ver más detalladamente la obtención de cada una de las medidas de compatibilidad pulse el boton "Representación" en el inferior de la pantalla.



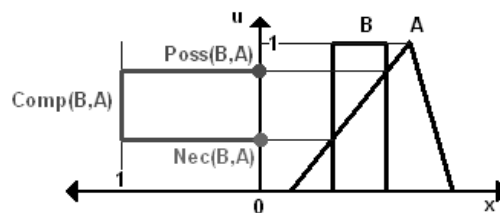
➤ **Página 63, 3.2.7.4.1 PROPIEDADES DE LA COMPATIBILIDAD**

La **medida de compatibilidad** cumple la siguiente tabla de propiedades:

- La compatibilidad es asimétrica: $Comp(A, B) \neq Comp(B, A)$.
- Si $B \subset B'$, entonces $Comp(B, A)(u) \leq Comp(B', A)(u)$.
- $B(x) = \{1, \forall x \in X\} \Rightarrow Comp(B, A)(u) = \{1, \forall u \in [0, 1]\}$.
- $B(x) = \{0, \forall x \in X\} \Rightarrow Comp(B, A)(u) = \{0, \forall u \in [0, 1]\}$.
- $B \subset A$ y están **normalizados** $\Rightarrow Comp(B, A)(0) = 0$ y $Comp(B, A)(u) = 1$. Pueden existir más puntos con compatibilidad 0 y 1.
- $A \subset B$ y están normalizados $\Rightarrow Comp(B, A)(1) = 1$ y $Comp(B, A)(u) = 0 \Leftrightarrow u = 0$.
- Las **medidas de posibilidad y necesidad** entre A y B están incluidas en el soporte de $Comp(B, A)$. En el caso concreto de que B sea un intervalo (vease la imagen inferior) se cumplen las siguientes expresiones:

$$Poss(B, A) = \sup \{ \text{soporte}(Comp(B, A)) \}$$

$$Nec(B, A) = \inf \{ \text{soporte}(Comp(B, A)) \}$$



➤ **Página 64, TEMA 4: RELACIONES DIFUSAS Y NÚMEROS DIFUSOS**

- 4.1.- Relaciones Difusas
 - 4.1.1.- Ejemplo sobre Relaciones Difusas
- 4.2.- Operaciones con Relaciones Difusas
 - 4.2.1.- Operaciones de Conjuntos
 - 4.2.2.- Composición de Relaciones Difusas
 - 4.2.3.- Proyección Cilíndrica
 - 4.2.3.1.- Ejemplo sobre Proyección Cilíndrica
 - 4.2.4.- Extensión Cilíndrica
 - 4.2.4.1.- Ejemplo sobre Extensión Cilíndrica
- 4.3.- Números Difusos
- 4.4.- Número Difuso Trapezoidal Normalizado
- 4.5.- El Principio de Extensión
 - 4.5.1.- Generalización del Principio de Extensión
- 4.6.- Aritmética Difusa

➤ **Página 65, 4.1 RELACIONES DIFUSAS**

Una **relación clásica** puede ser considerada como un **conjunto de tuplas**, donde cada tupla es un par ordenado, que puede ser descrita por una **función característica**. Del mismo modo, una **relación difusa** es un **conjunto difuso** de tuplas, cuya función característica es extendida al intervalo $[0, 1]$.

Sean U y V dos **universos** no finitos (continuos) y $\mu_R : U \times V \rightarrow [0, 1]$, entonces se define el término relación difusa R como:

$$R = \int_{U \times V} \mu_R(u, v) / (u, v)$$

Es importante enfatizar que una relación abarca funciones pero no en el sentido contrario, es decir, todas las relaciones son funciones, pero no todas las funciones son relaciones. Además, hay que tener en cuenta que las funciones tienen una dirección de construcción implícita, del modo que una relación es una función $f: X \rightarrow Y$ si y solo si:

$$\forall x \in X \exists! y \in Y \quad R(x, y) = 1$$

En contraste, las relaciones poseen una dirección libre, lo que las convierte en un importante concepto y hace la computación con relaciones muy distinta a la de funciones. Las relaciones difusas generalizan el concepto de relación al admitir la noción de pertenencia parcial entre los puntos de un universo de discurso. Debido a lo complejo de la terminología, este concepto se puede aclarar en el ejemplo de la página siguiente.

➤ **Página 66, 4.1.1 EJEMPLO SOBRE RELACIONES DIFUSAS**

Tomese como ejemplo de **relación difusa** en \mathfrak{R}^2 (**relación binaria**) "aproximadamente igual", con la siguiente **función de pertenencia** definida:

$$1/(1,1) + 1/(2,2) + 1/(3,3) + 0.8/(1,2) + 0.8/(2,3) + 0.8/(2,1) + 0.8/(3,2) + 0.3/(1,3) + 0.3/(3,1)$$

La relación difusa "x aproximadamente igual a y" correspondiente a esta función de pertenencia es:

$$R(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{si } x=y \\ 0.8, & \text{si } |x-y|=1 \\ 0.3, & \text{si } |x-y|=2 \end{cases}$$

Cuando el **universo de discurso** es **finito**, una notación matricial puede ser bastante útil para representar la relación, como se muestra a continuación:

	Y		
	1	0.8	0.3
X	0.8	1	0.8
	0.3	0.8	1

➤ **Página 67, 4.2 OPERACIONES CON RELACIONES DIFUSAS**

Las definiciones de operaciones básicas sobre **relaciones difusas** están estrechamente ligadas a las operaciones sobre **conjuntos difusos**. Para ilustrarlo la definición es especificada por dos relaciones difusas como argumentos: R, W, P, ..., definidas en X x Y.

4.2.1.- Operaciones de Conjuntos

4.2.2.- Composición de Relaciones Difusas

4.2.3.- Proyección Cilíndrica

4.2.3.1.- Ejemplo sobre Proyección Cilíndrica

4.2.4.- Extensión Cilíndrica

4.2.4.1.- Ejemplo sobre Extensión Difusa

➤ **Página 68, 4.2.1 OPERACIONES DE CONJUNTOS**

Todas las operaciones sobre **conjuntos difusos** están definidas también para **relaciones difusas**. De estas operaciones, las más importantes son:

$$\begin{aligned}
 \text{Unión} & \quad (R \cup W)(x,y) = R(x,y) \text{ s } W(x,y) \\
 \text{Intersección} & \quad (R \cap W)(x,y) = R(x,y) \text{ t } W(x,y) \\
 \text{Complemento} & \quad \neg R(x,y) = 1 - R(x,y) \\
 \text{Inclusión} & \quad R \subset W \quad R(x,y) \leq W(x,y) \\
 \text{Igualdad} & \quad R = W \quad R(x,y) = W(x,y)
 \end{aligned}$$

Donde "s" y "t" son cualquier **s-norma** y **t-norma** con x en X y con y en Y.

➤ **Página 69, 4.2.2 COMPOSICIÓN DE RELACIONES DIFUSAS**

Las operaciones difusas pueden ser compuestas con la adición de diferentes operadores sobre conjuntos. Se asume que R, G y W son **relaciones difusas** definidas en los productos cartesianos $X \times Y$, $X \times Z$, $Z \times Y$ respectivamente. Entonces R puede definirse como una combinación de G y W:

$$\text{Sup - t Composición } (R = G \square W) \rightarrow R(x,y) = \text{Sup}_{z \in Z} [G(x,z) \text{ t } W(z,y)]$$

$$\text{Inf - s Composición } (R = G \diamond W) \rightarrow R(x,y) = \text{Inf}_{z \in Z} [G(x,z) \text{ s } W(z,y)]$$

Para los casos particulares del **mínimo** y el **máximo**, la notación queda de la siguiente forma:

$$\text{Sup - Min Composición } (R = G \circ W) \rightarrow R(x,y) = \text{Sup}_{z \in Z} [G(x,z) \wedge W(z,y)]$$

$$\text{Inf - Max Composición } (R = G \bullet W) \rightarrow R(x,y) = \text{Inf}_{z \in Z} [G(x,z) \vee W(z,y)]$$

➤ **Página 70, 4.2.3 PROYECCIÓN CILÍNDRICA**

La **proyección cilíndrica**, junto con la **extensión cilíndrica** son dos operaciones muy importantes en **relaciones difusas**. Se usan para afectar al tamaño de las relaciones difusas sobre las que operan. Tomando como relación difusa R definida en $X \times Y$ se tiene que:

La proyección de R en X es definida como: $R_{IX}(x) = \text{Proj}_X R(x) = \sup_{y \in Y} R(x,y), \quad x \in X$

La proyección de R en Y es definida como: $R_{IY}(y) = \text{Proj}_Y R(y) = \sup_{x \in X} R(x,y), \quad y \in Y$

Esta operación reduce la dimensión de la relación, así el operador de proyección permite trasladar una **relación terciaria** a una **binaria**, una binaria a un **conjunto difuso** o un conjunto difuso a un **valor crisp** (puntual). El operador de proyección puede ser interpretado en el marco de la **Sup - t composición**, cuando el conjunto difuso A en X asume el valor 1 idénticamente sobre todo su espacio, o sea:

$$Y(y) = (A \circ R)(y) = \sup_{x \in X} [A(x) \wedge R(x,y)] = \sup_{x \in X} R(x,y)$$

➤ **Página 71, 4.2.3.1 EJEMPLO SOBRE PROYECCIÓN CILÍNDRICA**

Sea R la siguiente **relación difusa**:

	Y1	Y2	Y3	Y4
X1	0.8	1	0.1	0.7
X2	0	0.8	0	0
X3	0.9	1	0.7	0.8

La **proyección** de R sobre X es una columna en la que cada X_i toma el mayor valor de las **tuplas** correspondientes a esa fila, mientras que la proyección de R sobre Y es una fila en la que cada Y_i toma el máximo valor de las tuplas de cada columna, quedando del siguiente modo:

	Y1	Y2	Y3	Y4	Proj. en X	La expresión algebraica de lo reflejado en la tabla será:
X1	0.8	1	0.1	0.7	1	Proj. de R sobre X= $1/X1 + 0.8/X2 + 1/X3$ Proj. de R sobre Y= $0.9/Y1 + 1/Y2 + 0.7/Y3 + 0.8/Y4$ Proj. Total de R = 1
X2	0	0.8	0	0	0.8	
X3	0.9	1	0.7	0.8	1	
Proj. en Y	0.9	1	0.7	0.8	Proj.Total=1	

Observando los datos se ve con claridad que el valor de la Proyección total sobre R será el mismo que el del elemento de mayor valor de R

➤ **Página 72, 4.2.4 EXTENSIÓN CILÍNDRICA**

El operador de **extensión cilíndrica** se considera el operador opuesto al de **proyección**, es decir que extiende los **conjuntos difusos** a **relaciones binarias**, estas a **terciarias**, etc. Se usa con el objetivo concreto: cuando no es posible calcular la **intersección** de un conjunto difuso A definido sobre el **universo** X y una **relación** R definida sobre el producto cartesiano X x Y.

Esta operación se puede realizar extendiendo A a dicho producto cartesiano. Así la extensión cilíndrica en X x Y de cualquier A en X es una relación difusa, llamada (Cyl.A), con la siguiente **función de pertenencia**:

$$(Cyl.A)(x,y)=A(x), \text{ para todo } y \in Y$$

➤ **Página 73, 4.2.4.1 EJEMPLO SOBRE EXTENSIÓN CILÍNDRICA**

Considerando de nuevo la **relación difusa** R usada en el ejemplo sobre **proyección cilíndrica** de la pagina 72, y el **conjunto difuso** A, que expresa x es pequeño, expresado por:

	Y1	Y2	Y3	Y4
X1	0.8	1	0.1	0.7
X2	0	0.8	0	0
X3	0.9	1	0.7	0.8

$$A = 0.3/X1 + 1/X2 + 0.8/X3$$

La combinación de la relación difusa R y el conjunto difuso A puede venir dada por la **intersección** de R con la **extensión** de A (a esta doble operación se la denomina **composición**), para ello primero calculamos Cyl(A), para luego calcular la intersección mediante la **t - norma del mínimo**:

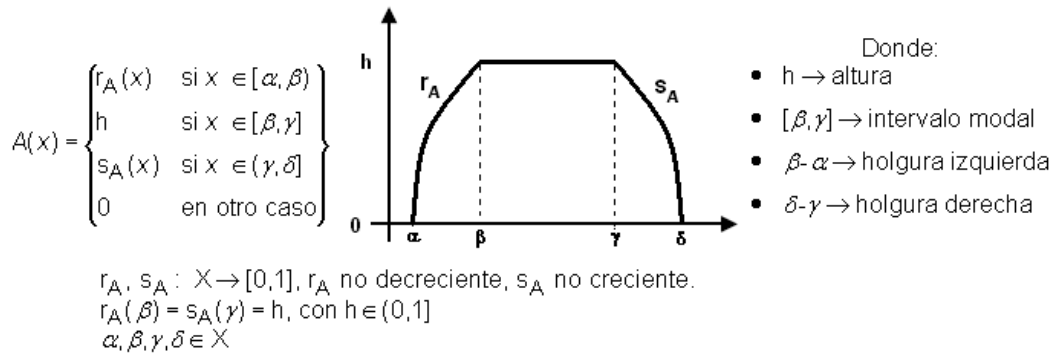
Cyl. (A)					R ∩ Cyl. (A)				
	Y1	Y2	Y3	Y4		Y1	Y2	Y3	Y4
X1	0.3	0.3	0.3	0.3	X1	0.3	0.3	0.1	0.3
X2	1	1	1	1	X2	0	0.8	0	0
X3	Expresiones de la Extensión Cilíndrica de A y de su intersección con R					0.8	0.7	0.8	

➤ **Página 74, 4.3 NÚMEROS DIFUSOS**

El concepto **número difuso** fue introducido por **Zadeh** con el propósito de analizar y manipular valores numéricos aproximados, por ejemplo: "próximo a 0" "casi 5". El concepto se ha ido reformando hasta llegar a la definición introducida por **Dubois**:

"Sea A un **subconjunto difuso** del **universo de discurso** X y A(x) su **función de pertenencia**. Se puede considerar que A es un número difuso si: A(x) es una **función de pertenencia convexa**, A(x) es **semicontinua superiormente** y El **soporte** de A es un conjunto acotado."

La forma general de la función de pertenencia de un número difuso A, es la siguiente:

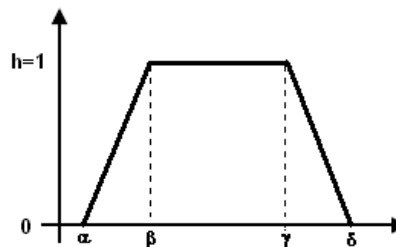


➤ **Página 75, 4.4 NÚMERO DIFUSO TRAPEZOIDAL NORMALIZADO**

Generalmente se usará el caso particular de los **números difusos** que se obtienen cuando consideramos las **funciones** como **lineales**. En este caso la **función de pertenencia** queda del siguiente modo:

$$A(x) = \begin{cases} h + \frac{(x - \beta)h}{\beta - \alpha} & \text{si } x \in [\alpha, \beta) \\ h & \text{si } x \in [\beta, \gamma] \\ h + \frac{(x - \gamma)h}{\delta - \gamma} & \text{si } x \in (\gamma, \delta] \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

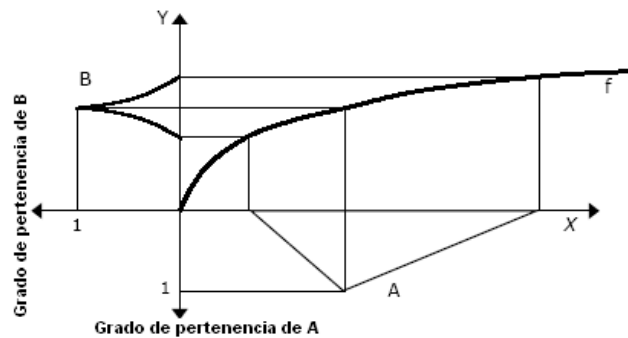
A un número difuso de este modo lo llamaremos triangular o **trapezoidal**. Usualmente usaremos los **números difusos normalizados** en los que $h=1$, en este caso podremos caracterizarlo $A = (\alpha, \beta, \gamma, \delta)$, ya que estos parámetros son realmente imprescindibles



➤ **Página 76, 4.5 EL PRINCIPIO DE EXTENSIÓN**

El Principio de extensión, introducido por el profesor **Zadeh** en [Zadeh75], es una de las herramientas más importantes de la teoría de conjuntos difusos. Es usado para transformar **conjuntos difusos** que tengan iguales o distintos **universos de discurso**, según una **función de transformación** en esos universos. Sean X e Y dos universos de discurso, f una función de transformación tal que $f: X \rightarrow Y$, y A un conjunto difuso en X . El **principio de extensión** sostiene que la imagen de A en Y , bajo la función f es un conjunto difuso $B=f(A)$, definido como:

$$B(y) = \sup\{A(x) \mid x \in X, y = f(x)\}$$



➤ **Página 77, 4.5.1 GENERALIZACIÓN DEL PRINCIPIO DE EXTENSIÓN**

Se puede generalizar el **principio de extensión** para el caso en que el **universo de discurso** X sea el producto cartesiano de n universos:

Sea X un producto cartesiano de universos tal que $X=X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, A_1, A_2, \dots, A_n , n **conjuntos difusos** para cada uno de los n universos correspondientes y f una función tal que $f: X \rightarrow X'$. Un conjunto difuso B viene definido por:

$$B = \int_{X'} B(y) / y$$

Donde $y = f(A_1, A_2, \dots, A_n)$ ($y \in X'$) y $B(y) = \sup_{\substack{x_1, \dots, x_n \\ f(x_1, \dots, x_n) = y}} \min(A_1(x_1), \dots, A_n(x_n))$ si $f^{-1}(y) \neq \emptyset$

en cualquier otro caso $B(y) = 0$

A continuación se muestra un ejemplo: Sean X e Y , ambos universos dentro del conjunto de los números naturales:

- Si f es la función sumar 4: $y = f(x) = x + 4$ y A un conjunto difuso tal que $A = 0.1/2 + 0.4/3 + 1/4 + 0.6/5$, El conjunto difuso B que obtendremos de la extensión de A en f será: $B = f(A) = 0.1/6 + 0.4/7 + 1/8 + 0.6/9$.
- Si f es la función suma (x_1, x_2) , $y = f(x) = x_1 + x_2$ y A_1 y A_2 dos conjunto difusos tales que $A_1 = 0.1/2 + 0.4/3 + 1/4 + 0.6/5$ y $A_2 = 0.4/5 + 1/6$, El conjunto difuso B que obtendremos de la extensión de A_1 y A_2 en f será: $B = f(A) = 0.1/7 + 0.4/8 + 0.4/9 + 1/10 + 0.6/11$.

➤ **Página 78, 4.6 ARITMÉTICA DIFUSA**

Gracias al **principio de extensión** es posible extender las operaciones aritméticas clásicas al tratamiento de **números difusos**. Dadas dos cantidades difusas A_1 y A_2 , las cuatro operaciones principales que obtenemos son la **suma extendida**, la **diferencia extendida**, el **producto extendido** y la **división extendida**. A continuación se muestran sus expresiones:

- Suma Extendida: $(A_1 + A_2)(y) = \text{Sup}\{\text{Min}(A_1(y-x), A_2(x)) / x \in X\}$
- Diferencia Extendida $(A_1 - A_2)(y) = \text{Sup}\{\text{Min}(A_1(y+x), A_2(x)) / x \in X\}$
- Producto Extendido $(A_1 \cdot A_2)(y) = \begin{cases} \text{Sup}\{\text{Min}(A_1(z/y), A_2(y)) / x \in (X - \{0\})\} & \text{si } z \neq 0 \\ \max(A_1(0), A_2(0)) & \text{si } z=0 \end{cases}$
- División Extendida: $(A_1 \div A_2)(y) = \text{Sup}\{\text{Min}(A_1(yz), A_2(y)) / x \in X\}$

➤ **Página 79, TEMA 5: CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL**

- 5.1.- Introducción Histórica al Control
- 5.2.- Terminología Básica
- 5.3.- Diagrama de Bloques de un Sistema de Control Genérico
- 5.4.- Ejemplo de Sistema Controlado
- 5.5.- Clasificación de los Controladores
- 5.6.- Sistemas Matemáticos de Control

➤ **Página 80, 5.1 INTRODUCCIÓN HISTÓRICA AL CONTROL**

Los orígenes históricos del **control automático** se remontan al siglo XVIII cuando el británico **James Watt** (1736-1819) realizó el primer trabajo significativo en esta materia: un regulador de velocidad centrífugo para el control de la velocidad de una máquina de vapor.

Desde entonces la teoría de control ha evolucionado enormemente, pasando de la **teoría clásica**, que trata los sistemas con una única entrada y salida o **función de transferencia**, a la **teoría de control moderna**, basada en el análisis, en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de **variables de estados**, según explica el profesor K. Ogata en su texto "Ingeniería de control moderno" [Ogata03].

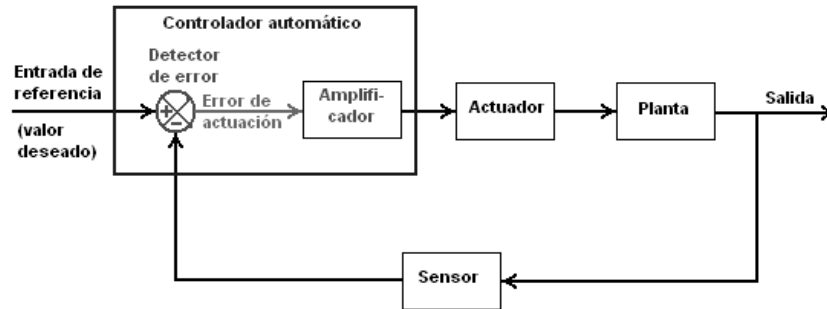
➤ **Página 81, 5.2 TERMINOLOGÍA BÁSICA**

Existen diez términos básicos que establecen una pequeña parte de la jerga utilizada en los sistemas de **control** y son:

- 1. Variable Controlada (VC)** : Cantidad o condición que se mide y controla, normalmente será la salida (resultado).
- 2. Variable Manipulada (VM)** : Cantidad o condición que el **controlador** modifica para afectar el valor de la variable controlada.
- 3. Controlar** : Medir el valor de la VC mediante un **sensor** y modificar la VM al sistema mediante un **actuador** para obtener el valor deseado .
- 4. Plantas** : Cualquier objeto físico que se va a controlar.
- 5. Procesos** : Cualquier operación que se va a controlar.
- 6. Sistemas** : Combinación de componentes que actúan juntos para conseguir un objetivo determinado.
- 7. Perturbaciones** : Señal que tiende a afectar negativamente al valor de salida de un sistema.
- 8. Control realimentado (negativo)** : Operación que en presencia de perturbaciones impredecibles tiende a reducir la diferencia entre la salida y la entrada de referencia de un sistema.
- 9. Sistemas de control en lazo cerrado** : Se trata de un sistema realimentado, que usa la diferencia entre la salida y la entrada de referencia como medio de control.
- 10. Sistemas de control en lazo abierto** : Es un sistema en el que la salida no afecta a la acción de control, esta solo se basa en la entrada de referencia y no elimina los efectos negativos de las perturbaciones.

➤ **Página 82, 5.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL GENÉRICO**

Como se visualiza en la siguiente imagen, un **sistema básico de control en lazo cerrado** está formado por un **controlador automático**, un **actuador**, una **planta** y un **sensor**.



El controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado) mediante un detector de error, determina la desviación y produce una **señal de control** (error de actuación) que la reduce a cero o a un valor cercano mediante la denominada **acción de control**. La señal de error de actuación, por lo general, está a un nivel de potencia muy bajo, por lo cual el controlador incluye un amplificador que consigue un nivel de potencia lo suficientemente alto.

➤ **Página 83, 5.4 EJEMPLO DE SISTEMA CONTROLADO**

Un ejemplo de **sistema de control industrial realimentado** se puede considerar un avión (**planta**) con piloto automático (**controlador automático**). Su objetivo es mantener una dirección específica del avión, a pesar de los cambios atmosféricos (**perturbaciones**). El sistema ejecutará su tarea midiendo continuamente la dirección instantánea del avión (**sensores**) y ajustando automáticamente las superficies de dirección del mismo (timón, aletas, etc. que son los **actuadores**) de modo que la dirección instantánea coincida con la especificada (**señal de entrada de referencia**) como se muestra en la siguiente imagen:



➤ **Página 84, 5.5 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTROLADORES**

Según el profesor Ogata en [Ogata03], de acuerdo con sus **acciones de control** podríamos clasificar los **controladores automáticos** de en:

1. De dos posiciones o de encendido y apagado (**controlador on - off**).
2. Proporcionales (**controlador P**).
3. Integrales (**controlador I**).
4. Proporcionales-Integrales (**controlador PI**).
5. Proporcionales-Derivativos (**controlador PD**).
6. Proporcionales-Integrales-Derivativos (**controlador PID**).

➤ **Página 85, 5.6 SISTEMAS MATEMÁTICOS DE CONTROL**

A la hora de describir un **sistema** es recomendable obtener un **modelo matemático** del mismo, el cual se define como un **conjunto** de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión. Normalmente la dinámica se describe en terminos de ecuaciones diferenciales que se obtienen a partir de las leyes físicas que gobiernan el sistema. Para un mismo sistema se pueden obtener distintos modelos matemáticos, dependiendo de la perspectiva.

Un sistema moderno posee muchas entradas y salidas que se relacionan entre sí de forma compleja, por lo que es esencial reducir la complejidad de las expresiones matemáticas mediante el uso de un ordenador o usando el **método de análisis de Liapunov**, útil para abordar los problemas de estabilidad de los sistemas no lineales y/o variantes con el tiempo recomendado en [Ogata03].

Con el tiempo se ha demostrado que los operadores humanos pueden controlar un proceso complejo de manera más eficaz que un sistema automático, basándose en su experiencia. Por lo que investigar las estrategias de **control** de estos operarios e implementarlas en sistemas controlados mediante el uso de la **lógica difusa (control difuso)** se ha convertido en una alternativa más.

La lógica difusa es, de hecho, una herramienta matemática que nos facilita utilizar conceptos imprecisos tal y como son las **reglas de control** que suelen utilizar los operarios **expertos** a los que nos referíamos antes.

➤ **Página 86, TEMA 6: CONTROLADORES DIFUSOS**

6.1.- Introducción	6.5.- Motor de Inferencia
6.2.- Componentes de un Controlador Difuso	6.5.1.- Razonamiento Aproximado
6.2.1.- Estructura de un Controlador Difuso	6.5.2.- Modus Ponens
6.3.- Módulo Difuminador	6.5.3.- Regla Composicional de Inferencia
6.3.1.- Funciones del Módulo Difuminador	6.5.3.1.- Regla Composicional de Inferencia 2
6.3.2.- Proceso de Difuminación o Codificación	6.5.4.- S-implicaciones
6.3.3.- Ejemplo de Difuminación(1)	6.5.5.- R-implicaciones
6.3.4.- Ejemplo de Difuminación(2)	6.5.6.- QM-implicaciones
6.4.- Base del Conocimiento	6.5.7.- T-normas como Funciones de Implicación
6.4.1.- Funciones de la Base del Conocimiento	6.5.8.- Funcionamiento del motor de Inferencia
6.4.2.- Proposiciones Difusas del Conjunto de Reglas	6.5.8.1.- Cálculos que se Realizan con Reglas Difusas
6.4.2.1.- Proposiciones Difusas Básicas: And, Or y Not	6.5.8.2.- Operadores que Influyen en la Inferencia
6.4.2.2.- Proposiciones Difusas Cualificadas y Cuantificadas	6.5.8.3.- Ejemplo
6.4.3.- Sentencias Difusas Si-Entonces	6.5.8.4.- Resumen del Proceso general de Inferencia
6.4.4.- Tipos de Reglas	6.6.- Módulo Concesor
6.4.4.1.- Reglas con Excepciones	6.6.1.- Funcionalidad del Módulo Concesor
6.4.4.2.- Reglas Graduales	6.6.2.- Métodos de Concesión
6.4.4.3.- Reglas Conflictivas	6.6.2.1.- Valores Representativos de un Conjunto Difuso
6.4.4.4.- Reglas de Evaluación del Estado del Proceso	6.6.2.1.1.- Punto de Máximo Criterio - G
6.4.4.5.- Reglas de Control Difuso para la Evaluación de Objetos	6.6.2.1.2.- Centro de Gravedad - W
6.4.5.- Fuente y Obtención de las Reglas de Control Difuso	6.6.2.1.3.- Área - S
6.4.5.1.- Experiencia de Expertos	6.6.2.1.4.- Altura - H
6.4.5.2.- Acciones de Control de Operadores Adiestrados	6.6.2.2.- Métodos del Grupo A (1)
6.4.5.3.- Modelo Difuso de un Proceso	6.6.2.3.- Métodos del Grupo A (2)
6.4.5.4.- Aprendizaje	6.6.2.4.- Métodos del Grupo B (1)
	6.6.2.5.- Métodos del Grupo B (2)

➤ **Página 87, 6.1 INTRODUCCIÓN**

Como se ha comentado en el capítulo anterior, para los **sistemas** complejos en los que los operadores humanos con experiencia controlan el sistema mejor que un **controlador industrial automático** se puede utilizar un **controlador difuso**. Mediante el uso de **conjuntos difusos** podemos convertir las **reglas de control** basadas en la experiencia humana en estrategias de control automáticas.

Se podría decir que un controlador difuso es un algoritmo de control que se basa en una colección de reglas de control lingüísticas que constituyen el protocolo de control. Estas reglas expresan las relaciones cruzadas que existen entre las **variables de medida del proceso** y las **variables de control**. Dichas reglas están relacionadas entre sí por medio de una **implicación difusa** y una **regla composicional de inferencia**, junto con un **módulo concesor** (defuzzification), es decir, un mecanismo que traduce la acción de control difusa en una no difusa (concreta).

De forma inversa al de concreción se puede encontrar un **módulo difuminador** (fuzzification) que difumina los datos reales de entrada para convertirlos en valores lingüísticos difusos.

➤ **Página 88, 6.2 COMPONENTES DE UN CONTROLADOR DIFUSO**

A continuación se enumerarán los elementos que componen un controlador basado en conocimiento difuso o FKBC (Fuzzy Knowledge Based Controller), esta estructura fue propuesta por **Driankov** en [Driankov96]. Hay que diferenciar los elementos usados para el diseño del controlador (**flujo de información**), de los que componen la parte funcional del controlador (**flujo computacional**).

El flujo de información está compuesto por:

- **Base de reglas.**
- **Base de datos.**

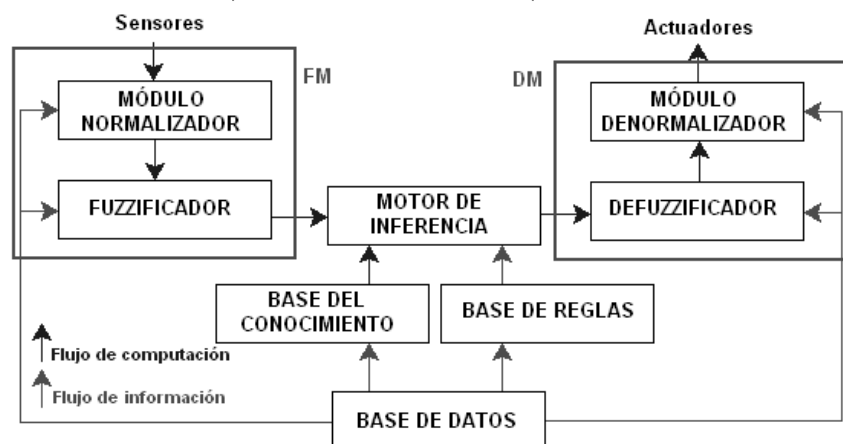
Por otro lado flujo computacional se compone de:

- **Difuminador** (fuzzificador).
 - **Módulo de normalización** (opcional).
 - **Base del conocimiento.**
 - **Motor de Inferencia.**
 - **Concesor** (defuzzificador).
 - **Módulo de denormalización** (opcional).
- } **Módulo Difuminador**
- } **Módulo Concesor**

Hay que tener en cuenta que los módulos de normalización y denormalización son opcionales, y se encargan del tratamiento de las señales que entran y salen del controlador. La disposición de todos los elementos se puede observar en la página siguiente.

➤ **Página 89, 6.2.1 ESTRUCTURA DE UN CONTROLADOR DIFUSO**

Como se observa en el diagrama, el **fuzzificador** y el **módulo de normalización** se pueden unificar en un único bloque, conocido como **módulo difuminador** (fuzzification module, FM). Lo mismo ocurre entre el **defuzzificador** y el **módulo de denormalización**, que se pueden unir para formar el **módulo concesor** (defuzzification module, DM).



Desde un punto de vista funcional la estructura de un **controlador difuso** queda reducida a los bloques del **flujo computacional**, que se estudiarán en los siguientes apartados.

➤ **Página 90, 6.3 MÓDULO DIFUMINADOR**

La teoría sobre el **módulo difuminador** de un **controlador difuso** (fuzzification module) se desarrolla en los siguientes apartados:

- 6.3.1.- Funciones del Módulo Difuminador
- 6.3.2.- Proceso de Difuminación o Codificación
- 6.3.3.- Ejemplo de Difuminación(1)
- 6.3.4.- Ejemplo de Difuminación(2)

➤ **Página 91, 6.3.1 FUNCIONES DEL MÓDULO DIFUMINADOR**

El **módulo difuminador** desarrolla dos funciones:

- 1.- Es el encargado de generar el escalado entre los valores físicos de las **variables de medida del proceso** a un **universo de discurso** normalizado, a través del **módulo de normalización**. Esta funcionalidad es opcional.
- 2.- Principalmente la función de este elemento es la realizada por el **fuzzificador**, recibe múltiples entradas concretas (**entradas crisp**) que llegan al sistema y los asocia con una **etiqueta lingüística** (temperatura, humedad, altura, etc.). De forma que a cada valor concreto de entrada se le asignará un **grado de pertenencia** a cada uno de los **conjuntos difusos** que estén definidos sobre el **universo de discurso** correspondiente a esa etiqueta lingüística (dentro de la etiqueta de temperatura, un valor toma distintos grados de pertenencia para los conjuntos temperatura alta, baja, media, etc.).

Básicamente, se puede decir que, el módulo difuminador actúa como un conversor escalar-difuso.

➤ **Página 92, 6.2.3 PROCESO DE DIFUMINACIÓN O CODIFICACIÓN**

El proceso consiste en crear, dentro del **universo de discurso** de la **etiqueta lingüística**, un **conjunto difuso** centrado con respecto al **valor crisp** de entrada para cada una de las variables medidas en ese instante de tiempo.

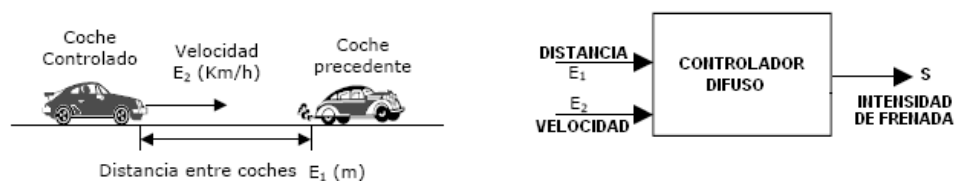
El valor más sencillo de difuminación es el denominado **singleton**, el cual consiste en emplear el propio **valor crisp** de entrada, es decir, no se difumina ya que el valor crisp será el único valor del **soporte** y del **núcleo** del conjunto difuso.

Posteriormente se procederá a realizar la comparación entre las etiquetas que conforman el universo de la variable y la entrada difuminada. De esta forma se obtendrá una **medida de posibilidad** para cada etiqueta, expresando en qué medida el valor actual es similar o pertenece a las etiquetas. Este concepto puede ser generalizado a cualquier **t-norma**. El valor de posibilidad será utilizado por el **motor de inferencia** en los **antecedentes** de las **reglas de control** que hagan mención a dicha variable.

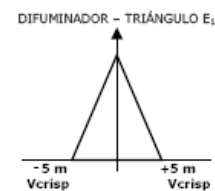
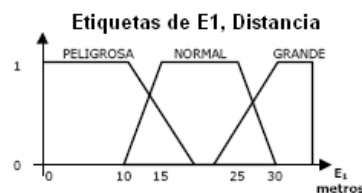
En definitiva, el objetivo de este proceso es codificar los valores de entrada de forma que puedan ser empleados por el motor de inferencia.

➤ **Página 93, 6.3.3 EJEMPLO DE DIFUMINACIÓN (1)**

Supongamos un caso hipotético de conducción tal que se pretende controlar la distancia entre dos vehículos a través de la velocidad y la distancia entre coches (**variables de estado** o de entrada) y de la intensidad de frenada (**variable de control** o salida).



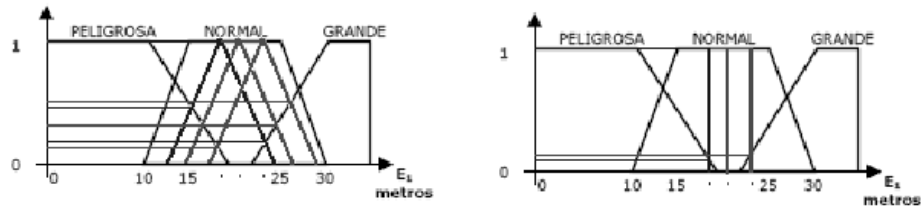
Para ilustrar la fase de difuminación tomamos la variable de entrada E1 (distancia entre coches), a la que se le han considerado 3 etiquetas (peligrosa, normal y grande). Se ha optado por un difuminador de tipo **función triangular**, elegido por tener el sensor un margen de error de 5 metros. Dejando a un lado la variable velocidad, aunque en un caso real habría que tenerla en cuenta porque el concepto distancia peligrosa depende de la velocidad del vehículo en cada instante.



➤ **Página 94, 6.3.4 EJEMPLO DE DIFUMINACIÓN (2)**

Puede parecer extraño difuminar un **valor crisp** conocido (el de entrada) pues al difuminar estamos perdiendo información bien conocida. Las ventajas de la difuminación son, por una parte corregir errores en las entradas (fallos en los **sensores**, entre otros), y también hacer que se lancen o ejecuten más reglas. Para mostrarlo con claridad se obtendrán los datos usando como difuminador la propia entrada (valor crisp o singleton).

Considerando las distancias instantaneas tales que $E1=18\text{ m}$ (D1), $E1=20\text{ m}$ (D2) y $E1=23\text{ m}$ (D3), usando los dos difuminadores mencionados y comparandolos con las etiquetas obtenemos los siguientes resultados:



Dejando a un lado los resultados matemáticos, si miramos las imagenes podemos observar que en el caso de los difuminadores triangulares obtenemos muchos más datos y más representativos que en el caso de los singleton. Por ejemplo para el caso de la distancia **D3(23m)**, el triangular posee una distancia normal con valor 1, una distancia peligrosa con valor 0.2 y una distancia grande con valor 0.5, en el caso del singleton no se considera para nada distancia peligrosa, y se considera distancia normal con valor 1 y grande con valor 0.2.

➤ **Página 95, 6.4 BASE DEL CONOCIMIENTO**

Un **sistema difuso** se caracteriza por un conjunto de sentencias lingüísticas que expresan el conocimiento **experto**. El conjunto de **reglas de control** forman la **Base de Conocimiento**, y contienen la inteligencia asociada al dominio de la aplicación y los objetivos de control. Para explicar la base del conocimiento veremos los siguientes apartados:

- 6.4.1.- Funciones de la Base del Conocimiento
- 6.4.2.- Propositiones Difusas del Conjunto de Reglas
- 6.4.3.- Sentencias Difusas Si-Entonces
- 6.4.4.- Tipos de Reglas
- 6.4.5.- Fuente y Obtención de las Reglas de Control Difuso

➤ **Página 96, 6.4.1 FUNCIONES DE LA BASE DEL CONOCIMIENTO**

Como se muestra en [Lee90], la **base del conocimiento** posee dos funciones principales:

1. – Proporciona las definiciones necesarias para determinar las **reglas lingüísticas de control** y la manipulación de los datos difusos del controlador.
2. – Almacena los objetivos y criterios de control del dominio de los **expertos** mediante un conjunto de reglas lingüísticas de control.

Dicho conjunto de reglas lingüísticas de control se expresa, por lo general, mediante **sentencias difusas SI -ENTONCES** (if-then) que se implementan fácilmente por sentencias condicionales difusas en términos de la **lógica difusa** (por ejemplo: "**SI** la temperatura es alta **ENTONCES** abrir la ventana mucho").

➤ **Página 97, 6.4.2 PROPOSICIONES DIFUSAS DEL CONJUNTO DE REGLAS**

El **razonamiento eproximado** es usado y fundamentado con conocimiento expresado en **proposiciones atómicas**, las cuales son expresadas en un lenguaje natural, por ejemplo, "la temperatura es elevada". Cuando dicha proposición contiene atributos con imprecisión, su expresión atómica será definida por un **conjunto difuso** o su correspondiente **función de pertenencia** (elevada) y la **variable física** (temperatura).

Basado en la notación de **proposiciones atómicas** y conectivos lingüísticos (como and, or, o not) y la implicación **si - entonces** (if-then), se pueden formar complejas **proposiciones difusas**, también denominadas **proposiciones bien formadas** (well-formed propositions). Los siguientes apartados muestran los distintos tipos de proposiciones difusas:

6.4.2.1.- Propocisiones Difusas Básicas: And, Or y Not

6.4.2.2.- Propocisiones Difusas Cualificadas y Cuantificadas

➤ **Página 98, 6.4.2.1 PROPOSICIONES DIFUSAS BÁSICAS: AND, OR Y NOT**

En el caso de la **conjunción AND**, si se consideran dos **proposiciones atómicas** "X es A" y "X es B", donde A y B son dos **conjuntos difusos** definidos en el mismo **universo de discurso** de la **variable física** X, entonces la conjunción expresa:

$$\text{"X es A" AND "X es B"} \Leftrightarrow X \text{ es } A \cap B \text{ (intersección, usando una t-norma)}$$

Esta expresión esta definida para cualquier tipo de **t - norma**. Cuando las proposiciones atómicas sean definidas para dominios distintos, el significado de la conjunción será representado como una **relación difusa**.

El caso de la **disyunción** es el mismo, solo que la expresión estará definida por una **s - norma**

$$\text{"X es A" OR "X es B"} \Leftrightarrow X \text{ es } A \cup B \text{ (unión, usando una s-norma)}$$

Y para la **negación**

$$\text{"X no es A"} \Leftrightarrow X \text{ es } \neg A \text{ (}\neg A \text{ es el complemento o negación de A)}$$

➤ **Página 99, 6.4.2.2 PROPOSICIONES DIFUSAS CUALIFIADAS Y CUANTIFICADAS**

Las **proposiciones difusas cualificadas** (qualified propositions) añaden un grado o **etiqueta lingüística** a la **proposición atómica** que forma una regla. Pueden ser proposiciones cualificadas: **grados de certeza** (verdad, falso, casi verdad...), **grados de posibilidad** (posible, poco posible...), **grados de probabilidad** (probable, poco probable, normalmente...). Ejemplos de expresiones que usan estas proposiciones son:

- Es posible que si llueve entonces se llene el depósito.
- Probablemente si la temperatura sigue ascendiendo entonces las plantas se sequen .
- Si temperatura es baja entonces regar mucho es casi falso.

Las **proposiciones difusas cuantificadas** (quantified propositions) usan **cuantificadores difusos** como: muchos, pocos, la mayoría, frecuentemente, aproximadamente, etc. Cuando un cuantificador va en el **antecedente** se denominan **reglas cuantificadas en el antecedente**. Ejemplos de expresiones que usan proposiciones cuantificadas son:

- La mayoría de los alumnos son ordenados.
- Frecuentemente, si la temperatura es alta, entonces la válvula está poco abierta.
- Si aproximadamente la mitad de las válvulas estan abiertas entonces aumentar caudal.

A las proposiciones difusas estudiadas en este apartado se les denomina **proposiciones difusas no categóricas**, y tienen la singularidad de que no tienen que ser siempre ciertas.

➤ **Página 100, 6.4.3 SENTENCIA DIFUSA SI-ENTONCES**

Un condicional difuso **Si - Entonces** se expresa simbólicamente como:

Si <proposición difusa> entonces <proposición difusa>

Donde la **proposición difusa** podrá ser **única** o **compuesta** mediante la unión de conectores (y/o) entre proposiciones más simples.

Una **regla difusa** describe la relación causal entre el estado del proceso (**variables de estado** o entradas) y las variables de salida (**variables de control**) del proceso. Por ejemplo, si tomamos como variables de estado la temperatura y el Ph, y como variable de control el riego, entonces:

"Si la temperatura es baja y el Ph es básico entonces Riego es poco"

es una expresión simbólica de la siguiente relación causal:

"Si resulta que el valor actual de la temperatura es baja y el valor actual del Ph es básico entonces el Riego será poco'."

➤ **Página 101, 6.4.4 TIPOS DE REGLAS**

En la terminología del **control difuso** se pueden encontrar distintos tipos de **reglas de control**, los siguientes enlaces muestran las más importantes:

6.4.4.1.- Reglas con Excepciones

6.4.4.2.- Reglas Graduales

6.4.4.3.- Reglas Conflictivas

6.4.4.4.- Reglas de Evaluación del Estado del Proceso

6.4.4.5.- Reglas de Control Difuso para la Evaluación de Objetos

➤ **Página 102, 6.4.4.1 REGLAS CON EXEPCIONES**

Son **reglas con excepciones** aquellas **reglas de control** que incluyen una excepción. Por ejemplo:

- Si la temperatura es alta, entonces se abre poco la válvula, excepto que haya poco combustible.
- Si temperatura es muy alta, entonces se abre la ventana lateral, excepto que viento sea fuerte.

➤ **Página 103, 6.4.4.2 REGLAS GRADUALES**

Son **reglas de control** que introducen una proporcionalidad entre **variable de control y de estado** se denominan **reglas graduales**. Los siguientes ejemplos muestran reglas de este tipo:

- Cuanto mayor sea la temperatura, más abrir la válvula.
- Cuanto menor sea el viento, más abrir la ventana.

➤ **Página 104, 6.4.4.3 REGLAS CONFLICTIVAS**

Se llaman **reglas conflictivas** y potencialmente inconsistentes a las **reglas de control** que pueden generar problemas o malos resultados, pues representan información contradictoria. Estas reglas pueden ser de dos tipos:

1. Reglas con el mismo **antecedente** y **consecuentes** contradictorios. Por ejemplo:
 - Si temperatura es alta entonces abrir la valvula y si temperatura es alta entonces cerrar la valvula.
2. Reglas encadenadas en ambos sentidos negando un consecuente. Por ejemplo:
 - Si riego es alto entonces abono será alto y si abono es alto entonces riego es bajo.

➤ **Página 105, 6.4.4.4 REGLAS DE EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PROCESO**

La mayoría de los **controladores** tienen **reglas de control** de este tipo. Se caracterizan por un conjunto de reglas del tipo:

R_i : Si X es A_i, \dots , and Y es B_i entonces Z es C_i

donde X, Y y Z son **variables lingüísticas** representando las **variables de estado** del proceso y la **variable de control**. Los valores A_i , B_i y C_i con $i=1,2,\dots,n$ son **etiquetas lingüísticas** de las variables X, Y y Z en los **universos de discurso** U, V y W respectivamente.

En una versión más general, el **consecuente** se representa como una función de las variables de estado del proceso, es decir:

R_i : Si X es A_i, \dots , and Y es B_i entonces $Z = f(X, \dots, Y)$

Las reglas de control de este tipo, evalúan el estado del proceso en un tiempo t y computan una **acción de control** difuso en Z en función de (X, \dots, Y) .

➤ **Página 106, 6.4.4.5 REGLAS DE CD PARA LA EVALUACIÓN DE OBJETOS**

Las **reglas de control difuso para la evaluación de objetos** son **reglas de control** que se obtienen a partir de la experiencia de un operador **experto**. Una regla típica se describe de la siguiente forma:

$$R_i : \text{Si } U \text{ es } C_i \rightarrow (\text{X es } A_i \text{ e Y es } B_i) \text{ entonces } U \text{ es } C_j$$

En términos lingüísticos, la regla se interpreta como "si el índice de funcionamiento X es A_i y el índice Y es B_i cuando se elige una **acción de control** U con valor C_i , entonces esta regla es seleccionada y la acción de control C_j se toma como la salida del controlador". Por ejemplo:

- Riego es alto hasta que humedad sea bastante, entonces riego es bajo.

➤ **Página 107, 6.4.5 OBTENCIÓN DE LAS REGLAS DE CONTROL DIFUSO**

A continuación se comentan los cuatro modelos de obtención de **reglas de control difuso**. No son totalmente excluyentes entre sí, y es probable que sea necesario tomar una combinación de ellos para construir un método efectivo para la derivación de las reglas:

6.4.5.1.- Experiencia de Expertos

6.4.5.2.- Acciones de Control de Operadores Adiestrados

6.4.5.3.- Modelo Difuso de un Proceso

6.4.5.4.- Aprendizaje

➤ **Página 108, 6.4.5.1 EXPERIENCIA DE EXPERTOS**

Muchos **expertos** han encontrado que las **reglas de control difuso** son una forma conveniente para expresar su conocimiento del dominio. Esto explica porqué la mayoría de los **controladores difusos** se basan en el conocimiento y la experiencia expresada en el lenguaje de las reglas **Si-Entonces**.

La formulación de reglas de control difuso puede conseguirse por medio de dos métodos **heurísticos** (métodos científicos basados en la investigación de la deducción):

- El más comunmente empleado lleva consigo una verbalización introspectiva del conocimiento humano. Un ejemplo son las operaciones realizadas por un experto para controlar un horno de cemento. Ya que este mejor que nadie conoce el funcionamiento de la máquina y el modo de actuación ante ciertos comportamientos de la misma.
- Otra perspectiva ataca el problema mediante la interrogación directa a expertos bien experimentados y operadores, utilizando un cuestionario cuidadosamente planeado. De esta forma, podemos formar un prototipo de reglas difusas para un dominio de aplicación concreto.

➤ **Página 109, 6.4.5.2 ACCIONES DE CONTROL DE OPERADORES ADIESTRADOS**

En muchos **sistemas** industriales con **control** en manos de operadores humanos, las relaciones entre entrada y salida no se conocen con suficiente precisión para hacer posible el diseño de control clásico mediante simulación y modelado. Incluso operadores adiestrados pueden controlar tal sistema demasiado bien sin tener una serie de modelos cuantitativos en mente.

En efecto, un operador humano emplea, consciente o inconscientemente, un conjunto de **reglas if - then** difusas empleando **variables lingüísticas** para controlar los **procesos**. En la práctica, tales reglas pueden deducirse de la observación directa de las acciones del operador humano responsable del proceso, teniendo en cuenta los datos de entrada y salida.

Es importante, por supuesto la realización de los siguientes pasos previos:

1. Definir todas las variables de entrada y salida del sistema. Tanto los factores que influyen en el sistema como los que son susceptibles de ser modificados.
2. Definir en esas variables sus respectivos marcos de conocimiento (etiquetas lingüísticas de cada variable).

Una vez hecho esto puede ser útil analizar todos los posibles estados de las variables de entrada y concluir sus correspondientes acciones sobre las variables de salida.

➤ **Página 110, 6.4.5.3 MODELO DIFUSO DE UN PROCESO**

Desde el punto de vista del lenguaje, la descripción de las características dinámicas de un proceso a controlar pueden ser consideradas como un modelo difuso del proceso (mediante el uso de **sentencias difusas Si - Entonces**). Basandonos en este modelo, podemos generar un conjunto de **reglas de control difuso** para dotar de funcionamiento óptimo a un sistema dinámico.

Este conjunto de **reglas difusas** pasará a formar parte de la **base de reglas** de un **controlador difuso**. De un modo teórico, esta solución produce mejor funcionamiento y respuesta por parte del controlador, y da al mismo una estructura más conveniente para el manejo de las reglas de control. Sin embargo, de modo funcional, este aspecto del diseño de controladores difusos no ha sido todavía desarrollado.

➤ **Página 111, 6.4.5.4 APRENDIZAJE**

Muchos **controladores difusos** han sido construidos para emular el comportamiento humano en análisis y toma de decisiones, pero pocos se han centrado en el aprendizaje humano, a saber, la habilidad para crear **reglas de control difuso** y modificarlas basándose en la experiencia. El SOC (Self-Organising Controller) tiene la estructura jerárquica que consiste en dos **bases de reglas**:

1. La base de reglas general que se encuentra en todo controlador difuso.
2. Una base **meta - reglas** que exhiben de forma adecuada la habilidad de aprendizaje humano de forma que se pueden crear y modificar dichas meta-reglas con el objetivo de conseguir efectos generales beneficiosos para el funcionamiento del **sistema**.

➤ **Página 112, 6.5 MOTOR DE INFERENCIA**

El proceso de **inferencia difusa** se basa en el concepto de **razonamiento aproximado** y en otros que se describen a continuación:

6.5.1.- Razonamiento Aproximado

6.5.2.- Modus Ponens

6.5.3.- Regla Composicional de Inferencia

6.5.4.- S-implicaciones

6.5.5.- R-implicaciones

6.5.6.- QM-implicaciones

6.5.7.- T-normas como Funciones de Implicación

6.5.8.- Funcionamiento del motor de Inferencia

➤ **Página 113, 6.5.1 RAZONAMIENTO APROXIMADO**

Según **Zadeh**, el razonamiento aproximado se refiere al proceso de obtener consecuencias (posiblemente imprecisas) a partir de una colección de premisas constituidas por afirmaciones o hechos vagos e imprecisos [Zaded75]. Por naturaleza, este tipo de razonamiento es más bien cualitativo que cuantitativo y prácticamente cae fuera del ámbito de aplicabilidad de la **lógica clásica**. El **razonamiento aproximado** representa, en general, la capacidad humana de tomar decisiones racionales en ambientes complejos y/o inciertos, hecho que distingue la inteligencia humana de las capacidades de una máquina.

Las bases conceptuales para el desarrollo formal del razonamiento aproximado hay que buscarlas en la **teoría de conjuntos difusos** y en la **lógica difusa**, debiendo considerarse a Zadeh como el pionero de tal formalización. De este modo, la Inferencia en razonamiento aproximado equivale a un cálculo con **conjuntos difusos** que representan la semántica de un cierto grupo de **proposiciones difusas**.

En una forma general, dadas las **funciones de pertenencia** de dos conjuntos difusos A y B, las cuales representan la semántica de la proposición "X es A" y del condicional difuso "Si X es A, Entonces Y es B", es posible obtener la función de pertenencia que representa la semántica de la conclusión "Y es B".

➤ **Página 114, 6.5.2 MODUS PONENS**

El **modus ponens**, regla básica de deducción en la lógica de predicados, es el método de **inferencia** mejor conocido y más utilizado, supuesto que la implicación "**Si p entonces q**", es cierta y "**dado que ocurre p**", entonces ha de concluir que "**también ocurre q**".

En muchos casos p y q contienen información acerca de variables, por ejemplo p puede ser "X es A" y q "Y es B". El modus ponens puede extenderse a reglas más complejas en las que intervienen más de dos variables y operaciones entre ellas.

Desde el punto de vista del **razonamiento aproximado**, la situación que interesa es la deducción cuando la información disponible es imprecisa, es decir, cuando las proposiciones contienen predicados difusos. La **lógica difusa** proporciona un marco adecuado para el tratamiento de la incertidumbre porque su principal objetivo es la inferencia a partir de conocimientos imprecisos.

Llegado a este punto podemos definir el **modus ponens generalizado**, que dice:

$\frac{X \text{ es } A \rightarrow Y \text{ es } B}{X \text{ es } A}$ $\hline Y \text{ es } B'$	donde X e Y son variables sobre los universos de discurso U y V respectivamente. A, A', B y B' son informaciones difusas de dichas variables. El problema que se plantea es obtener B', y se soluciona a través de la regla composicional de inferencia .
---	---

➤ **Página 115, 6.5.3 REGLA COMPOSICIONAL DE INFERENCIA**

La **regla composicional de inferencia** fue introducida por **Zadeh** en [Zadeh73] como herramienta para traducir el **modus ponens** de la **lógica clásica** a la difusa. La regla introduce una **relación difusa** R que liga los valores de X e Y, es decir, un **conjunto difuso** en el producto cartesiano de los **universos de discurso** de X x Y, tal que:

$$R(x,y) = F(A(x),B(y))$$

donde A y B son dos conjuntos difusos de los universos X e Y respectivamente. La cuestión ahora es como construir F y la **composición** para obtener B' a partir de A' (conjuntos difusos aproximados a B y A respectivamente). Estos problemas se pueden resolver de varios modos, pero en todos se toma el **principio de extensión** de Zadeh (estudiado en el apartado 4.5 de este temario) como punto de partida. Primero se calcula B' a partir del **producto extendido** entre A' y la relación difusa R:

$$B' = A' \bullet R(X,Y)$$

Si aplicamos sobre la expresión de B', la definición de la relación difusa R, bajo el principio de extensión tenemos:

$$B'(y) = \max_{x \in X} \{ A'(x) \mathbf{t} R(x,y) \}$$

La forma efectiva de realizar las inferencias, por tanto, descansa en la elección que se haga de la función **F** y de la **t-norma t**.

➤ **Página 116, 6.5.3.1 REGLA COMPOSICIONAL DE INFERENCIA 2**

Como se ha dicho anteriormente, para realizar las **inferencias** hay que elegir la función F y la **t-norma** t , obteniéndose cosecuentemente lo que podríamos denominar como distintos modos de razonar. Basándose en estos conceptos, la expresión general de la **regla composicional de inferencia** es la siguiente:

$$B'(y) = \text{Sup}_{x \in X} \{ A'(x) t I(A(x), B(x)) \}$$

En esta expresión t es una t-norma e I una **función de implicación**. Existen tres familias de funciones de implicación propuestas por Trillas y Valverde en [Trillas85]:

- Las implicaciones fuertes o **S-implicaciones**.
- Las implicaciones residuales o **R-implicaciones**.
- Las implicaciones de la mecánica cuántica o **QM-implicaciones**.

Estas funciones se comentarán en los siguientes apartados junto con las t-normas que se pueden usar como funciones de implicación.

➤ **Página 117, 6.5.4 S-IMPLICACIONES**

La expresión general de las **S-implicaciones** o implicaciones fuertes es:

$$x \rightarrow y \equiv I^s(x, y) = s(n(x), y)$$

donde s es una **s-norma** y n una función de **negación fuerte**. Este tipo de **implicaciones difusas** provienen del formalismo de la **lógica clásica** $p \rightarrow q = \neg p \vee q$.

Los principales modelos de este tipo de implicaciones son:

- **S - Implicación de Diene (o Kleene) :** $I^s(x, y) = \max(1 - x, y)$
- **S - Implicación de Lukasiewicz :** $I^s(x, y) = \min(1, 1 - x + y)$
- **S - Implicación de Mizumoto (o Reichenbach) :** $I^s(x, y) = 1 - x + xy$

➤ **Página 118, 6.5.5 R-IMPLICACIONES**

La expresión general de las **R-implicaciones** o implicaciones residuales es:

$$x \rightarrow y \equiv I^R(x, y) = \sup\{z \in [0, 1] : x \mathop{t} z \leq y\}$$

donde **t** es una **t-norma**. Los principales modelos de este tipo de **implicaciones difusas** son:

- **R-Impliación de Gödel :** $I^R(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{si } x \leq y \\ y, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- **R-Impliación de Göguen :** $I^R(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{si } x \leq y \\ y/x, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- **R-Impliación de Rescher - Gaines :** $I^R(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{si } x \leq y \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

➤ **Página 119, 6.5.6 QM-IMPLICACIONES**

La expresión general de las **QM-implicaciones** o implicaciones basadas en la mecánica cuántica es:

$$x \rightarrow y \equiv I^s(x, y) = t(n(x), x \mathop{s} y)$$

donde **s** es una **s-norma** y **n** una función de **negación fuerte** y **t** una **t-norma**. Uno de los principales modelos de este tipo de **implicaciones difusas** es:

- **QM-Impliación de Early - Zadeh** $I^{QM}(x, y) = \text{Max}(1 - x, \text{Min}(x, y))$

➤ **Página 120, 6.5.7 T-NORMAS COMO FUNCIONES DE IMPLICACIÓN**

Algunos autores expertos en el **control difuso** proponen el uso de las **t -normas** como **funciones de implicación** difusas. Esta idea da lugar a una nueva familia de funciones de implicación de entre las que se pueden tomar el producto lógico, producto algebraico, producto de Einstein, producto acotado o el producto drastico, entre otros, tal y como se muestra en el apartado 3.2.5.1.- Principales T-normas.

Los controladores que introducen esta idea se denominan **controladores difusos basados en t -normas**.

➤ **Página 121, 6.5.8 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INFERENCIA**

El **motor de inferencia** constituye el núcleo del **controlador difuso**. Es el encargado de inferir las acciones de control simulando el proceso de decisión humano mediante el uso de una **implicación difusa** y las **reglas de inferencia** de la **lógica difusa**. Utiliza las técnicas de los sistemas basados en reglas para la inferencia de los resultados.

Para entender el funcionamiento del mismo, en los proximos apartados se procederá a explicar los cálculos que se realizan con las reglas difusas:

6.5.8.1.- Cálculos que se Realizan con Reglas Difusas

6.5.8.2.- Operadores que Influyen en la Inferencia

6.5.8.3.- Ejemplo

6.5.8.4.- Resumen del Proceso general de Inferencia

➤ **Página 122, 6.5.8.1 CÁLCULOS QUE SE REALIZAN CON REGLAS DIFUSAS**

En el caso de los **antecedentes** compuestos, se tiene una colección de N reglas del tipo:

Si X es A_k e Y es B_k entonces Z es C_k y $R_k(x,y)=A_k(x) \text{ t } B_k(y)$

donde $k = 1,2,3,\dots,N$ y se considera el antecedente del tipo: **(X, Y) es R_k** , y R_k es calculado con una **t - norma**. En el caso de que el operador sea una **disyunción** (O), se tomaría una **s - norma**, y usará una función de **negación** si alguna proposición aparece negada (X no es A).

Para ilustrar el proceso consideremos las entradas crisp para X e Y: a y b respectivamente. Sea m_k el valor resultante de aplicar la t-norma a los valores obtenidos en el antecedente de la regla k:

$$m_k = A_k(a) \text{ t } B_k(b)$$

El valor de m_k es llamado **Grado de activación** y mide la contribución de la regla k en la inferencia global, en el caso de que $m_k=0$ esa regla no se activa(no se tiene en cuenta).

El **conjunto difuso** resultante **C** es calculado como la **unión** de los conjuntos difusos **C'_k** obtenidos en cada regla:

$$C(z) = \bigcup_{k=1}^N C'_k = S_{k=1}^N (m_k \text{ t } C_k(z)), \quad \forall z \in Z$$

donde s es una s-norma que implementa la unión o agregación.

➤ **Página 123, 6.5.8.2 OPERADORES QUE INFLUYEN EN LA INFERENCIA**

Al efectuar una **inferencia** sobre un conjunto de **reglas difusas**, se deben elegir apropiadamente los siguientes operadores:

1. Una **t - norma** para el operador de **conjunción** (y) y una **s - norma** para el operador de **disyunción** (o), que se aplicará en el **antecedente** y el **consecuente** de cada regla.
2. Una función para definir el significado de cada regla K, o sea el significado de la **implicación difusa**.
3. Una t-norma para la **regla composicional de inferencia**.
4. Un **operador de agregación** para la **regla de combinación** (s-norma utilizada en el cálculo de I).

De esta forma si se disparan **N** reglas simples del tipo '**SI X es A_k ENTONCES B es Y'_k** ' con $k = 1 \dots N$, sabiendo que el valor de la variable de entrada **X es A**, el valor de la variable de salida **Y** será el **conjunto difuso**:

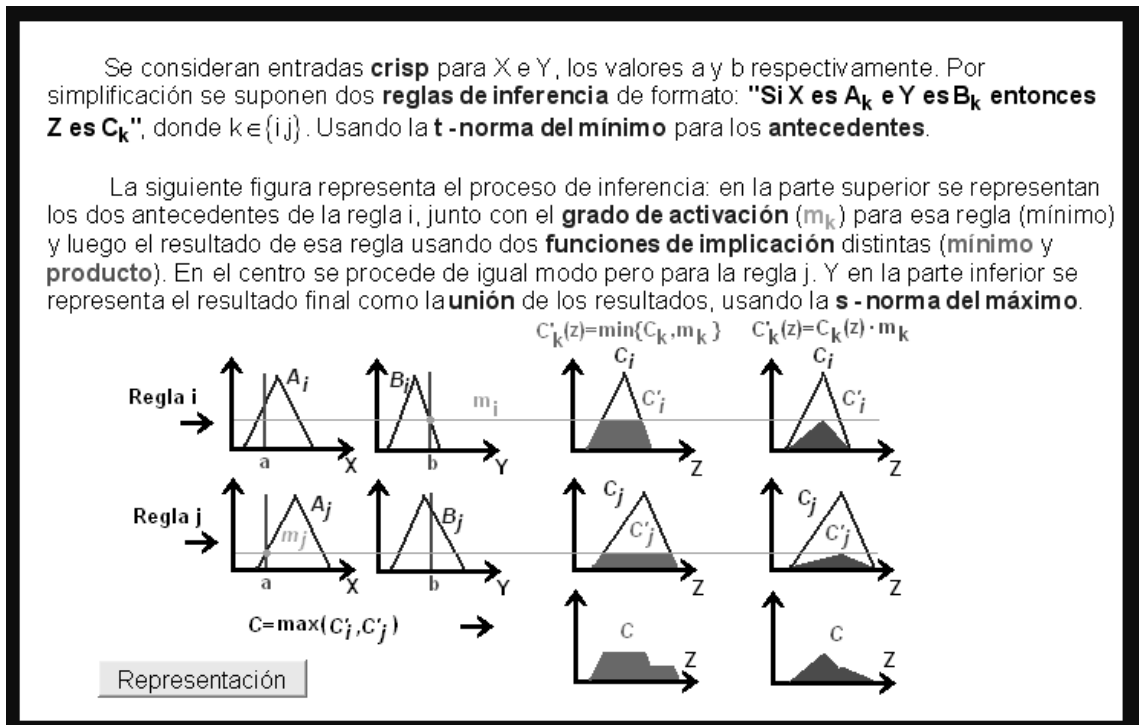
$$B(y) = \text{Sup}_x \left[A(x) \text{ t } \text{Ag}_{k=1}^N (I(A_k(x), B_k(y))) \right] = \text{Ag}_{k=1}^N (\text{Sup}_x (A(x) \text{ t } (I(A_k(x), B_k(y))))$$

La regla composicional de inferencia puede aplicarse también localmente a cada regla y agregar los resultados al final.

➤ **Página 124, 6.5.8.3 EJEMPLO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE INFERENCIA**

Se consideran entradas **crisp** para X e Y, los valores a y b respectivamente. Por simplificación se suponen dos **reglas de inferencia** de formato: "**Si X es A_k e Y es B_k entonces Z es C_k** ", donde $k \in \{i, j\}$. Usando la **t - norma del mínimo** para los **antecedentes**.

La siguiente figura representa el proceso de inferencia: en la parte superior se representan los dos antecedentes de la regla i, junto con el **grado de activación** (m_k) para esa regla (mínimo) y luego el resultado de esa regla usando dos **funciones de implicación** distintas (**mínimo y producto**). En el centro se procede de igual modo pero para la regla j. Y en la parte inferior se representa el resultado final como la **unión** de los resultados, usando la **s - norma del máximo**.



➤ **Página 125, 6.5.8.4 RESUMEN DEL PROCESO GENERAL DE INFERENCIA**

Resumiendo, el **proceso general de inferencia** es el siguiente:

1. **Emparejar Antecedentes y Entradas:** Para cada regla se calcula el grado de emparejamiento entre cada proposición atómica de su **antecedente** y el valor correspondiente de la entrada (difuminado o no).
2. **Grado de Activación o Agregación de los Antecedentes:** Para cada regla se calcula el **grado de activación** aplicando una conjunción copulativa (**t - norma**) o una disyunción (**s - norma**) según corresponda a los valores anteriores del primer caso.
3. **Resultado de cada Regla:** Para cada regla se calcula su valor resultante según su grado de activación y la semántica elegida para cada regla. Este es el paso más largo y complejo pues para cada valor en las salidas se debe calcular el mayor valor de la operación, para todos los posibles valores de las entradas (operación Sup_x).
4. **Regla de Combinación:** Agregación de todos los resultados individuales obtenidos de cada una de las reglas aplicadas.

Una vez realizado el proceso de inferencia se pasa a la fase de **concesión**, requisito fundamental en aplicaciones de ingeniería dado que las variables de salida en un sistema físico deben ser concretas (no se aceptan valores difusos). Un **actuador** no manipula expresiones cualitativas sino cuantitativas, valores puntuales (**crisp**).

➤ **Página 126, 6.6 MÓDULO CONCRESOR**

Las variables de salida del **controlador difuso** deben presentarse de forma concreta o determinista (por medio de **valores crisp**), pues cualquier proceso industrial utiliza **actuadores** ya sean mecánicos, neumáticos, eléctricos o de cualquier otro tipo que aceptan únicamente señales concretas (sin ambigüedad). De la transformación de la información difusa en valores concretos, así como de la denormalización de éstos se encarga el **módulo conresor** (Defuzification module). que estudiaremos en los siguientes apartados:

6.6.1.- Funcionalidad del Módulo Conresor

6.6.2.- Métodos de Concreción

6.6.2.1.- Valores Representativos de un Conjunto Difuso

6.6.2.2.- Métodos del Grupo A (1)

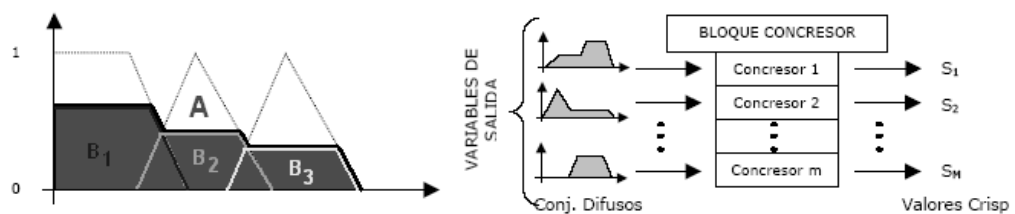
6.6.2.3.- Métodos del Grupo A (2)

6.6.2.4.- Métodos del Grupo B (1)

6.6.2.5.- Métodos del Grupo B (2)

➤ **Página 127, 6.6.1 FUNCIONALIDAD DEL MÓDULO CONRESOR**

Una vez obtenido el **conjunto difuso** tras el **proceso general de inferencia** sobre la variable de salida, se determina el proceso por el cual el conjunto difuso inferido es convertido a un valor numérico concreto representativo de dicho conjunto difuso. Esta fase se denomina **proceso de concreción o defuzzyficación** (defuzzyfication).



Como puede observarse, de forma genérica, tras el proceso de inferencia sobre cada variable de salida se obtendrá un conjunto difuso (que llamaremos **A**). Partiendo de esta situación, el **módulo conresor** deberá devolver de dicho conjunto difuso un valor representativo del mismo. Para calcular ese valor existen muchos métodos o cocresores y a su vez cada variable de salida podrá tener asociado un tipo de conresor, como se muestra en la imagen.

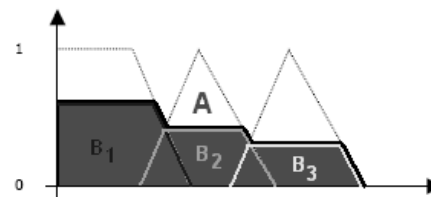
Obsérvese que usando la **s-norma del máximo** como **operador de agregación** y estando las etiquetas lingüísticas definidas como **funciones lineales**, entonces el conjunto difuso **A** será del tipo **trapecio extendido** creado agregando los resultados **B_i** de cada regla en esa variable.

➤ **Página 128, 6.6.2 MÉTODOS DE CONCRESIÓN**

Para encontrar un valor que sea representativo del **conjunto difuso** resultante tras el **proceso de inferencia**, varios son los métodos que pueden tomarse. Se pueden formar dos grupos:

1. **Grupo A** : Métodos basados en el nuevo conjunto **A** agregando las **funciones de pertenencia** de las variables de salida de todas las reglas **B_i**.
2. **Grupo B** : Métodos basados directamente en los conjuntos **B_i** resultantes de cada regla individual. La **unión** de estos conjuntos **B_i** da como resultado el conjunto **A**. La siguiente imagen muestra un ejemplo de cada uno de los grupos, así como la relación entre el conjunto **A** y los conjuntos **B_i**.

$$A(x) = \bigcup_{i=1}^n B_i(x)$$



Antes de estudiar más concretamente los dos grupos de métodos, se explicarán una serie de conceptos en los que se basan.

➤ **Página 129, 6.6.2.1 VALORES REPRESENTATIVOS DE UN CONJUNTO DIFUSO**

A la hora de implementar los algoritmos que realicen dichos métodos de concreción ya sean los del **grupo A o B**, es necesario realizar un análisis de los valores representativos de un conjunto difuso. Dichos valores representativos son:

6.6.2.1.1.- Punto de Máximo Criterio - G

6.6.2.1.2.- Centro de Gravedad - W

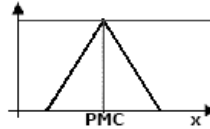
6.6.2.1.3.- Área - S

6.6.2.1.4.- Altura - H

➤ **Página 130, 6.6.2.1.1 PUNTO ODE MÁXIMO CRITERIO – G**

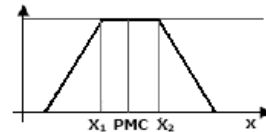
El **punto de máximo criterio** o PMC de un **conjunto difuso A** equivale al valor de **x** que maximiza su **función de pertenencia**. En función del número de puntos que maximizan la función y según el tipo de función de pertenencia podemos encontrar:

- **PMC único.** Un único punto cumple la condición de PMC.



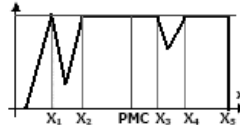
$$PMC_{\text{ÚNICO}} = \{x_j : A(x_j) = \text{Sup}_x A(x)\}$$

- **PMC mono-intervalar.** Un solo intervalo cumple la condición de PMC.



$$PMC_{\text{MONO-INTERVALAR}} = (x_1 + x_2)/2$$

- **PMC multi-intervalar.** Varios intervalos cumplen la condición de PMC.



$$PMC_{\text{MULTI-INTERVALAR}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ai} + \sum_{i=1}^n x_{bi}}{2 \cdot n}$$

➤ **Página 131, 6.6.2.1.2 CENTRO DE GRAVEDAD – W**

El **centro de gravedad (CoG)** de un conjunto **A** viene dado por la expresión:

$$CoG = \frac{\int_x A(x)x \, dx}{\int_x A(x) \, dx}$$

Para la obtención del CoG por medio de la expresión anterior se ha recurrido a una serie de conceptos que permitan generalizar la determinación de su **función de pertenencia** como una expresión constante a lo largo de la integral. Para el caso general de un **trapezoido extendido** el resultado es la siguiente fórmula:

$$W_{\text{Trapezoido extendido}} = \sum_{j=1}^{n-1} A(x_j) \left(\frac{x_{j+1}^2 - x_{j-1}^2 + x_j x_{j+1} - x_j x_{j-1}}{3(x_{j+1} - x_{j-1})} \right)$$

➤ **Página 132, 6.6.2.1.3 ÁREA – S**

El **área** de un **conjunto difuso A** viene dada por la siguiente expresión:

$$S = \int_X A(x) dx$$

➤ **Página 133, 6.6.2.1.4 ALTURA – H**

La **altura** de un **conjunto difuso A** viene dada por la expresión:

$$H_A = \sup_{x \in X} A(x)$$

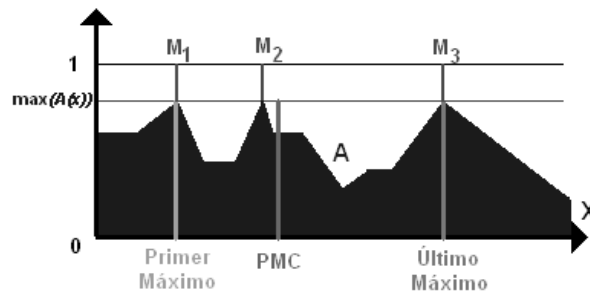
➤ **Página 134, 6.6.2.2 MÉTODOS DEL GRUPO A (1)**

Según [Drinakov96] a algunos de los métodos del **grupo A** más utilizados:

- **Punto de máximo criterio (PMC) o media de máximos (MoM).** Es la media de los valores que maximizan el **conjunto difuso A**. Su expresión es:

$$PMC = \frac{\sum_{j=1}^r M_j}{r}, \text{ siendo } \begin{cases} M_j = \{x_j / A(x_j) = \max_{x \in X}(A(x))\} \\ r \text{ es el número de puntos } x_j \text{ que maximizan al conjunto difuso A.} \end{cases}$$

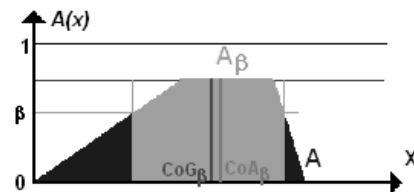
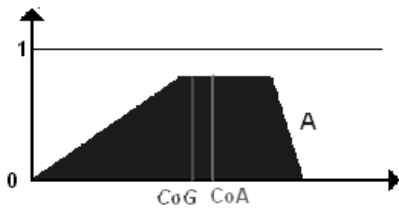
- **Primer máximo.** Es el menor de los valores x_j que maximizan al conjunto difuso A.
- **Último máximo.** Es el mayor de los valores x_j que maximizan al conjunto difuso A



➤ **Página 135, 6.6.2.3 MÉTODOS DEL GRUPO A (2)**

Estos son otros de los métodos del **grupo A** más utilizados según [Drinakov96]:

- **Centro de Gravedad (CoG).** Es el punto del universo X que cumple: $CoG = \frac{\int_x A(x)x dx}{\int_x A(x) dx}$.
- **CoG de valores importantes.** Es el CoG de los valores de A cuya función de pertenencia se mayor de un cierto valor (β).
- **CoG potenciado por un factor (δ).** $CoG^\delta = \frac{\int_x A^\delta(x)x dx}{\int_x A^\delta(x) dx} \rightarrow \begin{cases} \text{si } \delta = 1 & CoG^\delta = CoG. \\ \text{si } \delta = 1 & CoG^\delta = PMC. \end{cases}$
- **Centro de Área (CoA).** Punto en el cual el área queda dividida en dos valores iguales. Cumple con la expresión: $\int_{-\infty}^{CoA} A(x) dx = \int_{CoA}^{\infty} A(x) dx$
- **CoA de valores importantes.** Es el CoA de los valores de A cuya función de pertenencia es mayor de un cierto valor (β)



➤ **Página 136, 6.6.2.4 MÉTODOS DEL GRUPO B (1)**

Los métodos del **grupo B** usan directamente los conjuntos B_i obtenidos con cada regla a partir sus valores representativos:

- **Altura del conjunto - H_i .**

$$H_i = \sup_{x \in X} (B_i(x))$$

- **Punto de máximo criterio (PMC) - G_i .**

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^r M_j}{r}, \text{ siendo } \begin{cases} M_j = \{x_j / B(x_j) = \max_{x \in X} (B(x))\} \\ r \text{ es el numero de puntos que cumplen esta condición} \end{cases}$$

- **Área del conjunto - S_i .**

$$S_i = \int_X B_i(x) dx$$

- **Centro de gravedad del conjunto (CoG) - W_i .**

$$W_i = \frac{\int_X B_i(x)x dx}{\int_X B_i(x) dx}$$

A partir de las relaciones entre estas características de los distintos conjuntos B_i se obtienen los **valores crisp** que se obtendrán a la salida del **módulo conresor**. Los principales de ellos se muestran en la página siguiente.

➤ **Página 137, MÉTODOS DEL GRUPO B (2)**

Los principales **valores crisp** (vc) de salida del **grupo B** del **módulo conresor** publicados en [Drinakov96] son:

- **CoG ponderado por el área.**

$$vc = \frac{\sum_{i=1}^n S_i W_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

- **CoG del conjunto B_j de mayor área**

$$cv = W_j : B_j = \max_{i=1, \dots, n} \{S_i\}$$

- **PMC ponderado por el área.**

$$vc = \frac{\sum_{i=1}^n S_i G_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

- **PMC del conjunto B_j de mayor área**

$$cv = G_j : B_j = \max_{i=1, \dots, n} \{S_i\}$$

- **CoG ponderado por la altura.**

$$vc = \frac{\sum_{i=1}^n H_i W_i}{\sum_{i=1}^n H_i}$$

- **CoG del conjunto B_j de mayor altura**

$$cv = W_j : B_j = \max_{i=1, \dots, n} \{H_i\}$$

- **PMC ponderado por la altura.**

$$vc = \frac{\sum_{i=1}^n H_i G_i}{\sum_{i=1}^n H_i}$$

- **PMC del conjunto B_j de mayor altura**

$$cv = G_j : B_j = \max_{i=1, \dots, n} \{H_i\}$$

➤ **Página 138, TEMA 7: MÉTODOS DE AJUSTE Y TIPOS DE CONTROLADORES DIFUSOS**

- 7.1.- Métodos de Ajuste
 - 7.1.1.- Factor de Escala
 - 7.1.2.- Modificación de los Conjuntos Difusos
 - 7.1.3.- Modificación de las Reglas de la Base del Conocimiento
 - 7.1.4.- Efecto Ventana
- 7.2.- Tipos de Controladores Difusos
 - 7.2.1.- Controladores Difusos Directos
 - 7.2.2.- Controladores Difusos Adaptativos
 - 7.2.3.- Controladores Difusos Auto-Organizados
 - 7.2.4.- Controladores Difusos con Auto-Aprendizaje
 - 7.2.5.- Controladores Basados en Modelos Borrosos
 - 7.2.6.- Controladores Difusos Híbridos

➤ **Página 139, 7.1 MÉTODOS DE AJUSTE**

Los **controladores difusos** contienen un conjunto de parámetros que pueden verse alterados para modificar su funcionamiento. El objetivo de esta modificación es incrementar la efectividad del controlador. Los parámetros que están sujetos a esta modificación son:

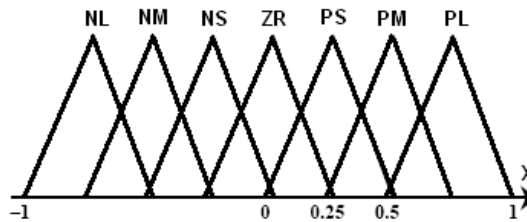
- 7.1.1.- Factor de Escala
- 7.1.2.- Modificación de los Conjuntos Difusos
- 7.1.3.- Modificación de las Reglas de la Base del Conocimiento
- 7.1.4.- Efecto Ventana

➤ **Página 140, 7.1.1 FACTOR DE ESCALA**

Las entradas y salidas del controlador pueden escalarse variando los límites de su **universo de discurso** y modificando proporcionalmente las **etiquetas**.

Normalmente las etiquetas se definen en el intervalo $[-1, 1]$ y luego se escala al intervalo deseado. En el caso de variables de entrada, lo que se hace es multiplicar el valor de entrada por un valor de escala en el intervalo $[0, 1]$, para escalar la entrada de su intervalo real al intervalo $[-1, 1]$.

A modo de ejemplo supongamos las etiquetas de la figura, donde el intervalo real de la entrada es $[-200, 200]$. Se debería multiplicar el valor de entrada por $0.005 (1/200)$: El valor 100 se clasifica principalmente como PM, ya que $100 \times 0.005 = 0.5$. Si ahora escalamos a un intervalo el doble de grande $[-400, 400]$ debemos multiplicar por $0.0025 (1/400)$: El valor 100 se clasifica ahora principalmente como PS, ya que $100 \times 0.0025 = 0.25$.

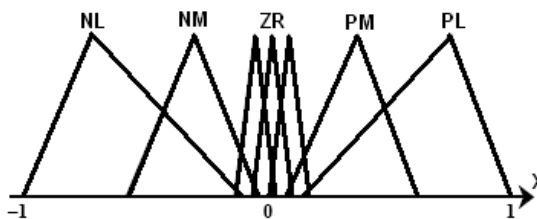


➤ **Página 141, 7.1.2 MODIFICACIÓN DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS**

Se trata de modificar la definición de las **etiquetas lingüísticas**. Mientras que el cambio en el **factor de escala** consigue una alteración uniforme en todo el **universo de discurso**, con este tipo de cambio podemos aumentar la sensibilidad (ganancia) del controlador para valores de cierta zona del universo.

Esta modificación debe hacerse con cuidado pues las definiciones de las etiquetas no deben ser arbitrarias y modificarlas demasiado puede suponer perder el significado lingüístico subyacente. Para la realización de esta modificación de los **conjuntos difusos** algunos autores han utilizado **algoritmos genéticos**, como puede leerse en [Herrera93].

Siguiendo con el ejemplo anterior, queremos ahora incrementar la sensibilidad del controlador en los valores cercanos a cero (valores centrales del universo del discurso). Las etiquetas quedan del siguiente modo:



➤ **Página 142, 7.1.3 MODIFICACIÓN DE LAS REGLAS DE LA BASE DEL CONOCIMIENTO**

Se trata de modificar el contenido de las **reglas difusas**. Los controladores que realizan esta función se denominan controladores autoorganizativos. Se basan en lo siguiente:

Una regla no puede ser siempre aplicable de la misma forma. A veces es preciso modificarla para adaptarla a la situación cambiante del sistema. En ocasiones, una solución a este problema consiste en añadir una nueva variable de entrada al controlador y añadir nuevas condiciones en el **antecedente** de algunas reglas, basadas en la nueva variable. Existen muchas formas de modificar una regla. Por ejemplo, modificar la **etiqueta lingüística** de alguna variable (del antecedente o del **consecuente** de una regla).

Pongamos un ejemplo:

Si Humedad es GRANDE, ENTONCES Apertura_Riego es POCO.

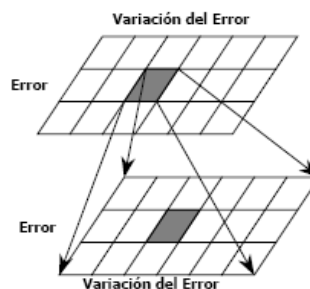
Podría convertirse en la siguiente regla (por ejemplo, **si fuera verano**) y entonces

Si Humedad es GRANDE, ENTONCES Apertura_Riego es MODERADA.

➤ **Página 143, 7.1.4 EFECTO VENTANA**

El **efecto ventana** (windowing effect) consiste en que cuando la salida de un **controlador difuso** está en cierto rango, entonces se puede cambiar el banco de reglas para conseguir mayor especificidad.

Normalmente la salida que se usa en este caso es una medida del error y/o de la variación del error. Así, si el error es suficientemente pequeño, se intenta minimizar aún más con otro conjunto de reglas distinto. Esto se puede aplicar sucesivamente en varias etapas, haciendo que cada etapa sea más fina y minuciosa. Es lo que se denomina **control multiresolución**, como se muestra en la siguiente imagen:



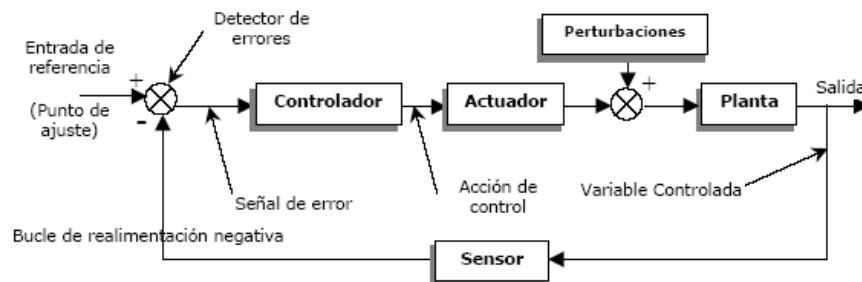
➤ **Página 144, 7.2 TIPOS DE CONTROLADORES DIFUSOS**

Atendiendo al modo de operar de los **controladores difusos** pueden distinguirse varios tipos. A continuación se muestra la clasificación que hacen García Cerezo, Ruíz Gómez y de la Paz Moya en su libro "Controladores Borrosos" [Cerezo00]:

- 7.2.1.- Controladores Difusos Directos
- 7.2.2.- Controladores Difusos Adaptativos
- 7.2.3.- Controladores Difusos Auto-Organizados
- 7.2.4.- Controladores Difusos con Auto-Aprendizaje
- 7.2.5.- Controladores Basados en Modelos Borrosos
- 7.2.6.- Controladores Difusos Híbridos

➤ **Página 145, 7.2.1 CONTROLADORES DIFUSOS DIRECTOS**

Por lo general, las características del **controlador** se establecen por la naturaleza de las variables de entrada y salida utilizadas. El controlador detecta la señal de **error** (e), que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficientemente alto. La salida de un controlador se alimenta de un **actuador** (u), un dispositivo de potencia que produce la entrada para la **planta** de acuerdo con la señal de control, para que la **señal de salida** se aproxime a la **señal de entrada de referencia**.



➤ **Página 146, 7.2.2 CONTROLADORES DIFUSOS ADAPTATIVOS**

La mayoría de los **procesos** industriales son por naturaleza no lineales, de forma que los valores que adoptan sus parámetros cambian conforme varía el punto de operación a través del tiempo. El controlador clásico necesitaría un reajuste continuo.

Esta necesidad de reajuste ha dado paso a la idea de diseñar **controladores difusos adaptativos** que puedan reajustarse automáticamente para hacer frente a las nuevas características del proceso. Los **controladores difusos** son no lineales y son firmes candidatos para cubrir el hueco dejado por los controladores clásicos. De este modo, pueden hacer frente a cierto número de procesos de una no-linealidad implícita debido a los dos componentes extra que no se incluyen en el controlador estándar:

1. **Monitor del proceso.** Es el encargado de detectar los cambios en las características del proceso, puede presentarse como una medida de rendimiento reflejando la bondad de la acución del controlador o bien a través de un parámetro estimador que actualice constantemente un modelo del proceso.
2. **Mecanismo de adaptación.** Utiliza la información del monitor del proceso para actualizar los parámetros del controlador de forma que se adapte a la situación cambiante del sistema.

➤ **Página 147, 7.2.3 CONTROLADORES DIFUSOS AUTO-ORGANIZADOS**

Los **controladores difusos auto - organizados**, llamados **SOC** (self-organising controller), son unos sistemas capaces de modificar automáticamente y sin intervención humana su **base de conocimiento**. A partir de las discrepancias con respecto a unos determinados criterios prefijados, el control auto-organizado establece las oportunas modificaciones en la base de reglas. Los elementos que constituyen el SOC son:

- **Controlador lingüístico.** Establece las distintas variables, con sus universos de discurso, conjuntos difusos y etiquetas correspondientes
- **Evaluador de características.** Analiza los valores de entrada del controlador.
- **Modelo de referencia.** Compara el funcionamiento actual del sistema con el funcionamiento deseado
- **Algoritmo modificador de reglas.** Modifica las reglas de la base del conocimiento para un correcto funcionamiento del sistema.

Una de las características principales de los controladores SOC es que pueden iniciar su funcionamiento sin ninguna regla en su base del conocimiento y aprender una serie de estas reglas conforme las va necesitando el sistema. Para ello, el SOC necesita un módulo de aprendizaje y construcción de reglas.

➤ **Página 148, 7.2.4 CONTROLADORES DIFUSOS CON AUTO-APRENDIZAJE**

Los **controladores difusos con auto - aprendizaje** son unas de las incorporaciones más recientes en la materia del **control difuso**. En su mayor parte responden a procedimientos y técnicas de aprendizaje del tipo gradiente descendente. Un ejemplo de estas técnicas de aprendizaje fue ideado por **Nomura** en [Nomura91], que propone un método de aprendizaje por propagación hacia atrás, que opera sobre un conjunto de reglas del tipo:

Regla i: Si X_1 es A_1 y X_n es A_n entonces Y es W_i .

En donde A_i está representado por un **conjunto difuso** de forma **triangular**, definido por su centro (c_i) y su ancho (a_i). Los **consecuentes** W_i son escalares.

➤ **Página 149, 7.2.5 CONTROLADORES BASADOS EN MODELOS BORROSOS**

Otra alternativa de gran interés son los **controladores basados en modelos borrosos** del proceso a controlar. La aplicación de las técnicas de modelado precisan una serie de simplificaciones sobre los parámetros relativos a **antecedentes** y **consecuentes**. Los sistemas de control basados en modelos borrosos actúan como modeladores de la dinámica inversa del proceso.

➤ **Página 150, 7.2.6 CONTROLADORES DIFUSOS HIBRIDOS**

Se denominan así a aquellos sistemas de control formados por dos **controladores** interconectados, de los cuales uno es convencional y otro es difuso. El **controlador clásico** se encarga básicamente del control garantizando un comportamiento estable. Mientras que el **controlador difuso** actúa en paralelo, introduciendo el componente **heurístico** en el **proceso**. Usualmente sus acciones se orientan a la mejora de ciertas características, como reducción de oscilaciones, mejoras del tiempo de establecimiento, etc.

Una buena parte de los controladores difusos industriales han sido realizados mediante esta técnica de hibridación. Un ejemplo se tiene en el regulador de temperatura E5_F de OMRON. Se trata de un regulador proporcional integral derivativo (PID) hibridado con un autoajuste difuso que permite calcular las constantes (P-I-D) óptimas para el sistema controlado y las características de la función de ajuste fuzzy.

Estrategias de este tipo son muy adecuadas desde una visión puramente industrial: al disponer de un control clásico, el técnico de proceso se siente apoyado por su propia experiencia, y a su vez, se adapta a los nuevos planteamientos introducidos por el controlador difuso.

CAPÍTULO 3 Manuales de SDICD

El objeto de este capítulo es el de facilitar a cualquier usuario el acceso a SDICD, a través de manuales que van incluidos en el programa. El programa se puede usar de dos modos: en modo usuario y en modo Administrador, por lo que dentro de este capítulo se encuentran los manuales de usuario de Administrador, así como una guía sobre la instalación del programa, que se mostrará en primer lugar.

3.1 INSTALACIÓN DE SDICD

La instalación de SDICD se realiza de una forma sencilla e intuitiva para cualquier usuario que utilice PC con asiduidad, el programa preparado para su instalación lo podemos encontrar principalmente en un CD, aunque también se podrá distribuir a través de cualquier dispositivo de memoria, o incluso se podrá descargar de internet. En cualquier caso al abrir el CD o carpeta correspondiente encontraremos una serie de archivos como los que se muestran en la Figura 3.1.

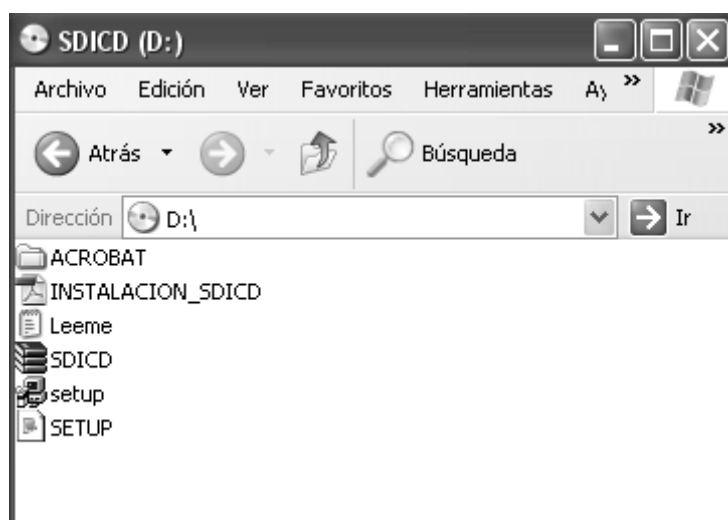


Figura 3.1 Archivos contenidos en el CD de SDICD

A continuación se explicará el contenido de todos y cada uno de los archivos o carpetas contenidos en el CD o carpeta:

- **ACROBAT:** En esta carpeta encontraremos el programa Adobe Acrobat Reader 7.0 (software de distribución gratuita), para instalarlo únicamente tendremos que hacer doble click sobre el archivo *RP500ESP* contenido por esta carpeta. Este programa es necesario para abrir *INSTALACION_SDICD.pdf* durante la instalación o para abrir el manual de usuario y el glosario durante la ejecución.
- **INSTALACIÓN_SDICD.pdf:** Al abrir este archivo se ejecutará el programa Adobe Acrobat Reader en el caso de que lo esté instalado en el equipo, mostrando el manual de instalación de SDICD.
- **Leeme.txt:** Contiene información útil con respecto a SDICD para el usuario.
- **SDICD.rar:** este archivo contiene archivos que se van a instalar al ejecutar sobre *Setup.exe*.
- **Setup.exe:** Este es el archivo de instalación de SDICD, al ejecutar el mismo se iniciará la instalación del programa.
- **Setup.lst.** Este archivo contiene la información necesaria para que al pulsar sobre *setup.exe* se instale SDICD correctamente.

Para instalar SDICD en cualquier equipo hay que ejecutar *Setup.exe* y seguir los siguientes pasos:

1. **Proceso de carga del Programa de instalación.** Durante unos segundos el Programa de instalación se prepara para Instalar SDICD en el equipo.



Figura 3.2 Instalación de SDICD

- 2. Recomendación de cerrar el resto de aplicaciones.** Antes de proceder con la instalación el programa recomienda al usuario que cierre las aplicaciones abiertas en el equipo para así evitar problemas de compatibilidad durante la instalación. Se puede observar en la Figura 3.2.

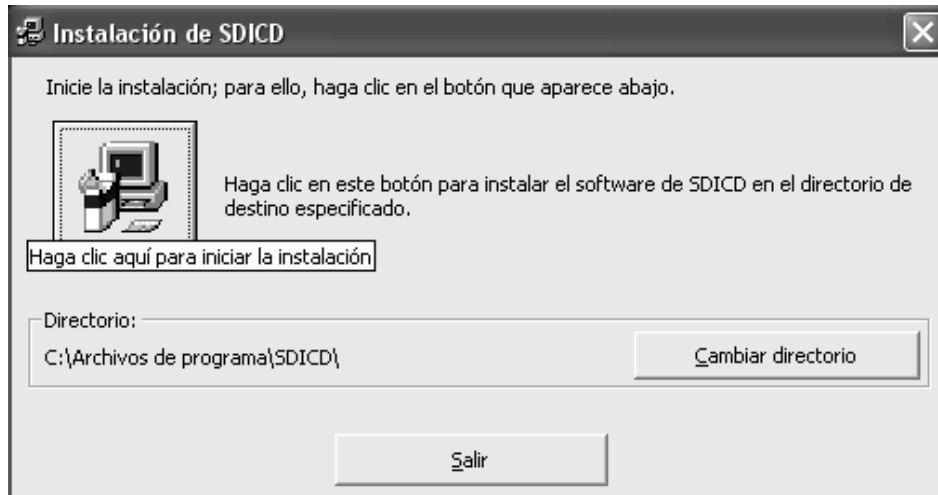


Figura 3.3 Ruta de Instalación

- 3. Ruta de Instalación.** Por defecto aparecerá la ruta de instalación que se muestra en la Figura 3.3, Pulsando sobre *Cambiar directorio*, se podrá cambiar la ruta de instalación, para iniciar la instalación hay que hacer click sobre el botón que contiene el icono del ordenador.

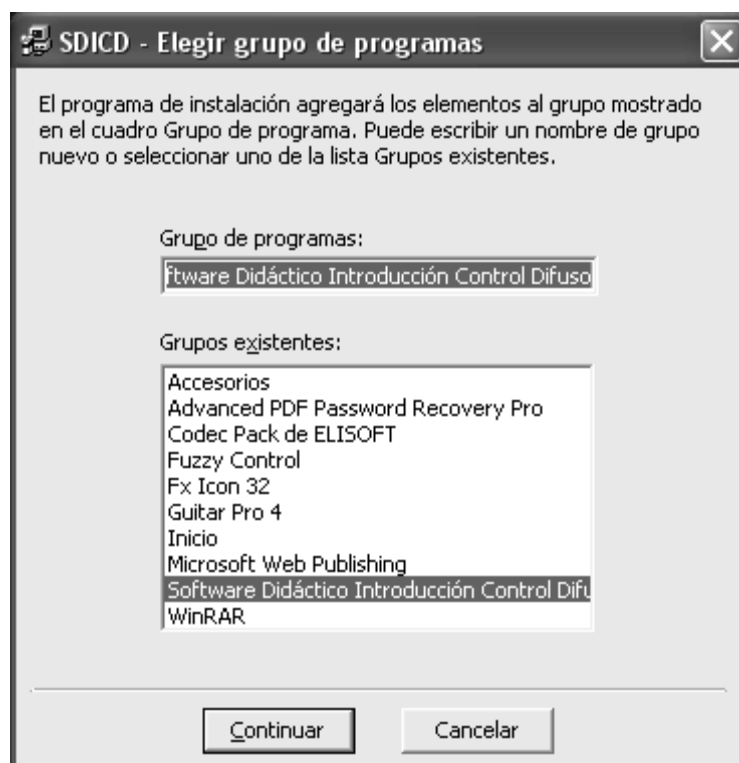


Figura 3.4 Ruta de Instalación

4. Grupo de Programas. Tras comprobar el estado de la memoria del equipo en el que se está instalando SDICD, el programa de instalación pasa a configurar el grupo de programas en que se instalará en el Menú Inicio del escritorio (Figura 3.4). Por defecto aparecerá la opción *Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso*.

5. Instalación del Programa. Si se ha pulsado *Continuar* en el paso anterior, el programa iniciara la instalación de todos los archivos que componen SDICD, esta operación puede tardar algunos minutos.

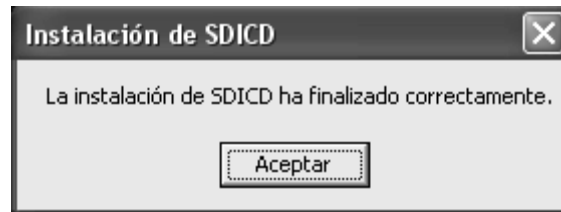


Figura 3.5 Instalación Correcta

6. Instalación correcta. Si el proceso se ha realizado correctamente aparecerá en la pantalla una ventana similar a la de la Figura 3.5.

Si se han seguido los pasos de Instalación de SDICD por defecto se habrá instalado el programa en el directorio *C:\Archivos de programa\SDICD*, además podremos encontrar *SDICD.exe* en el menú inicio de nuestro sistema operativo Windows.

3.2 MANUAL PARA EL ADMINISTRADOR DE SDICD

En este apartado se tratan las diferencias existentes en SDICD en el caso de que el usuario del programa sea el Administrador.

3.2.1 Iniciar Sesión de Administrador

El Administrador es el único usuario de SDICD registrado al iniciar el programa por primera vez. El inicio de sesión para el Administrador es igual que para cualquier usuario de SDICD, a excepción de algunos conceptos que se tratan a continuación:

- **Contraseña para el Administrador.** Como se ha dicho anteriormente el Administrador es un usuario registrado al instalar SDICD, por lo que no se puede crear ni eliminar y la contraseña está definida dentro del programa inicialmente, pudiéndose modificar. La contraseña establecida para iniciar sesión como Administrador al ejecutar el programa la primera vez es *SDICD*, siendo indiferente que se escriba en mayúsculas o minúsculas.
- **Sesión de Administrador.** Al introducir la contraseña el programa nos muestra la pantalla de inicio de sesión para el Administrador (Figura 3.6), en este caso nos encontramos algunas diferencias con respecto a un usuario estándar.

ADMISISTRADOR no se le ejecutarán los tests durante el programa, pero puede visualizar los resultados obtenidos por todos los usuarios registrados a SDICD en ese equipo (únicamente deberá elegir el usuario en la lista desplegable existente). Además podrá eliminar a cualquier usuario a través del botón *Eliminar Usuario* previa petición de confirmación de la acción a realizar. En el caso de que no haya ningún usuario registrado (excluyendo al Administrador), aparecerán todos los campos en blanco y el botón *Eliminar Usuario* permanecerá deshabilitado.

En el momento en que se pulse *Iniciar Sesión* empezará la ejecución de SDICD para el Administrador, tal y como se explica en el Apartado **3.2.2 SDICD para el Administrador**.



Figura 3.6 Inicio de sesión del Administrador

Como se ha dicho anteriormente, el Administrador tiene la opción de poder cambiar su contraseña siempre que lo desee, para ello únicamente deberá pulsar el botón *Cambiar Contraseña Administrador*. En ese momento se pedirá la confirmación de la operación y en caso afirmativo la ventana se mostrará igual que en la Figura 3.7. En esta ventana se requerirá la introducción de la contraseña actual del AMINISTRADOR, así como la nueva contraseña que se quiere introducir por duplicado, en el caso de que todo sea correcto aparecerá la confirmación de que la operación se ha realizado correctamente y se volverá a la ventana de la Figura 3.6



Figura 3.7 Cambiar Contraseña Administrador

3.2.2 SDICD para el Administrador

Al iniciar sesión como Administrador nos encontramos con las siguientes diferencias con respecto a la ejecución de SDICD como un usuario estándar:

- En la Barra de estado aparecerá Administrador como usuario del programa, situada en la parte inferior derecha de la Figura 3.8.



Figura 3.8 Sesión del Administrador

- A lo largo de las páginas SDICD no se ejecutarán los test, además estará deshabilitado el *menú Herramientas/Test*, está situado en la parte superior izquierda de la Figura 3.7.
- Estará disponible la herramienta *Editor de Herramientas*, a la que se puede acceder a través del *menú Herramientas/Editor de Herramientas* (Figura 3.7, parte superior izquierda) y que se explica en el Apartado **3.2.3. Editor de Herramientas**.

3.2.3 Editor de Herramientas

El Editor de Herramientas es una aplicación que se utiliza para crear y/o modificar los términos, referencias y tests incluidos dentro de SDICD, En la Figura 3.9 se muestra la apariencia del Editor de Herramientas. En la parte superior existen tres pestañas, una para cada uno de los tipos de herramientas: *Términos*, *Referencias* y *Tests*, cuyo contenido se explicará en los apartados 3.2.3.1, 3.2.3.2 y 3.2.3.3 respectivamente.

Hay dos formas de salir del Editor de Herramientas durante su ejecución, la primera de ellas es pulsando el botón situado en la parte superior izquierda de la ventana, la segunda es pulsando el botón *Salir del Editor de Herramientas* situado en la parte inferior central de la ventana, al hacerlo el Editor de Herramientas se cerrará y se volverá a la ventana principal de SDICD, actualizando las herramientas, es decir llevando a SDICD las modificaciones realizadas mediante el Editor de Herramientas a los términos, referencias y tests.

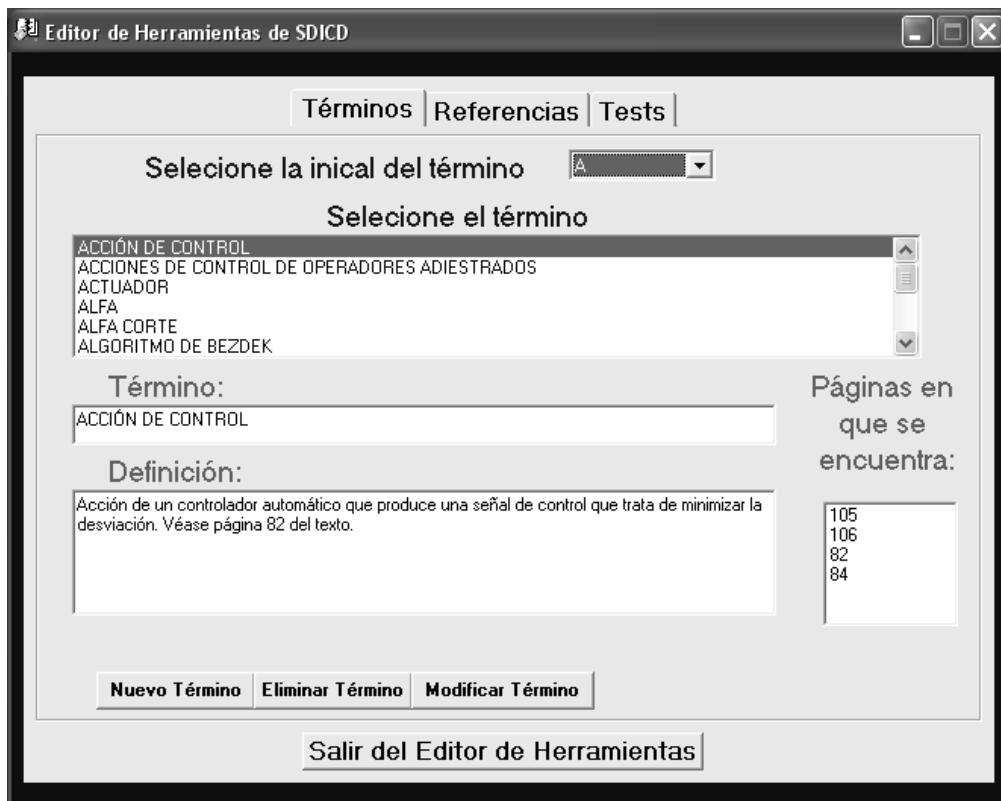


Figura 3.9 Editor de Herramientas de SDICD

3.2.3.1 Términos

Dentro del Editor de Herramientas, al pulsar sobre la pestaña *Términos* (abierta inicialmente) encontramos una ventana similar a la mostrada en la Figura 3.9. En esta ventana nos encontramos los siguientes elementos:

- **Seleccione la inicial del término:** Se trata de una lista desplegable, en la que se puede elegir desde la A a la Z la inicial del término que se desea editar.
- **Seleccione el término:** Se trata de una lista en la que encontramos en orden alfabético todos los términos correspondientes a la inicial seleccionada.
- **Término:** Muestra el nombre del término seleccionado.
- **Definición:** Muestra la definición del término seleccionado.
- **Páginas en que se encuentra:** Es una lista en la que se muestran las páginas del libro SDICD en que se mostrará el término seleccionado.

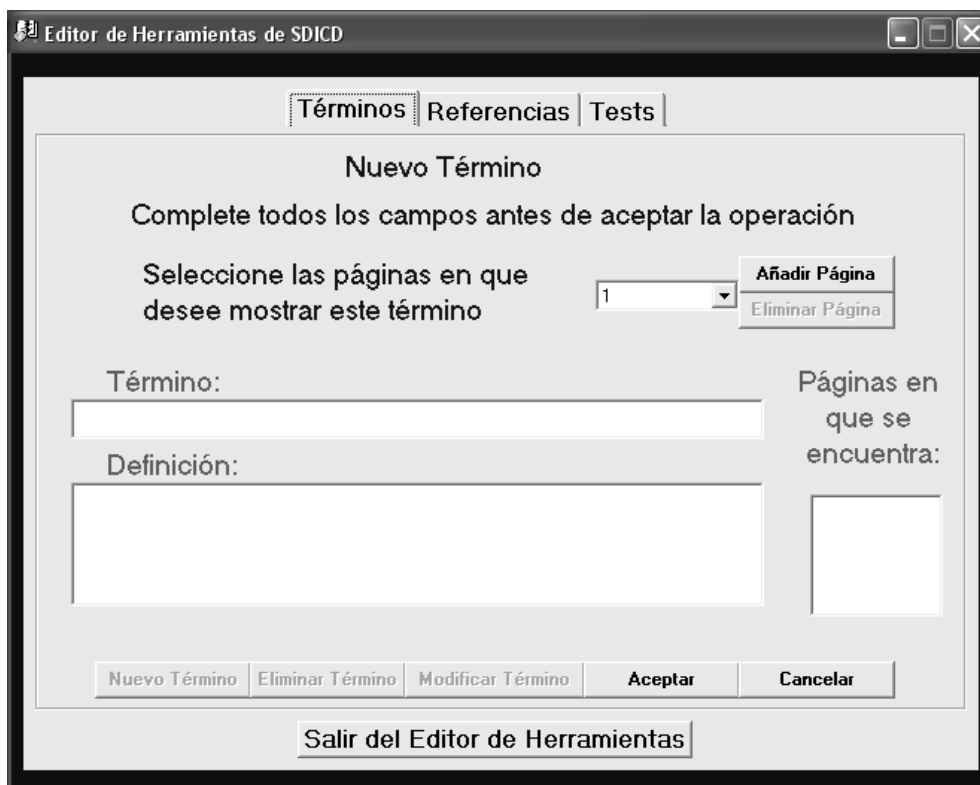


Figura 3.10 Nuevo Término

- **Nuevo Término:** Al pulsar sobre este botón la pantalla cambia de aspecto y muestra una ventana similar a la de la Figura 3.10. En esta ventana se muestran todos los campos necesarios para introducir un nuevo término. Además del nombre y la definición se deben incluir los números de las páginas de SDICD en las que aparecerá el termino tras pulsar el botón *Términos*, que se explica en el apartado **3.3.6 Botones**

Términos y Referencias. Una vez introducidos los datos, al pulsar sobre el botón *Aceptar* se guardarán los datos introducidos (siempre y cuando estos sean correctos, en el caso de que haya algún campo en blanco el programa no guardará los cambios y dará al Administrador la opción de corregir los errores) y si se pulsa *Cancelar* volveremos a la pantalla principal de términos sin introducir los datos en los archivos del programa.

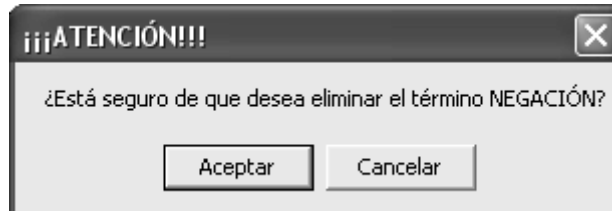


Figura 3.11 Eliminar Término

- **Eliminar Término:** En el caso de que se pulse sobre este botón, el programa pedirá la confirmación para eliminar el término seleccionado, tal y como se muestra en la Figura 3.11. En el caso de que se pulse *Aceptar* el programa eliminará el término seleccionado y toda la información contenida por el mismo. En caso de que se pulse *Cancelar* continuará la ejecución normal del Editor de Herramientas de SDICD.



Figura 3.12 Modificar Término

- **Modificar Término:** En el caso de que se pulse sobre este botón el programa pedirá la confirmación para modificar el término seleccionado y en el caso de que se acepte se mostrará una ventana similar a la de la Figura 3.12. Esta ventana es similar a la de

Nuevo Término pero en este caso todos los campos contendrán información inicialmente, además esta información podrá ser modificada. En el caso de que se pulse el botón *Aceptar*, se guardará la información introducida (siempre y cuando estos sean correctos, en el caso de que haya algún campo en blanco el programa no guardará los cambios y dará al Administrador la opción de corregir los errores) y si se pulsa *Cancelar* el programa continuará con su ejecución sin guardar los cambios introducidos.

3.2.3.2 Referencias

Dentro del Editor de Herramientas, al pulsar sobre la pestaña *Referencias* encontramos una ventana similar a la mostrada en la Figura 3.13.

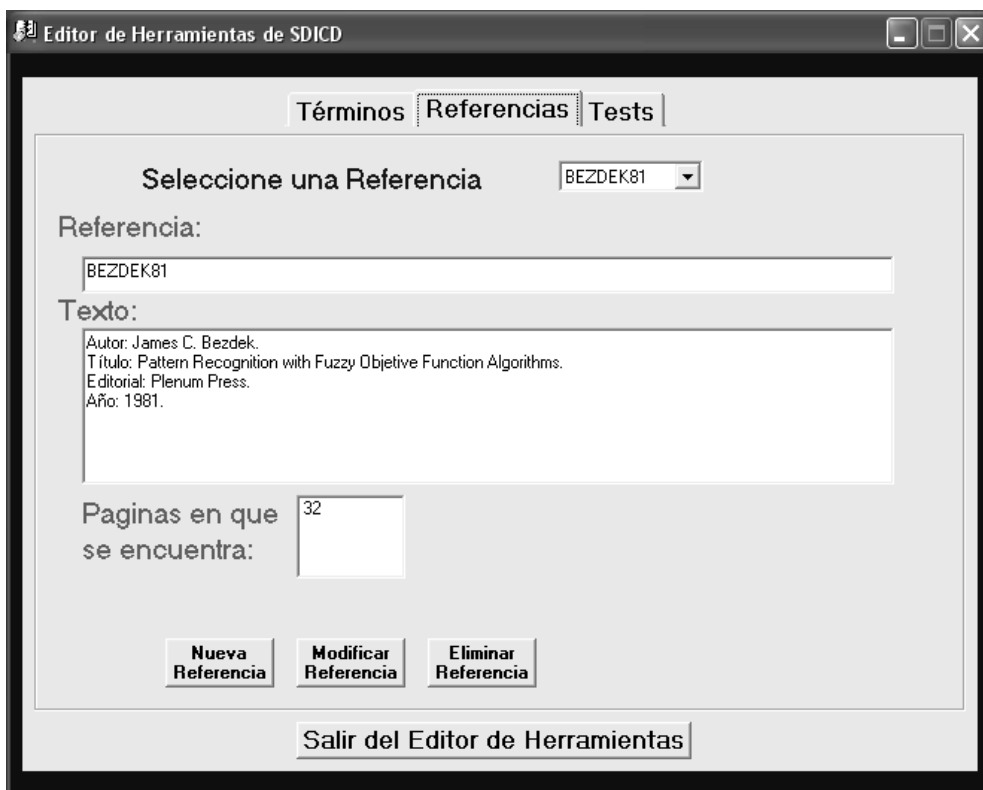


Figura 3.13 Referencias

En esta ventana nos encontramos los siguientes elementos:

- **Seleccione una Referencia:** Se trata de una lista desplegable, en la que se puede elegir entre todas las referencias introducidas hasta el momento en el programa.
- **Referencia:** Se trata de una caja de texto en la que se muestra el nombre de la referencia seleccionada.
- **Texto:** Se trata de una caja de texto en la que se muestra la información de la referencia seleccionada

- **Páginas en que se encuentra:** Se trata de una lista en la que se muestran los números de las páginas de SDICD en la que podremos encontrar esa referencia.
- **Nueva Referencia:** Al pulsar sobre este botón la pantalla cambia de aspecto y muestra una ventana similar a la de la Figura 3.14. En esta ventana se muestran todos los campos necesarios para introducir una nueva referencia. Además del nombre de la referencia y del texto que contiene la misma se deben incluir los números de las páginas de SDICD en las que aparecerá el término tras pulsar el botón *Referencias*, que se explica en el apartado **3.3.6 Botones Términos y Referencias**.

Figura 3.14 Nueva Referencia

Una vez introducidos los datos, al pulsar sobre el botón *Aceptar* se guardarán los datos introducidos (siempre y cuando estos sean correctos, en el caso de que haya algún campo en blanco el programa no guardará los cambios y dará al Administrador la opción de corregir los errores) y si se pulsa *Cancelar* volveremos a la pantalla principal de referencias sin introducir los datos en los archivos del programa.

- **Modificar Referencia.** En el caso de que se pulse sobre este botón el programa pedirá la confirmación para modificar la referencia seleccionada y en el caso de que se acepte la ventana se mostrará similar a la de la Figura 3.15. Esta ventana es similar a la de *Nueva Referencia* pero en este caso todos los campos contendrán información inicialmente, además esta información podrá ser modificada. En el caso de que se pulse el botón *Aceptar*, se guardará la información introducida (siempre y cuando estos sean correctos, en el caso de que haya algún campo en blanco el programa no

guardará los cambios y dará al Administrador la opción de corregir los errores) y si se pulsa *Cancelar* el programa continuará con su ejecución sin guardar los cambios introducidos.

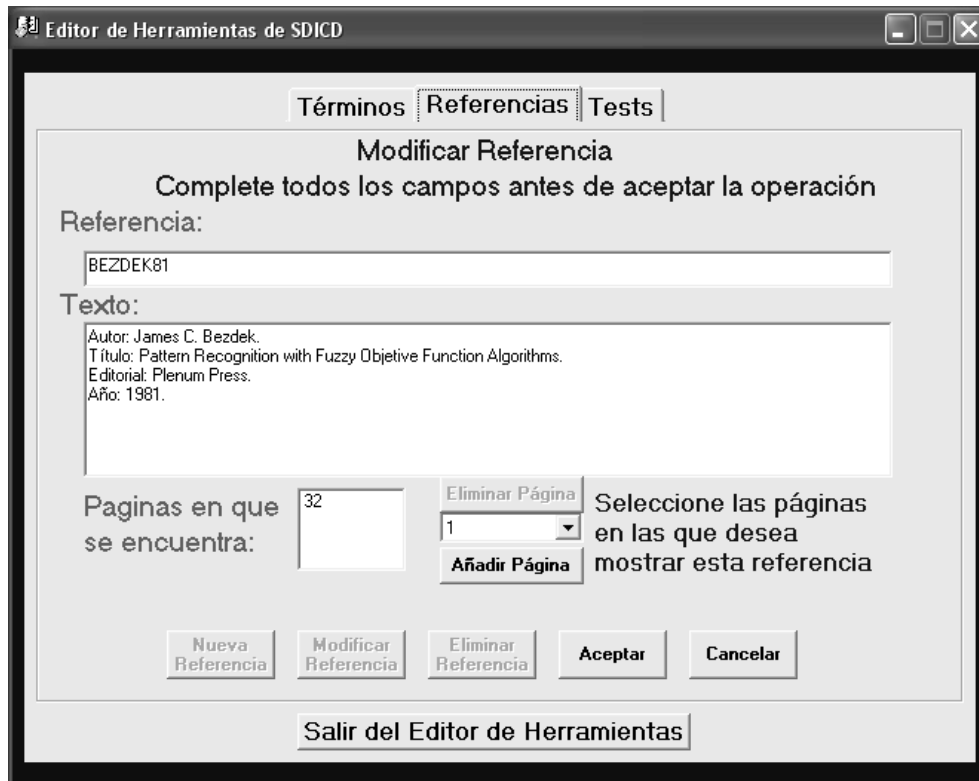


Figura 3.15 Modificar Referencia

- **Eliminar Referencia.** En el caso de que se pulse sobre este botón, el programa pedirá la confirmación para eliminar la referencia seleccionada, tal y como se muestra en la Figura 3.16. En el caso de que se pulse *Aceptar* el programa eliminará la referencia seleccionada y toda la información contenida por la misma. En caso de que se pulse *Cancelar* continuará la ejecución normal del Editor de Herramientas de SDICD.

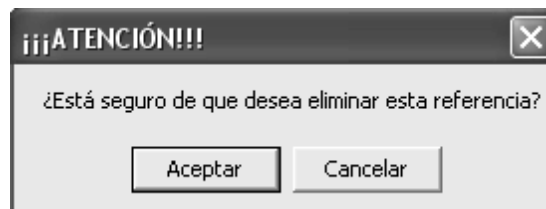


Figura 3.16 Eliminar Referencia

3.2.3.3 Test

Dentro del Editor de Herramientas, al pulsar sobre la pestaña Tests encontramos una ventana similar a la mostrada en la Figura 3.17.

Editor de Herramientas de SDICD

Términos | Referencias | Tests

Seleccione el Tema Nueva Pregunta

Pregunta:

Respuesta Correcta:

Respuesta Incorrecta 1:

Respuesta Incorrecta 2:

Complete todos los campos y confirme los datos

Aceptar Cancelar

Salir del Editor de Herramientas

Figura 3.17 Tests

En esta ventana nos encontramos los siguientes elementos:

- **Seleccione Tema:** Se trata de una lista desplegable, en la que se puede elegir entre todos los temas que componen el temario de SDICD.
- **Pregunta Anterior:** Este botón se usa para navegar por entre las preguntas incluidas en el tema seleccionado en la lista. Estará deshabilitado cuando la pregunta seleccionada sea la primera del tema.
- **Pregunta Siguiente:** Este botón se usa para navegar por entre las preguntas incluidas en el tema seleccionado en la lista. Estará deshabilitado cuando la pregunta seleccionada sea la última del tema.
- **Pregunta a/b:** Muestra información sobre la pregunta seleccionada en cada momento, *a* es el número de pregunta mostrado y *b* el total de preguntas existentes para el tema seleccionado en la lista. Cabe destacar que SDICD está configurado para que existan un mínimo de 10 preguntas por tema, por lo que si alguno de los temas contiene menos de 10 preguntas no se podrá realizar el test correspondiente.
- **Pregunta:** Caja de texto que contiene la pregunta seleccionada.
- **Respuesta Correcta:** Caja de texto que contiene la respuesta correcta a la pregunta seleccionada.

- **Respuesta Incorrecta 1:** Caja de texto que contiene una respuesta incorrecta a la pregunta seleccionada.
- **Respuesta Incorrecta 2:** Caja de texto que contiene una respuesta incorrecta a la pregunta seleccionada.
- **Crear una nueva pregunta:** Al pulsar sobre este botón la pantalla cambia de aspecto y muestra una ventana similar a la de la Figura 3.18. En esta ventana se muestran todos los campos necesarios para introducir una nueva pregunta. Una vez introducidos los datos, al pulsar sobre el botón *Aceptar* se guardarán los datos introducidos (siempre y cuando estos sean correctos, en el caso de que haya algún campo en blanco el programa no guardará los cambios y dará al Administrador la opción de corregir los errores) y si se pulsa *Cancelar* volveremos a la pantalla principal de referencias sin introducir los datos en los archivos del programa.



The image shows a screenshot of a software window titled "Editor de Herramientas de SDICD". At the top, there are three tabs: "Términos", "Referencias", and "Tests". Below the tabs, there is a section for "Nueva Pregunta". It starts with a dropdown menu labeled "Seleccione el Tema" with "Tema 1" selected. Below this is a large text input field labeled "Pregunta:". Underneath are three more text input fields labeled "Respuesta Correcta:", "Respuesta Incorrecta 1:", and "Respuesta Incorrecta 2:". At the bottom of the form, there is a message "Complete todos los campos y confirme los datos" and two buttons: "Aceptar" and "Cancelar". Below the form, there is a button labeled "Salir del editor de herramientas".

Figura 3.18 Nueva Pregunta

- **Modificar esta pregunta:** En el caso de que se pulse sobre este botón el programa pedirá la confirmación para modificar la pregunta seleccionada y en el caso de que se acepte la ventana se mostrará similar a la de la Figura 3.19. En este caso todos los campos contendrán información inicialmente, además esta información podrá ser modificada. En el caso de que se pulse el botón *Aceptar*, se guardará la información introducida (siempre y cuando estos sean correctos, en el caso de que haya algún campo en blanco el programa no guardará los cambios y dará al Administrador la opción de corregir los errores) y si se pulsa *Cancelar* el programa continuará con su ejecución sin guardar los cambios introducidos.

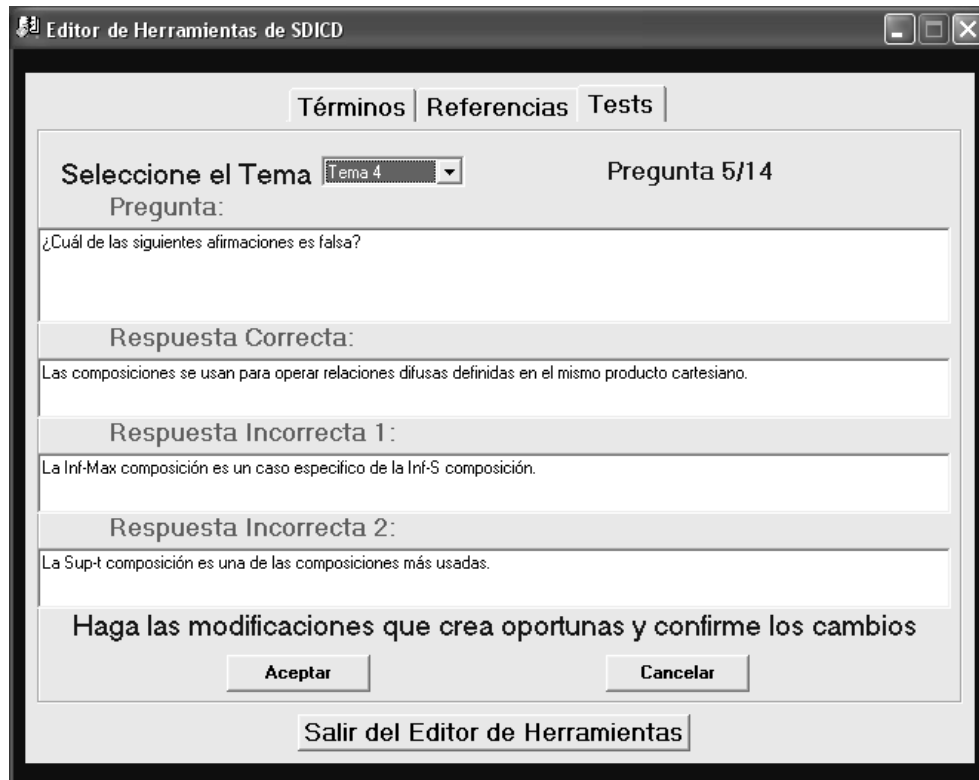


Figura 3.19 Modificar Referencia

- **Eliminar esta pregunta:** En el caso de que se pulse sobre este botón, el programa pedirá la confirmación para eliminar la pregunta seleccionada, tal y como se muestra en la Figura 3.20. En el caso de que se pulse *Aceptar* el programa eliminará la referencia seleccionada y toda la información contenida por la misma. En caso de que se pulse *Cancelar* continuará la ejecución normal del Editor de Herramientas de SDICD.

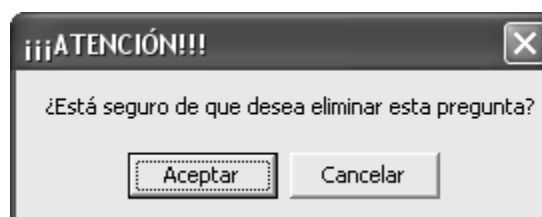


Figura 3.20 Eliminar Pregunta

3.2.3.4 Trasladar los cambios a otros equipos

Una vez realizados cambios en las herramientas de SDICD a través del *Editor de Herramientas*, una cuestión importante es como trasladar estos cambios a otros equipos en los que se instalado SDICD, a continuación se desarrollarán los pasos a seguir:

1. Abrir la carpeta en la que se está instalado SDICD en el equipo en el que se ha ejecutado el *Editor de Herramientas*, por defecto será "C:\Archivos del

programa\SDICD", encontraremos una serie de archivos tal y como se muestran en la Figura 3.21.



Figura 3.21 Eliminar Pregunta

2. Seleccionar la carpeta *Herramientas* y ejecutar la opción Edición/Copiar
3. Pegar la Carpeta en algún dispositivo de memoria.
4. Abrir la carpeta en la que se está instalado SDICD en el equipo en el que se quieren trasladar los cambios realizados mediante el uso del *Editor de Herramientas*, por defecto será "C:\Archivos del programa\SDICD", encontraremos una serie de archivos tal y como se muestran en la Figura 3.21.
5. Trasladamos la carpeta *Herramientas* desde el dispositivo de memoria a la carpeta abierta en el paso 4. Al pegar la carpeta *Herramientas*, aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura 3.22. Para ejecutar los cambios debemos pulsar repetidamente la opción *Sí*, o simplemente pulsar *Sí a todo*.

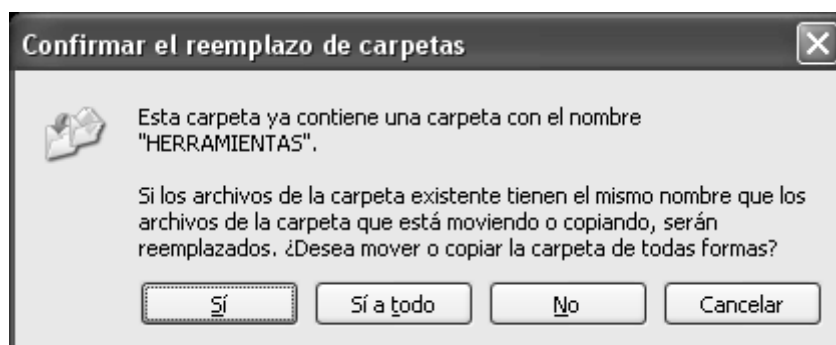


Figura 3.22 Eliminar Pregunta

6. Al cabo de unos segundos se trasladarán los archivos y se podrá ejecutar SDICD en este equipo con los cambios realizados por el Administrador en otro equipo.
7. Se recomienda al Administrador que cuando realice algún cambio, incluya en el CD de instalación la carpeta Herramientas con las instrucciones correspondientes para realizar la actualización.

3.3 MANUAL DE USUARIO DE SDICD

En el siguiente apartado se va a explicar el funcionamiento de SDICD para que cualquier alumno pueda comprender su funcionamiento.

3.3.1 Ejecutar SDICD

Si se han seguido los pasos de Instalación de SDICD por defecto se habrá instalado el programa en el directorio C:\Archivos de programa\SDICD, además podremos encontrar el SDICD.exe en el menú inicio de nuestro sistema operativo Windows, sirva de referencia la Figura 3.23.

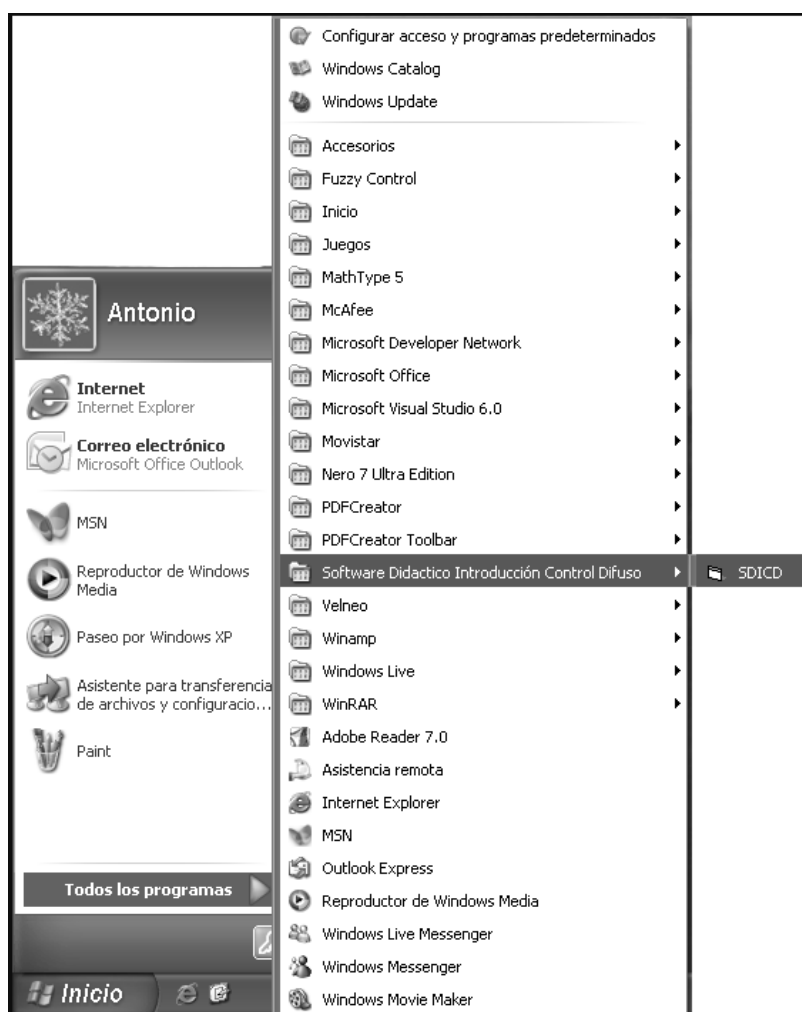


Figura 3.23 Localización de SDICD.exe

3.3.2 Pantalla de Inicio

Una vez pulsado SDICI.exe se habrá puesto en marcha la ejecución de Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso, una vez abierto nos encontraremos con una pantalla de inicio del programa, mostrada en la Figura 3.24.



Figura 3.24 Pantalla de Inicio de SDICD

Como se muestra en la Figura 3.24, en la pantalla de inicio podemos encontrar las siguientes opciones:

- 1. Barra de Menú.** En la parte superior de la pantalla podremos encontrar la barra de menú de SDICD, consta de 4 menús principales que son *Archivo*, *Herramientas*, *Ejemplos* y *Ayuda*, aunque en principio solo están habilitadas las opciones de *Archivo* y *Ayuda*. Esto es debido a que el programa no se muestra en su plenitud hasta que se ha seleccionado un usuario, ya sea el Administrador o un alumno. El funcionamiento de los menús se detalla en el apartado **3.3.4 Menús de SDICD**.
- 2. Pantalla Central.** La parte central de la pantalla (con fondo blanco) es la base que usa SDICD para mostrar toda la información a lo largo de su ejecución, en este momento muestra la información básica del programa, como es su nombre, diseñador, director,... así como los logotipos de la Universidad de Málaga, el de la E.U. Politécnica y el de el Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación.

3. **Página.** En la parte inferior izquierda de la pantalla, en la barra de estado, se muestra el número de página que se está visualizando en cada momento, para el caso de la portada se ha optado por llamarla "Página 0".
4. **Botones ÍNDICE y Página Siguiente.** En la parte inferior central, inicialmente encontramos 2 botones, Índice y Página Siguiente (simbolizado mediante una flecha dirigida hacia la derecha), ambos son usados a lo largo del programa, junto con el botón Página Anterior y los enlaces correspondientes a cada uno de los apartados para el direccionamiento del programa. Podemos encontrar información detallada del funcionamiento de estos botones en el apartado **3.3.5 Movilidad a lo largo de SDICD**.

El programa está concebido para que no se ejecute su contenido sin que haya un usuario registrado al mismo, por eso está restringido inicialmente y sólo se puede consultar la ayuda, cambiar la ruta de acceso a Acrobat, salir del programa ó entrar al *Control de Usuarios de SDICD*. Para ejecutar el Control de Usuarios se puede proceder de dos modos: pulsar el menú *Archivo*, y dentro de este *Control de Usuarios* o pulsar los botones *ÍNDICE* o *Página Siguiente*.

3.3.3 Control de Usuarios

Como se ha comentado en el apartado anterior el programa requiere que haya un usuario registrado para entrar en funcionamiento. En este apartado hay que distinguir dos tipos de usuario, el primero de ellos es el *Administrador*, el otro tipo será el *usuario estándar*, la diferencia entre un tipo y otro es que el Administrador podrá ejecutar ciertas herramientas del programa restringidas para los usuarios estándar. En este apartado nos centraremos en el funcionamiento del programa para un usuario estándar, en el apartado **3.2 Manual para el Administrador de SDICD** se muestran los detalles sobre todas las herramientas específicas para el Administrador que contiene el programa.

3.3.3.1 Abrir Usuario existente

Al ejecutar el Control de usuarios, ya sea desde el menú *Archivo* o al iniciar la el programa se cierra temporalmente la ventana principal de SDICD para mostrar la ventana de *Control de Usuarios de SDICD*. Inicialmente aparecerá una ventana similar a la de la Figura 3.25. En dicha ventana podemos encontrar las siguientes opciones:

1. **Contador de Usuarios.** Durante el tiempo se ejecute en Control de Usuarios se SDICD en la parte superior de la ventana se muestra a título informativo la frase: "Existen n usuarios registrados a SDICD en este equipo.", donde n es el número de usuarios existentes.

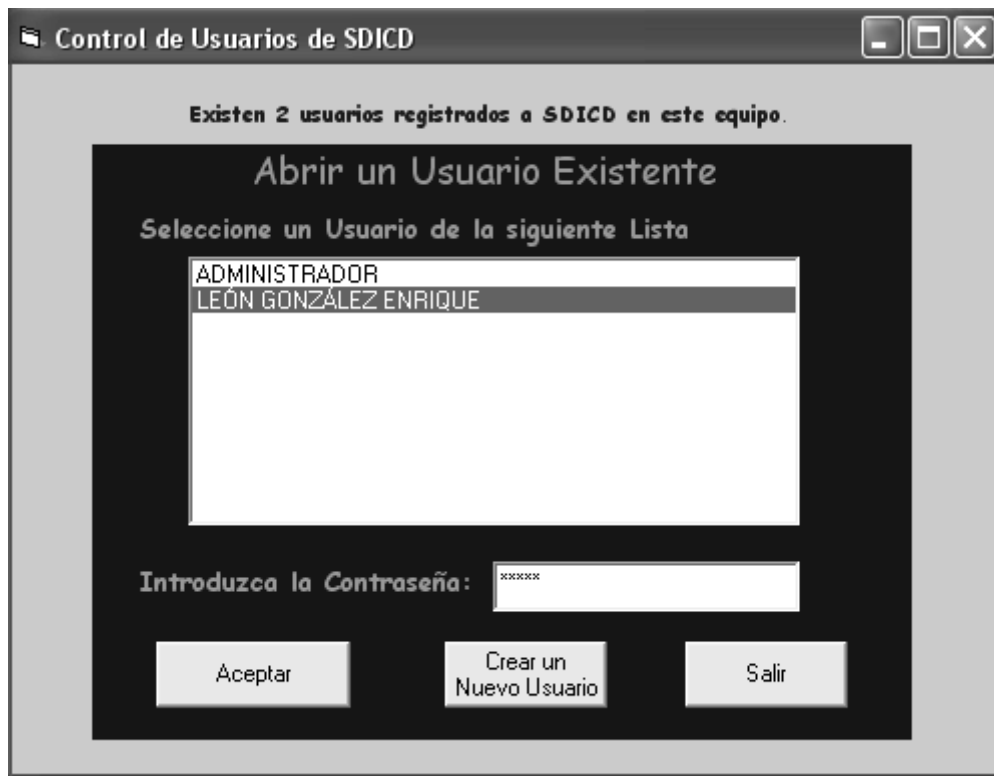


Figura 3.25 Pantalla Abrir un Usuario Existente

2. **Listado de Usuarios.** Situado en la parte central de la ventana incluye los nombres de todos los usuarios registrados al programa en ese equipo. La primera vez que se ejecute el programa únicamente se mostrará en el listado el usuario *Administrador*, esto será así hasta que no se introduzca otro usuario mediante el botón *Crear Nuevo Usuario*. En el momento en que se seleccione un elemento de la lista, se mostrará la caja de texto correspondiente a la contraseña y se habilitará el botón *Aceptar*.
3. **Introduzca la Contraseña.** Inicialmente oculto, una vez que se seleccione un elemento de la lista se muestra esta caja de texto en la que el usuario debe introducir la contraseña que estableció en el momento de dar de alta al usuario. Es indiferente el uso de mayúsculas o minúsculas.
4. **Botón "Aceptar".** Inicialmente inhabilitado, este botón se usa para comparar la contraseña introducida en la caja de texto con la contraseña original introducida en la fase de "Crear Nuevo Usuario" para el elemento correspondiente. Para iniciar sesión como Administrador procederá del mismo modo. Si la contraseña es correcta, Control de Usuarios pasará a la denominada Ventana de Usuario.
5. **Botón "Crear un Nuevo Usuario".** Se usa para pasar a la ventana de menú denominada Nuevo Usuario.
6. **Botón "Salir".** Mediante el uso de este botón se sale de la ventana Gestión de usuarios para volver a la ejecución de la ventana principal de SDICD. En el caso de

que no haya ningún usuario registrado volverá a la página 0, en caso contrario volverá a la página en que estaba en el momento que se ejecutó el *Control de Usuarios*.

3.3.3.2 Nuevo Usuario

Al pulsar sobre el botón *Crear Nuevo Usuario* en la ventana Abrir Usuario Existente se pasa a la ventana Nuevo Usuario. Esta ventana se usa para introducir el nombre y los apellidos de un nuevo alumno que quiere utilizar el programa, además es aquí donde el alumno establecerá la contraseña de acceso al programa. La ventana se es similar a la de la Figura 3.26.

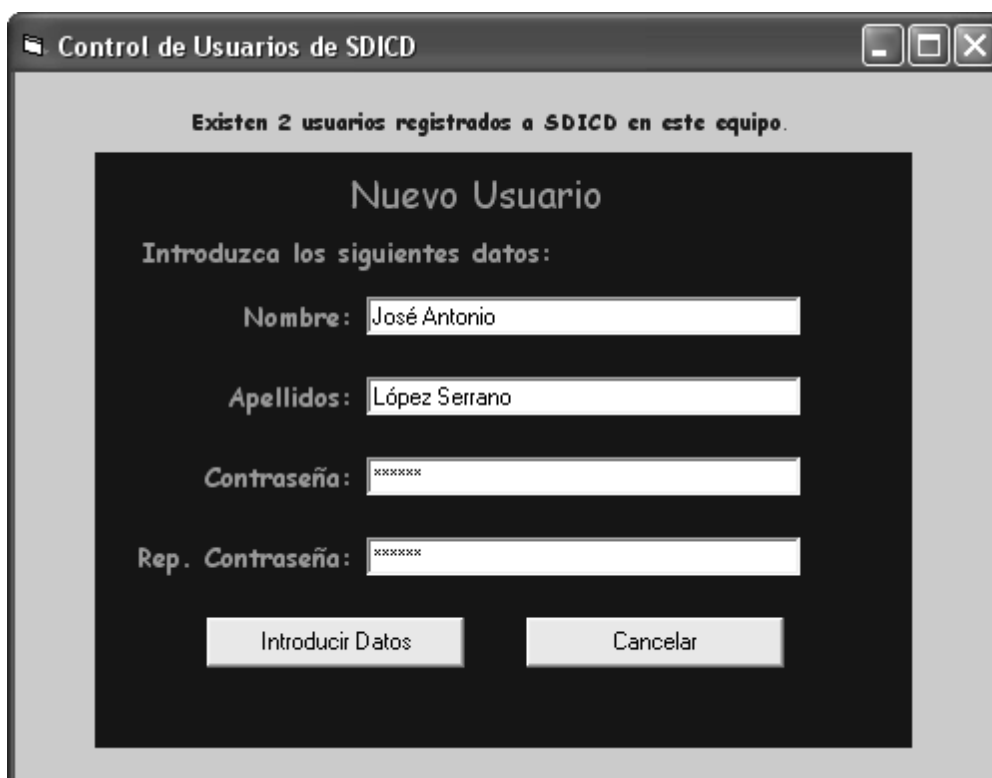


Figura 3.26 Pantalla Nuevo Usuario.

En esta ventana nos encontramos las siguientes elementos:

1. **Contador de Usuarios.** Durante el tiempo se ejecute en Control de Usuarios se SDICD en la parte superior de la ventana se muestra a título informativo la frase: "Existen n usuarios registrados a SDICD en este equipo.", donde *n* es el número de usuarios.
2. **Nombre.** Es una caja de texto donde el nuevo usuario debe introducir su Nombre.
3. **Apellidos.** Es una caja de texto donde el nuevo usuario debe introducir sus apellidos.

4. **Contraseña.** En esta caja de texto el nuevo usuario ha de introducir la contraseña que desee utilizar cada vez que ejecute SDICD. En esta caja el texto aparecerá de un modo oculto.
5. **Rep. Contraseña.** Para no dar lugar a error, se usa esta caja de texto. Aquí el usuario ha de volver a introducir la contraseña. Al igual que en la caja *Contraseña*, en esta también se mostrará el texto de un modo oculto.
6. **Botón Introducir Datos.** Al pulsar sobre este botón, el control de usuarios realiza las siguientes operaciones:
 - Elimina los espacios en blanco introducidos al principio o al final de cada caja de texto.
 - Comprueba que ninguno de los campos esté vacío.
 - Comprueba que los campos *Contraseña* y *Rep. Contraseña* son iguales.
 - Comprueba que no haya otro usuario registrado con el mismo nombre.

Si hay algún error, el Control de Usuarios indicará cual es y dará al usuario la opción de corregirlo. En el caso de que todo sea correcto aparecerá el mensaje que se muestra en la Figura 3.27.



Figura 3.27 Pantalla Nuevo Usuario-Registro.

7. **Botón Cancelar.** Si se pulsa este botón, La Ventana Control de usuarios volverá a su estado original, es decir, se mostrará el menú *Abrir un Usuario Existente*.

3.3.3.3 Ventana de Usuario

En esta ventana se muestra la progresión del usuario en la evaluación del programa, además se puede optar por iniciar sesión con este usuario o eliminarlo del listado de usuarios existentes en el programa. Se puede ver con detalle en la Figura 3.28.

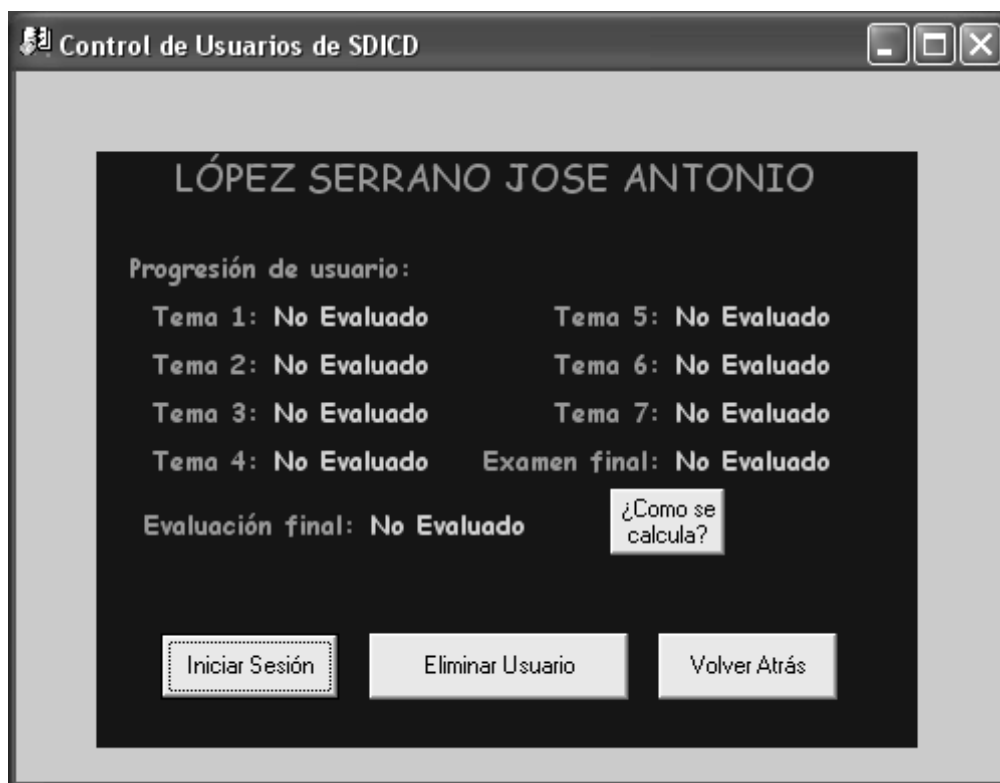


Figura 3.28 Ventana Usuario.

En la ventana se pueden observar las siguientes partes:

1. **Usuario.** En la parte superior de la pantalla azul se muestra el nombre del usuario que en este momento está ejecutando el Control de Usuarios.
2. **Progresión de usuario.** En este apartado se muestra la progresión obtenida por el usuario a largo de la ejecución de SDICD, mediante la realización de los 8 test que componen el temario, uno por cada uno de los temas más uno final que contiene todo el temario. Cada uno de los exámenes puede tomar valor entre 0 y 10, en el caso de que se muestre "No Evaluado" significa que el alumno no ha realizado el test correspondiente a lo largo de SDICD.
3. **Evaluación final.** En este apartado se muestra la nota final (entre 0 y 10) del alumno tras la realización de todos los test. En el caso de que se muestre "No evaluado" es porque no se ha realizado alguno de los test que componen el temario. El valor dará el 50% del peso a la nota del examen final y el otro 50% lo repartirá de forma ponderada a la nota de cada uno de los test correspondientes a los 7 temas que componen SDICD.

4. **Botón ¿Cómo se calcula?.** Muestra durante la ejecución del Control de Usuarios como se calcula el valor de Evaluación final.
5. **Botón Iniciar Sesión.** Al pulsar este botón se cierra el Control de Usuarios se vuelve a la ventana principal de SDICD. En el caso de que hasta el momento no hubiera ningún usuario registrado volverá a la página 0, en caso contrario volverá a la página en que estaba en el momento que se ejecuto el *Control de Usuarios*.
6. **Botón Eliminar Usuario.** Este botón se usa para eliminar al usuario de la base de usuarios de SDICD así como del Control de Usuarios, antes de realizar la eliminación pedirá una confirmación específica explicando lo que sucederá si se confirma la operación. Habrá que tener en cuenta que para entrar en esta ventana hay que introducir la contraseña del usuario.
7. **Botón Volver Atrás.** Si se pulsa sobre este botón se vuelve a la ventana principal del Control de Usuarios: *Abrir un Usuario Existente*.

Una vez que se ha iniciado sesión se vuelve al libro electrónico SDICD, como se muestra en la Figura 3.24, a diferencia de la pantalla inicial del programa, ahora están habilitados todos los menús, está habilitada la movilidad a través del libro y se muestra en la barra de estado (parte inferior derecha) el nombre del usuario que está ejecutando el programa.

3.3.4 Menús en SDICD

Como se indica en el apartado **3.3.2 Pantalla de Inicio** en SDID hay 4 tipos de menú principales: *Archivo*, *Herramientas*, *Ejemplos* y *Ayuda*. Al iniciar el programa (hasta que se inicia sesión como un usuario registrado) la movilidad por estos menús está restringida a *Salir*, ejecutar el *Control de Usuarios* o cambiar la *Ruta de Acrobat Reader* dentro del menú *Archivo* o consultar *Acerca de SDICD*, *Manual de Usuario* o *Glosario PDF* en el menú *Ayuda*.

Una vez que se ha iniciado sesión como un usuario registrado se habilitan todos los menús del programa. En el presente apartado se va a desglosar el funcionamiento de los menús incluidos en el programa.

3.3.4.1 Menú Archivo

Al pulsar sobre *Archivo* de la barra de menús de SDICD se despliega las siguientes opciones:

- **Control de Usuarios.** Esta opción se utiliza para ejecutar en cualquier momento el *Control de Usuarios*, cuyo funcionamiento se detalla en el apartado **3.3.3 Control de Usuarios**.
- **Imprimir.** Al ejecutar el menú *Imprimir* se muestra en pantalla una ventana de dialogo Imprimir estándar de Windows como se muestra en la Figura 3.29. En esta ventana se puede *Seleccionar la impresora* deseada así como sus preferencias de

impresión. En la opción *Intervalo de páginas* se puede optar por imprimir el contenido de SDICD de forma íntegra o imprimir intervalos de páginas desde 0 hasta 150. También se puede elegir el *Número de copias* que se desea realizar.



Figura 3.29 Ventana de dialogo Imprimir

- **Ruta Acrobat Reader.** SDICD incluye en su menú *Ayuda* las opciones *Manual de Usuario* y *Glosario PDF*, ambas opciones requieren tener instalado *Adobe Acrobat Reader* en alguna de sus versiones en el equipo en el que se está ejecutando el programa.

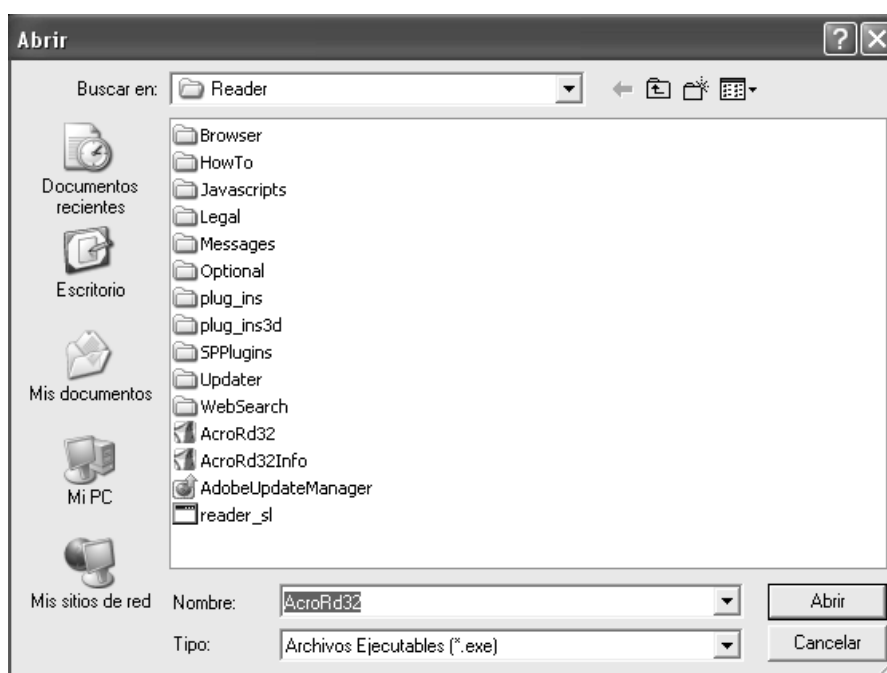


Figura 3.30 Ventana de dialogo Abrir Acrobat Reader

Esta opción se utiliza para orientar a SDICD la ruta de acceso al archivo ejecutable de Adobe Acrobat Reader mediante una ventana de dialogo *Abrir* estándar de Windows, como la que se muestra en la Figura 3.30. En el caso de que no se tenga instalado el programa Adobe Acrobat Reader, se puede instalar siguiendo los pasos del apartado **3.1 Instalación de SDICD**, dicho programa está incluido en el CD de Instalación de SDICD.

3.3.4.2 Menú Herramientas

El menú *Herramientas* incluido dentro de la barra de menús de SDICD se utiliza para visualizar las herramientas que SDICD utiliza para un desarrollo comprensible del temario así como para la evaluación del mismo. El menú herramientas se divide en 3 sub-menús: *Referencias*, *Términos* y *Test*. Todas estas herramientas se pueden ampliar o modificar mediante el uso del *Editor de Herramientas*. A continuación se procederá a explicar en qué consiste cada uno de estos sub-menús:

- **Referencias.** A lo largo de las páginas incluidas en SDICD se pueden encontrar incluidos en los textos una serie de referencias resaltadas en color naranja, hay dos modos de consultar estas referencias. Una de ellas es mediante el botón *Referencia* que se muestra bajo la página en que aparece esa referencia, cuyo funcionamiento se explica en el apartado **3.3.6 Botones Términos y Referencias** de este manual, la otra forma es mediante el sub-menú *Referencias* incluido en el menú *Herramientas*. Al Abrir el sub-menú se despliega una lista como la que se ve en la Figura 3.31.

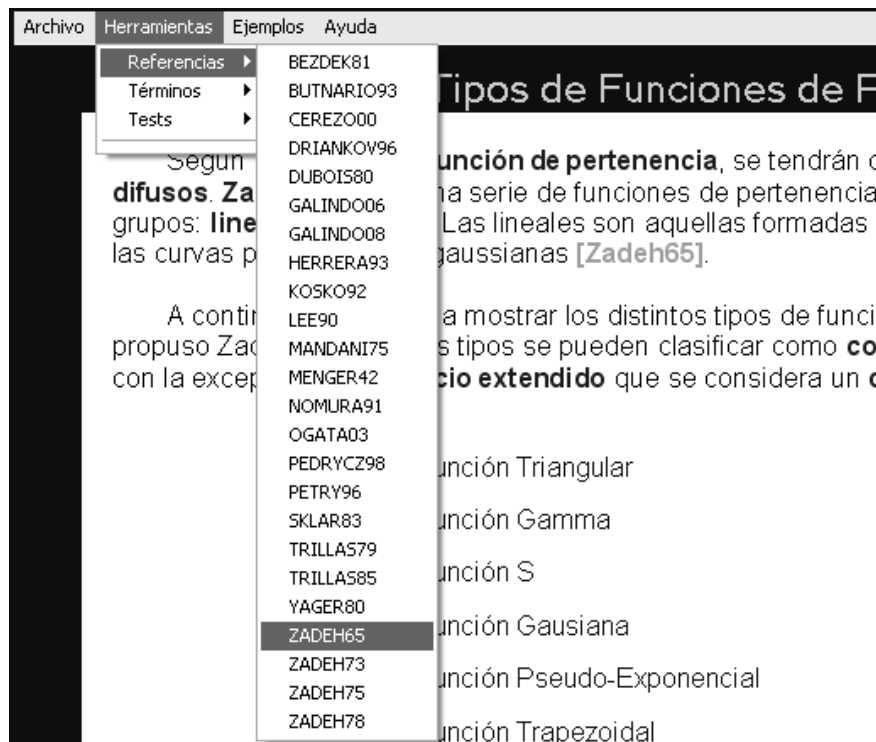


Figura 3.31 Sub-menú Referencias

El listado desplegado incluye todas las referencias incluidas en SDICD, se pueden consultar en cualquier momento. Al pulsar sobre cualquiera de ellas se muestra una ventana con la información contenida en la referencia, dicha ventana se muestra en la Figura 3.32.

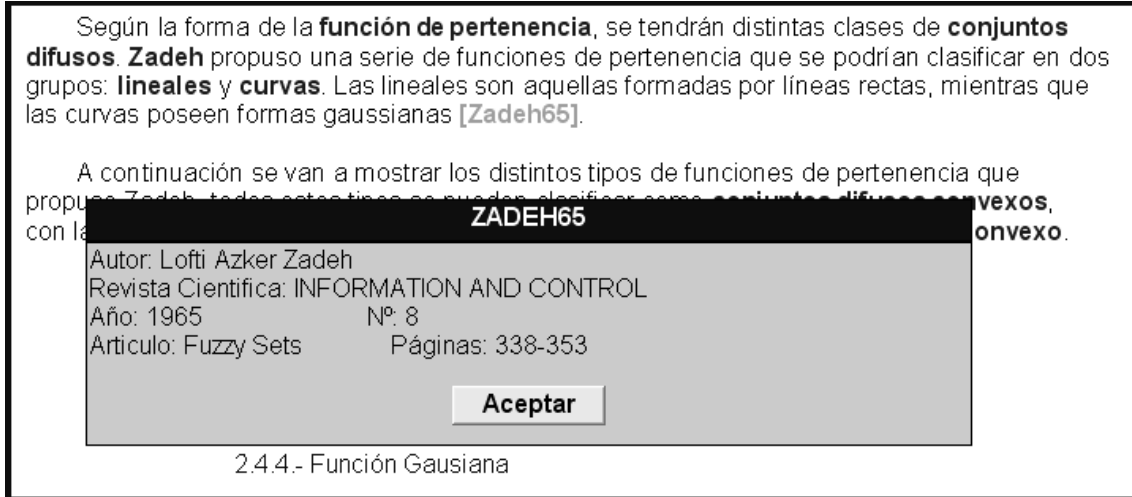


Figura 3.32 Ventana de Referencia

Esta ventana desaparecerá en el momento en que se pulse el botón *Aceptar*.

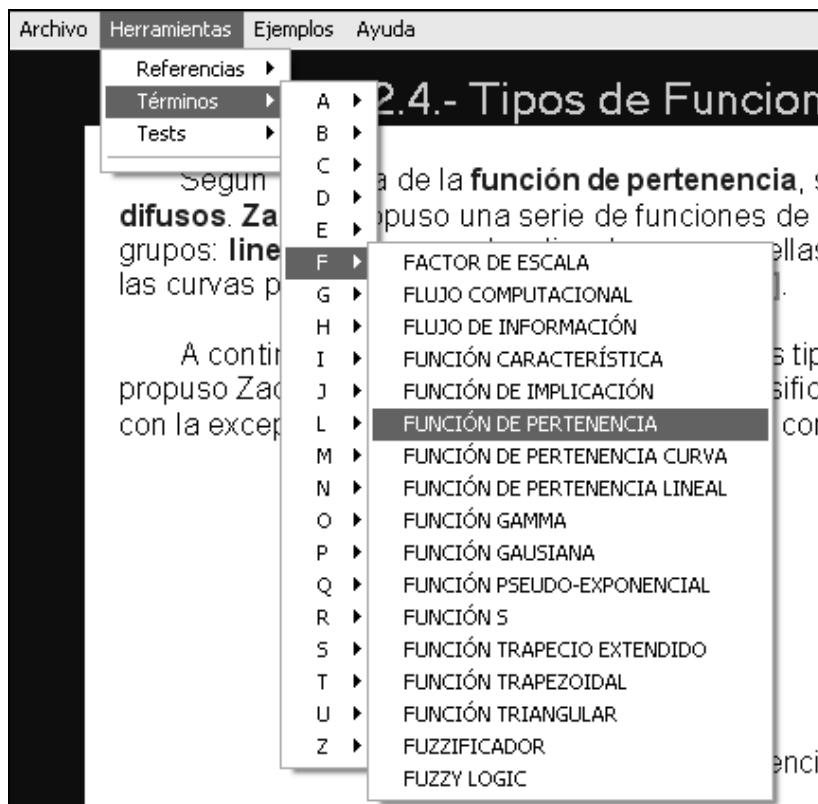


Figura 3.33 Sub-menú Términos

- **Términos.** Al igual que pasa con las referencias, a lo largo de las páginas incluidas en SDICD se pueden encontrar incluidos en los textos una serie de términos resaltados en

color azul, hay dos modos de consultar estos términos. Una de ellas es mediante el botón *Términos* que se muestra bajo la página en que aparece ese término (apartado **3.3.6 Botones Términos y Referencias**), la otra forma es mediante el sub-menú *Términos* incluido en el menú *Herramientas*. Al Abrir el sub-menú se despliega una lista como la que se ve en la Figura 3.33.

El listado desplegado incluye todos los términos incluidos en SDICD, se pueden consultar en cualquier momento, y lo hace como se muestra en la Figura 3.33 clasificándolos por su inicial. Al pulsar sobre cualquiera de ellos se muestra una ventana con la información contenida en el término, dicha ventana se muestra en la Figura 3.34.

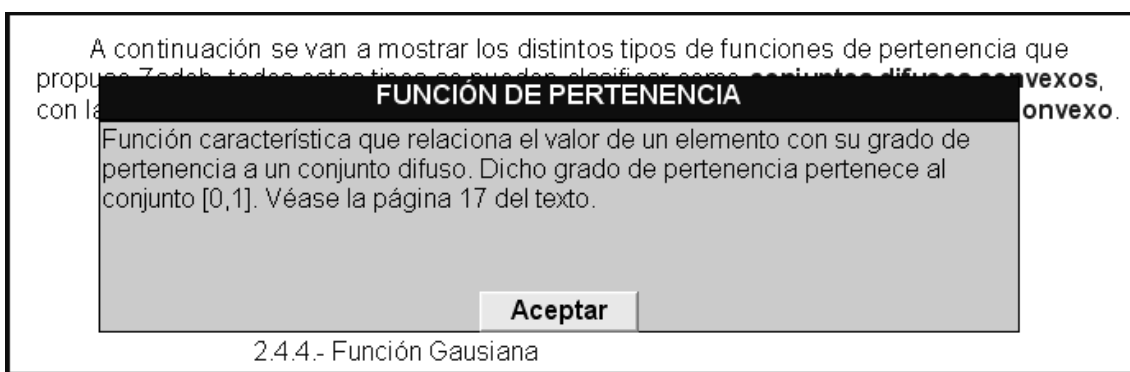


Figura 3.34 Ventana de Término

Esta ventana desaparecerá en el momento en que se pulse el botón *Aceptar*.

- **Tests.** SDICD da a sus usuarios la capacidad de autoevaluarse mediante la realización de una serie de tests, en total son 8, uno por cada tema incluido en el temario y un examen de todo el contenido.

Cuando seguimos el temario de SDICD nos encontramos que al pasar por la última página de cada uno de los temas el programa nos ofrece la opción de realizar un test. Además de esta opción, si se despliega el sub-menú *Tests* del menú *Herramientas* nos encontramos con la posibilidad de realizar cada uno de los tests que ofrece el programa. El *Test General* se encuentra inicialmente deshabilitado, esto es así porque no se puede realizar dicho test hasta que no se hayan realizada todos y cada uno de los tests pertenecientes a cada uno de los temas.

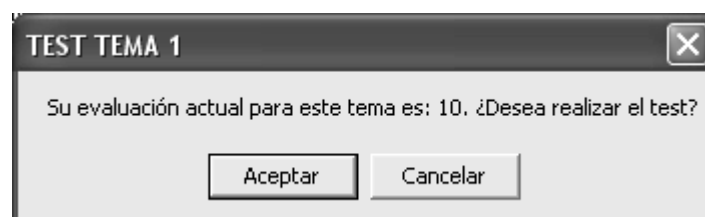


Figura 3.35 Pregunta Realización de Test

Al pulsar sobre cualquiera de las opciones disponibles en el sub-menú *Tests* se mostrará en la pantalla una ventana similar a la que se muestra en la Figura 3.35. Si la opción elegida es *Cancelar* se cierra la ventana y se sigue con la ejecución de SDICD, en el caso de que se pulse *Aceptar* se ejecutará la evaluación del test elegido, para más información al respecto véase el apartado **3.3.7 Tests**.

3.3.4.3 Menú Ejemplos

SDICD incluye dos ejemplos que se presentan como fundamentales para el entendimiento del Control Difuso, estos ejemplos son la simulación del *Control Difuso de un Cruce de Semáforos* y la simulación del *Control difuso de un Invernadero*. Al pulsar sobre el menú *Ejemplos*, SDICD nos da la posibilidad de ejecutar cada una de estas dos simulaciones. El funcionamiento de cada uno de estos ejemplos se explica en la apartado **3.3.9 Ejemplos** incluido en este manual.

3.3.4.4 Menú Ayuda

Para poder orientar a un usuario de SDICD sobre el programa que está ejecutando se usa el Menú *Ayuda*, que consta de tres sub-menús que se explican a continuación:

- **Acerca de SDICD.** Al pulsar sobre esta opción incluida en el Menú Ayuda, aparecerá una ventana que incluye información acerca del programa que se está ejecutando, tal y como se muestra en la Figura 3.36.



Figura 3.36 Ventana Acerca de SDICD

Al pulsar sobre el botón *ACEPTAR*, SDICD la cierra para poder continuar con la ejecución del mismo

- **Manual de Usuario.** Al abrir esta opción incluida en el Menú Ayuda se abre una aplicación de Adobe Acrobat Reader con el archivo PDF: SDICD_manual_de_usuario.pdf. En Este archivo PDF podemos encontrar el manual de usuario incluido en el apartado **3.3 Manual de Usuario** incluido en esta memoria.

Para poder abrir esta aplicación se deben resolver dos cuestiones, la primera de ellas en que es necesario tener instalado en el equipo en que se está ejecutando SDICD el programa Adobe Acrobat Reader en cualquiera de sus versiones, la segunda es que SDICD debe conocer la ruta de acceso al archivo ejecutable de Adobe Acrobat Reader. En el caso de que no se cumpla alguna de estas premisas aparecerá una ventana de información como la que se muestra en la Figura 3.37.

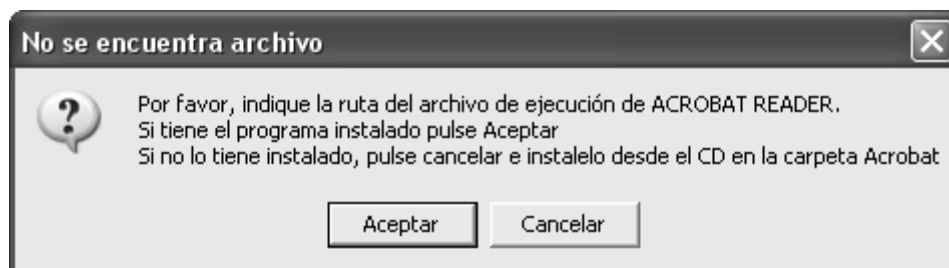


Figura 3.37 Ventana No se encuentra el archivo

Si se tiene instalado el Adobe Acrobat Reader, al ejecutar la opción *Aceptar* del mensaje mostrado se abrirá el proceso *Ruta Acrobat Reader*, mostrado en el apartado **3.3.4.1 Menú Archivo** del presente manual de Usuario. En el caso de que no se tenga instalado se puede resolver siguiendo los pasos indicados en el apartado **3.1 Instalación de SDICD**.

- **Glosario PDF.** Al abrir esta opción incluida en el menú *Ayuda* se abre una aplicación de Adobe Acrobat Reader con el archivo PDF: SDICD_glosario.pdf. En este archivo PDF podemos encontrar el glosario completo incluido en SDICD.

Para poder abrir esta aplicación se deben resolver dos cuestiones, la primera de ellas en que es necesario tener instalado en el equipo en que se está ejecutando SDICD el programa Adobe Acrobat Reader en cualquiera de sus versiones, la segunda es que SDICD debe conocer la ruta de acceso al archivo ejecutable de Adobe Acrobat Reader. En el caso de que no se cumpla alguna de estas premisas aparecerá una ventana de información como la que se muestra en la Figura 3.37.

Si se tiene instalado el Adobe Acrobat Reader, al ejecutar la opción *Aceptar* del mensaje mostrado se abrirá el proceso *Ruta Acrobat Reader*, mostrado en el apartado **3.3.4.1 Menú Archivo** del presente manual. En el caso de que no se tenga instalado se puede resolver siguiendo los pasos indicados en el apartado **3.1 Instalación de SDICD**.

3.3.5 Movilidad en el programa

Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso es un libro electrónico, y como tal está compuesto por 151 páginas, desde la página 0 (portada) hasta la 150. Durante la ejecución del programa encontramos una serie de herramientas que utilizamos para movernos a lo largo de estas páginas, la primera de ellas son los *Botones Página Anterior, Índice y Página Siguiente* (situados en la parte inferior de la ventana principal de SDICD en la mayoría de sus páginas), otra es mediante la utilización del teclado del equipo en que se está ejecutando SDICD, y la tercera es mediante la utilización de enlaces que se muestran en algunas de las páginas y que por norma general nos suelen conducir a sub-apartados del temario al que se refiere la página en que se encuentran.

A continuación se procederá a explicar en detalle el funcionamiento de cada una de las herramientas de movilidad que encontramos a lo largo de SDICD.

3.3.5.1 Botones página Anterior, Índice, página Siguiente.

La herramienta principal para moverse a través de las páginas de SDICD son los tres botones que encontramos en la parte inferior de la ventana en el centro, y que podemos observar en la Figura 3.38.



Figura 3.38 Página Anterior, Índice y Página Siguiente

A continuación se procederá a explicar las características de cada uno de estos botones:

- **Página Anterior.** Este botón está representado por una flecha apuntando hacia el lado izquierdo, es visible en todas las páginas del libro a excepción de la página 0 (portada). En el caso de que se pulse sobre el mismo el programa mostrará la página inmediatamente anterior a la que se está mostrando. En el caso de que situemos el puntero del ratón sobre el mismo se mostrará el texto "Página Anterior".
- **Índice.** El botón índice, situado en la parte central de la Figura, estará visible en todas las páginas de SDICD. Si se pulsa sobre el mismo en cualquier momento se mostrará la página 1 (primera página del Índice General).
- **Página Siguiente.** Este botón está representado por una flecha apuntando hacia el lado derecho, es visible en todas las páginas del libro a excepción de la página 150 (última página). En el caso de que se pulse sobre el mismo el programa mostrará la página inmediatamente posterior a la que se está mostrando. En el caso de que situemos el puntero del ratón sobre el mismo se mostrará el texto "Página Siguiente".

3.3.5.2 Atajos de teclado

Durante la ejecución de SDICD podemos encontrar una serie de atajos mediante el uso de diversas teclas del teclado de nuestro equipo. Las teclas que usa el programa y su descripción pueden observarse en la tabla 3.1.

TECLA	DESCRIPCIÓN
Intro	Ejecuta el Menú Manual de Usuario, dentro del menú Ayuda.
Flecha Izquierda	Página Anterior.
Flecha Derecha	Página Siguiente.
RePág	Página Anterior.
AvPág	Página Siguiente.
1	Se muestra la página 8, primera del Tema 1.
2	Se muestra la página 14, primera del Tema 2.
3	Se muestra la página 34, primera del Tema 3.
4	Se muestra la página 64, primera del Tema 4.
5	Se muestra la página 79, primera del Tema 5.
6	Se muestra la página 86, primera del Tema 6.
7	Se muestra la página 138, primera del Tema 7.
0	Se muestra la página 0, portada.
P	Se ejecuta el menú Imprimir.

Tabla 3.1 Atajos de Teclado

3.3.5.3 Enlaces

La tercera herramienta fundamental para desplazarnos a través de las páginas de SDICD es el uso de enlaces directos que se muestran en algunas de las páginas, normalmente estos enlaces corresponderán a sub-niveles del temario que se está mostrando en la página actual.

Estos enlaces siempre se muestran bajo el texto contenido por el temario para esa página, podemos observar su naturaleza en la Figura 3.39.

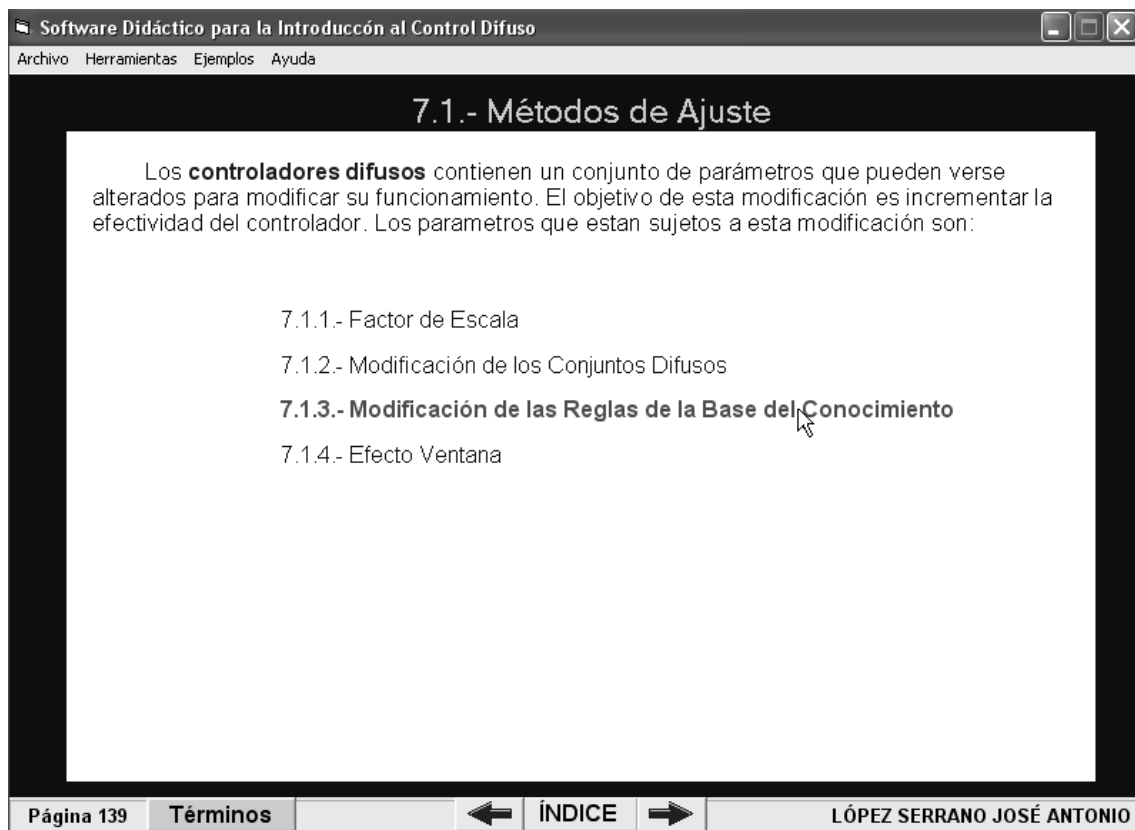


Figura 3.39 Enlaces

Como se muestra en la figura estos enlaces tienen el formato "Apartado.- Nombre de Apartado", son de color azul y en el momento en que se posa el ratón sobre el mismo cambia su estado a rojo y en negrita. Si se pulsa sobre cualquiera de ellos, el programa nos trasladará a la página que contiene el apartado mostrado en el enlace.

3.3.6 Botones Términos y Referencias

Al navegar por las páginas de SDICD podemos encontrar que en la mayoría de las páginas se muestran uno o dos botones de nombre *Términos* y *Referencias*, situados entre el espacio de la barra de estado donde se muestra el Número de Página y el botón *Página Anterior*, como se muestra en la Figura 3.40. Estos botones se muestran cuando existe algún término y/o referencia resaltado dentro del texto contenido por esa página, las referencias se mostrarán en color naranja y entre corchetes y los términos en color azul.

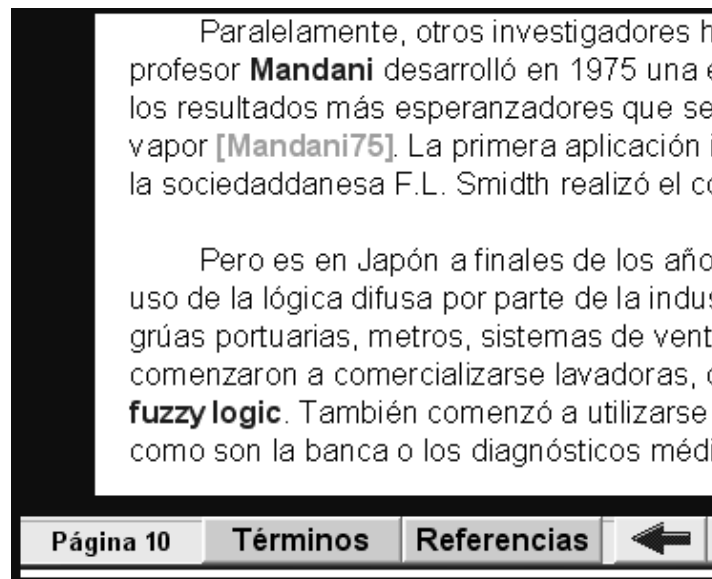


Figura 3.40 Términos y Referencias

Al pulsar sobre cualquiera de estos dos botones se desplegará una lista que mostrará todos los términos o referencias mostradas en esa página, como se muestra en la Figura 3.41. Al pulsar sobre cualquier término o referencia de la lista aparecerá en la pantalla una ventana similar a la que aparece al seleccionar cualquier término o referencia a través del Menú *Herramientas/Términos* o del Menú *Herramientas/Referencias*, que contiene la información correspondiente al término o a la referencia seleccionada en la lista, y que desaparecerá de la pantalla en el momento que se pulse el botón *Aceptar*, Menú *Herramientas, Página Anterior, Índice, Página Siguiente, Términos* o *Referencias*.

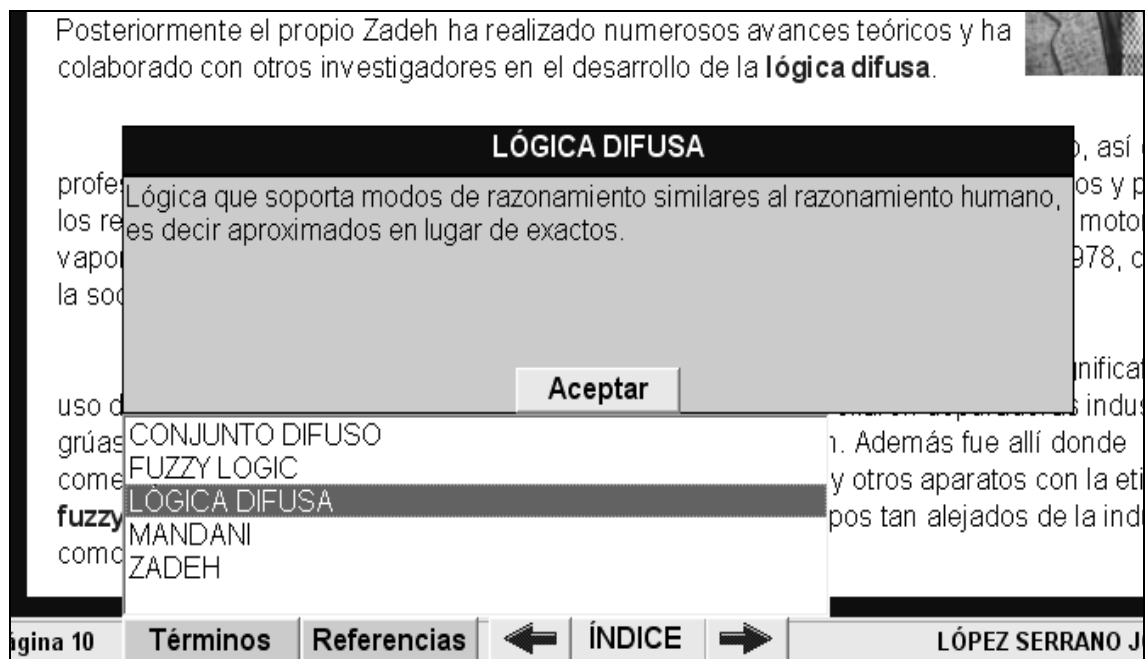


Figura 3.41 Ejemplo de Términos y Referencias

3.3.7 Test

Antes de empezar a explicar el modo de evaluación de SDICD, hay que decir que el software contiene en sus archivos más de 140 preguntas repartidas entre sus 7 temas. Navegando por el programa, al pasar por la última página de cada uno de los 7 temas nos encontraremos con la opción de realizar el test correspondiente al tema en que nos encontramos tal y como se muestra en la Figura 3.42.

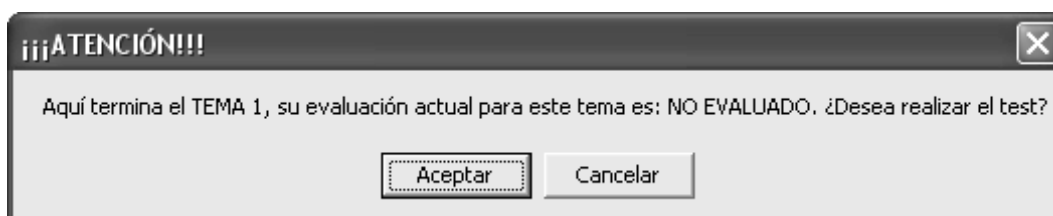


Figura 3.42 Ejemplo de Términos y Referencias

En el caso de que la opción elegida sea *Cancelar* el programa ejecutará la opción elegida antes de que surgiera el mensaje. Si la opción elegida es *Aceptar*, el programa procederá a evaluar al alumno al igual que lo hará si se ejecuta el test a través del Menú *Herramientas/Test* como se indica en el apartado **3.3.4.2 Menú Herramientas** del presente manual de usuario, y que se desarrolla a continuación.

3.3.7.1 Realización del test

Si se acepta realizar el test para cualquiera de los temas, se cierra la ventana principal de SDICD y se abre una nueva ventana.

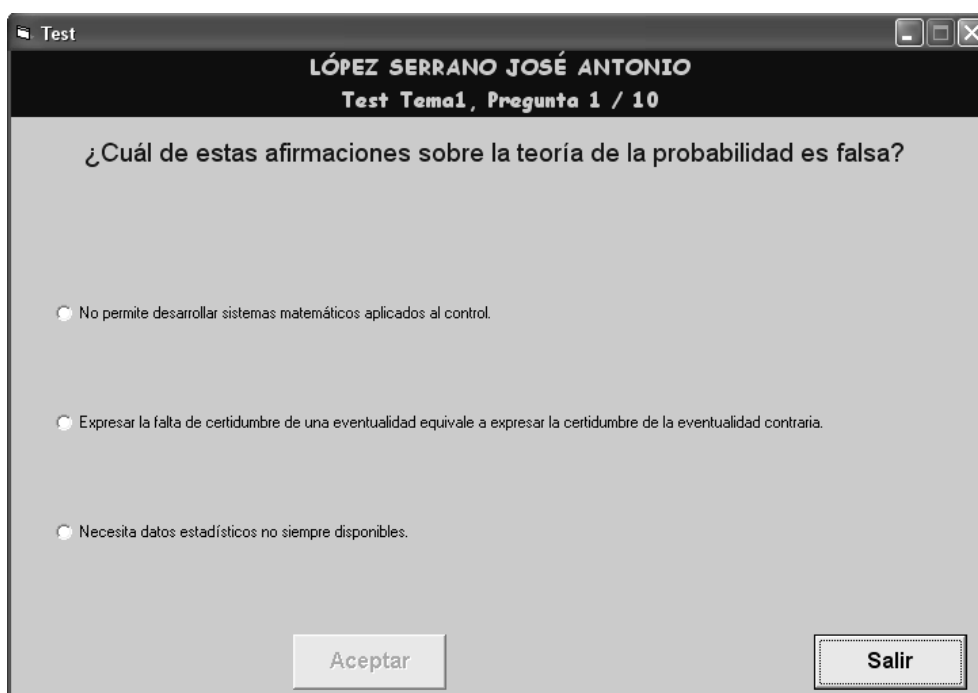


Figura 3.43 Ventana Test

El programa nos evaluará mediante un test compuesto por 10 preguntas elegidas aleatoriamente de las contenidas por SDICD para ese tema, además tanto el orden de las preguntas como el de las opciones de respuesta también será aleatorio.

En la Figura 3.43 podemos observar la nueva ventana abierta al decidir realizar un test, de arriba abajo en la ventana se muestra lo siguiente:

- **Información sobre el usuario y la pregunta.** En la parte superior de la ventana y sobre un fondo azul se muestra en primer lugar el nombre del usuario que ha iniciado sesión en SDICD y que ha optado por la realización del test, en segundo lugar muestra el test al que corresponde la pregunta y el número de pregunta sobre el total de las mismas.
- **Pregunta.** En color azul se muestra el contenido de la pregunta.
- **Opciones de respuesta.** El alumno posee 3 opciones entre las que deberá elegir la opción que crea correcta, solo podrá elegir una de las 3. En el momento en que se pulse sobre cualquiera de las opciones se habilitará el botón *Aceptar* que inicialmente se muestra deshabilitado.
- **Botón Aceptar.** En el momento en que se pulse el botón *Aceptar* significa que el alumno da por válida la opción elegida y el programa pasará a mostrar la siguiente pregunta, en la que volverá a estar inhabilitado.
- **Botón Salir.** En el momento en que se pulse el botón salir durante la realización del test, el programa pedirá la confirmación para salir, si se acepta cerrará la ventana del test para volver a la ventana principal de SDICD sin guardar los resultados obtenidos.

3.3.7.2 Resultado del test

En el momento en que se han realizado todas las preguntas se muestra al usuario la puntuación obtenida, pudiéndose ver la ventana *test* tal y como en la Figura 3.44. Hay que tener en cuenta que en este momento el programa ha registrado los datos de la puntuación del test del usuario.

En esta ocasión, de arriba abajo, la ventana muestra lo siguiente:

- **Información sobre el usuario y el test.** En la parte superior de la ventana y sobre un fondo azul se muestra en primer lugar el nombre del usuario que ha iniciado sesión en SDICD y que ha optado por la realización del test, en segundo lugar muestra el nombre del test que el usuario acaba de realizar.
- **Puntuación.** En color azul se muestra la puntuación obtenida en el test.

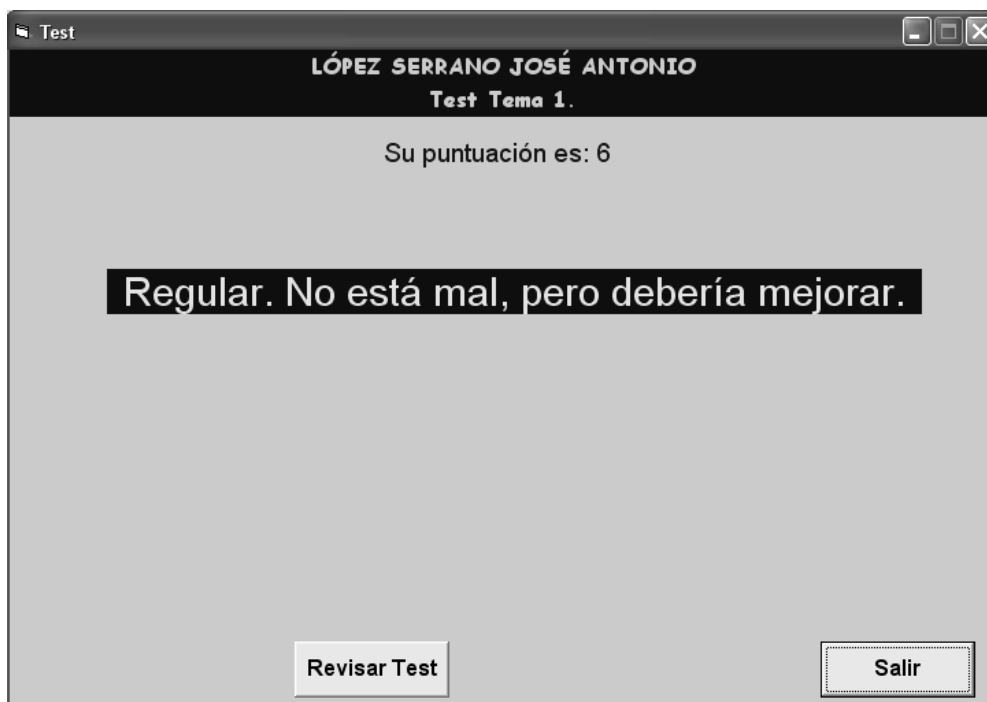


Figura 3.44 Ventana Test, puntuación

- **Evaluación y comentario.** En el centro de la ventana, sobre fondo azul se muestra un texto con la evaluación correspondiente a la puntuación obtenida y un comentario sobre la misma. Estas evaluaciones y comentarios con respecto a las puntuaciones son las siguientes:
 - Si puntuación es menor que 3: *"Muy Mal. Por favor, estudie el contenido del temario."*
 - Si puntuación es 3 o mayor, pero menor que 5: *"Mal. Por favor vuelva a estudiar el contenido del temario."*
 - Si puntuación es 5 o mayor, pero menor que 7: *"Regular. No está mal, pero debería mejorar."*
 - Si puntuación es 7 o mayor, pero menor que 9: *"Bien. Ha captado la base de la materia."*
 - Si puntuación es 9 o mayor: *"Muy Bien. Ha demostrado altos conocimientos del temario."*
- **Botón Revisar Test.** En el momento en que se pulse el botón Revisar Test se pasa a una revisión del test en la que el alumno puede comprobar las respuestas marcadas y las respuestas correctas, para más información véase el apartado **3.3.7.3 Revisión del test.**

- **Botón Salir.** Si se pulsa este botón en este momento, el programa pedirá la confirmación para salir, si se acepta cerrará la ventana del test para volver a la ventana principal de SDICD guardando los resultados obtenidos. Para consultar los resultados se debe ir al Control de Usuarios a través el menú Archivo, más información en el apartado **3.3.3 Control de Usuarios.**

3.3.7.3 Revisión del test

Si el alumno opta por revisar el test, la ventana cambia su apariencia para volver a mostrar la pregunta nº 1 que fue formulada al alumno junto con sus tres respuestas, tal y como se observa en la Figura 3.45.



Figura 3.45 Revisión del Test, Respuesta Correcta

Al cabo de unos segundos se marcará en color azul la opción correcta, y tras esto se pasa a mostrar la opción elegida por el alumno y cotejarla con la correcta, de tal modo que si la respuesta elegida se muestra en color verdes si fue correcta (Figura 3.45) o en color rojo si fue incorrecta (Figura 3.46).

En la Figuras 3.45 y 3.46 se pueden observar los contenidos de la ventana revisión del test, a continuación se procede a la descripción de todos sus elementos de arriba abajo:

- **Información sobre el usuario y la pregunta.** En la parte superior de la ventana y sobre un fondo azul se muestra en primer lugar el nombre del usuario que ha iniciado

sesión en SDICD y que ha optado por la realización del test, en segundo lugar muestra el test al que corresponde la pregunta y el número de pregunta sobre el total de las mismas.



Figura 3.46 Revisión del Test, Respuesta Incorrecta

- **Pregunta.** En color azul se muestra el contenido de la pregunta.
- **Opciones de respuesta.** En esta ocasión las opciones se muestran en el mismo orden en que se mostraron durante la realización del test, tal y como se ha comentado anteriormente las opciones pueden cambiar de color en función de que sean la respuesta correcta y/o la elegida. En el caso de que se pulse sobre cualquiera de las opciones el programa no ejecutará ningún cambio.
- **Leyenda de Colores.** En este cuadro se muestra en un modo escueto la información referente al significado del cambio de color de las opciones.
- **Botón Abandonar Revisión.** En el momento en que se pulse este botón el programa volverá a la ventana *Resultado del test*.
- **Botones Pregunta Anterior y Pregunta Siguiente.** Simbolizados con 2 flechas, se usan para desplazarse por entre las preguntas contenidas en el test para realizar su revisión, en la primera pregunta estará deshabilitado la opción pregunta anterior, y en la última la opción pregunta siguiente.

- **Botón Salir.** Si se pulsa este botón en este momento, el programa pedirá la confirmación para salir, si se acepta cerrará la ventana del test para volver a la ventana principal de SDICD guardando los resultados obtenidos. Para consultar los resultados se debe ir al Control de Usuarios a través el menú Archivo, más información en el apartado **3.3.3 Control de Usuarios.**

3.3.7.4 Test General.

Una vez que hemos realizado los siete test correspondientes a los 7 temas que componen SDICD suceden dos cosas, la primera es que se habilita dentro del Menú *Herramientas/test* la opción *Test General*, la segunda es que al pasar por la última página de cada uno de los 7 temas, después de preguntarnos si queremos realizar el test correspondiente al tema en que nos encontramos, nos preguntará si queremos realizar el Test General de SDICD tal y como se muestra en la Figura 3.47.

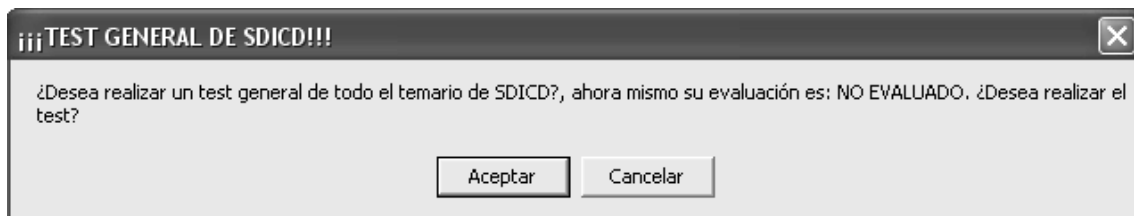


Figura 3.47 Test General de SDICD

Si la opción elegida es *Cancelar* SDICD continuará ejecutándose en su ventana principal, en el caso de que se pulsara *Aceptar* se procedería a la realización de un test de 20 preguntas aleatorias de las más de 140 que el programa tiene archivadas y tendrá el mismo formato que para la realización de los test de cada uno de los siete temas.

3.3.8 Imágenes y Representación Dinámica

A lo largo de las Páginas de SDICD encontramos cientos de imágenes y formulas, al observarlas puede parecer que falta información relativa a las imágenes que se muestran en cualquiera de las páginas de SDICD. En la mayoría de los casos la información de las imágenes y/o formulas en la que se muestra se encuentra de un modo explícito en el interior de los textos que componen SDICD en la página en que se encuentra la imagen. No obstante SDICD da la posibilidad a los alumnos de conocer de un modo claro y conciso el significado de las imágenes, y para ello solo han de situar el ratón sobre la imagen en cuestión y aparecerá en pantalla un texto con información relativa a la misma, tal y como se muestra en la Figura 3.48.

Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso

Archivo Herramientas Ejemplos Ayuda

2.3.- ¿Qué es una Función de Pertenencia?

Un **conjunto difuso** está definido por su **función de pertenencia**, que corresponde a la noción **función característica** en la **lógica clásica**. Para una mejor comprensión del tema lo ilustraremos con un ejemplo visual comparando un conjunto clásico con su homónimo difuso.

Queremos definir el **conjunto** de personas con un peso denominado medio. Utilizando la lógica clásica podemos decir que un varón de 40 años posee un peso medio cuando su peso está comprendido entre 70 y 80 kg. La función característica da 1 para los valores [70,80] y 0 en el resto. Un conjunto difuso de las personas de talla media puede ser el siguiente, 1 para los valores [72,78], 0.9 para {71,81}, 0,8 para {70,80}... y 0 para los valores fuera del conjunto [62,88]. Gráficamente quedaría:

El profesor Bart Kosko, en [kosko92], demuestra que la teoría de conjuntos clásicos es una simplificación de la teoría de conjuntos difusos, ya que en la extensión vectorial que él aplica a sus funciones de pertenencia, los vectores pertenecientes a los conjuntos clásicos se forman mediante los valores naturales 1 y 0, mientras que para los conjuntos clásicos usa todos los reales del intervalo [0,1].

Página 17 Términos Referencias ÍNDICE LÓPEZ SERRANO JOSE ANTONIO

Figura 3.48 Ejemplo de una página de SDICD con una imagen

Otra herramienta relacionada con las Imágenes y que se puede encontrar en SDICD es un el Botón *Representación*, situado junto a alguna imagen y/o fórmula, tal y como se muestra en la Figura 3.49, y que se utiliza para ayudar a la comprensión de algunas de las imágenes.

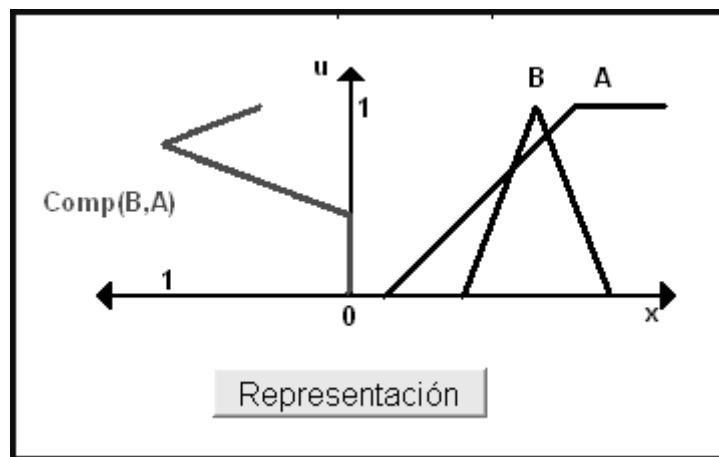


Figura 3.49 Botón Representación 1

Siempre que nos encontremos con esta situación el programa nos está mostrando en primer lugar la imagen definitiva, y en el caso de que pulsemos sobre *Representación* se pasa a

visualizar una sucesión de imágenes superpuestas que crean un efecto animado con la intención de aclarar como se ha llegado a la imagen principal.

3.3.9 Ejemplos

Como se dijo en el apartado **3.3.4.3 Menú Ejemplos**, SDICD incluye dos ejemplos que se presentan como fundamentales para el entendimiento del Control Difuso. Estos ejemplos son la simulación del Control Difuso de un Cruce de Semáforos y la simulación del Control difuso de un Invernadero. A continuación se procederá a explicar con detenimiento en qué consiste cada uno de estos dos ejemplos.

3.3.9.1 Simulación del Control Difuso de un Cruce de Semáforos

En este ejemplo se comparará de un modo estadístico el rendimiento obtenido por un cruce de semáforos controlados mediante control difuso con respecto a la utilización de semáforos de tiempo fijo, y está basado los desarrollos de [Mamdani77].

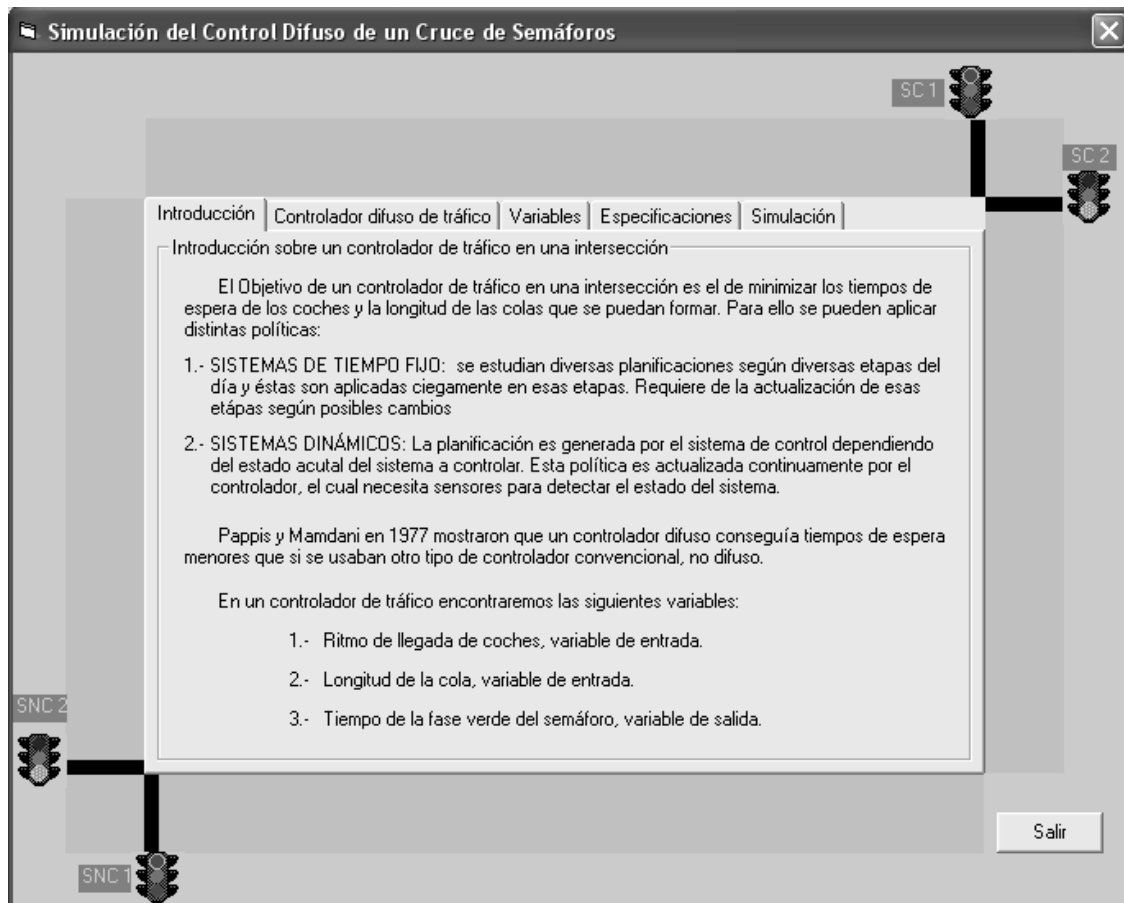


Figura 3.50 Ventana Simulación del Control Difuso de un Cruce de Semáforos

Al pulsar sobre el Menú *Ejemplos/Control Difuso de un Cruce de Semáforos* sobre la ventana principal de SDICD se abre una nueva ventana denominada Simulación del Control Difuso de

un Cruce de Semáforos, tal y como se muestra en la Figura 3.50. En esta ventana se pueden encontrar los siguientes objetos:

- **Semáforos SC 1 y SC 2.** Situados en la parte superior derecha de la ventana, son los semáforos que simularán el cruce controlado difusamente, las siglas SC significan “Semáforo Controlado”.
- **Semáforos SNC 1 y SNC 2.** Situados en la parte inferior izquierda de la ventana, son los semáforos que simularán el cruce no controlado, las siglas SNC significan “Semáforo No Controlado”.
- **Botón Salir.** Situado en la parte inferior derecha de la ventana, se utiliza para cerrar la aplicación. Hay que tener en cuenta que al cerrar esta ventana de ejemplo no se cierra la ventana principal de SDICD pero en el caso de que se cierre la ventana principal de SDICD (ya sea mediante en Menú *Archivo/Salir* o mediante el botón estándar de Windows para el cierre de las ventanas situado en la parte superior derecha de las misma) se cerrarán todas las ventanas que durante la ejecución del programa se hayan abierto.
- **Barra de pestañas (Introducción).** En el centro de la ventana nos encontramos una serie de pestañas, inicialmente se encontrará abierta la pestaña *Introducción*, que contiene información introductoria al ejemplo que se va a desarrollar. Además de esta, nos encontramos con las pestañas *Controlador Difuso de Tráfico*, *Variables*, *Especificaciones* y *Simulación*. Todas, a excepción de *Simulación*, son de carácter informativo y se explican a continuación.

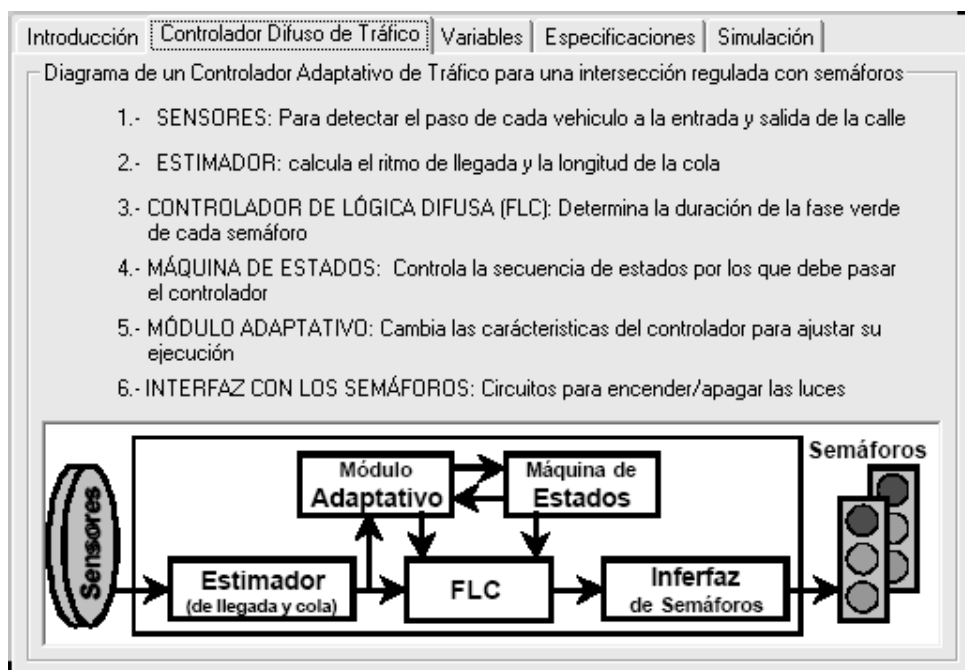


Figura 3.51 Pestaña Control Difuso de Tráfico

La pestaña *Controlador Difuso de Tráfico* muestra información de las partes que debe contener un controlador de este tipo y muestra un esquema, tal y como podemos observar en la Figura 3.51.

La pestaña *Variables* está compuesta de 3 sub-pestañas. Estas sub-pestañas son *Variables de Entrada*, *Conjunto de Reglas* y *Variables de Salida*. En la ficha *Variables de Entrada* se muestra de forma gráfica como se calculan los conjuntos difusos de entrada “Ritmo de llegada de la calle horizontal”, “Ritmo de llegada de la calle vertical”, “Cola de la calle horizontal” y “Cola de la calle vertical”, se muestra en la Figura 3.52.

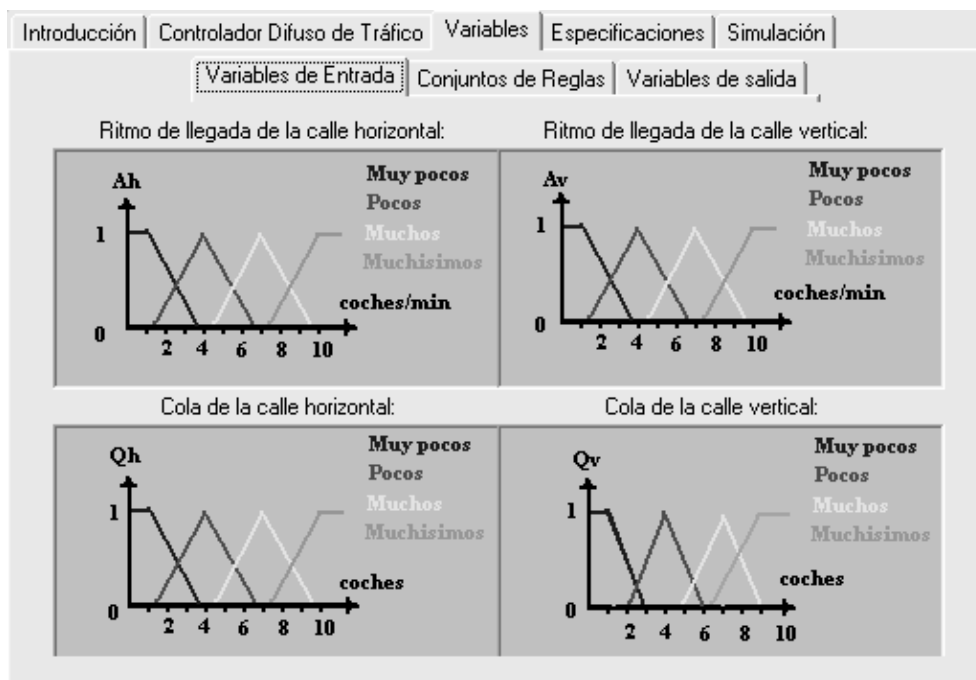


Figura 3.52 Ficha Variables de Entrada

En la sub-pestaña *Conjunto de Reglas* (Figura 3.53) se muestran las dos tablas Antecedentes/Consecuentes, en la primera de ellas los antecedentes son los ritmos de llegada de ambas calles y los consecuentes los tiempos de estado del semáforo, en la segunda los antecedentes son la longitud de las colas de ambas calles y el consecuente es su implicación en el tiempo de estado del semáforo en función de la Prioridad de las Colas en el Sistema (PCS se muestra en la ficha *Simulación*).

En la sub-pestaña *Variables de Salida* se muestran cuatro sub-pestañas, en cada una de ellas se muestran los posibles conjuntos difusos de salida que se pueden obtener en función de las dos tablas de reglas mostradas anteriormente y de la prioridad de que se den a las colas en la simulación (PSC= Ninguna, PSC= Poca, PSC= Media y PSC= Alta), tal y como se muestra en la Figura 3.54.

Introducción | Controlador Difuso de Tráfico | Variables | **Especificaciones** | Simulación

Variables de Entrada | **Conjuntos de Reglas** | Variables de salida

Se han utilizado dos conjuntos de reglas para implementar este sistema:
 El primero de ellos usa como antecedentes a los ritmos de llegada de cada una de las calles, y como consecuente el tiempo en que el semáforo de la calle horizontal ha de estar en verde.

Av \ Ah	Muy pocos	Pocos	Muchos	Muchísimos
Muy pocos	Normal	Alto	Muy Alto	Altísimo
Pocos	Bajo	Normal	Alto	Muy Alto
Muchos	Muy Bajo	Bajo	Normal	Alto
Muchísimos	Escaso	Muy Bajo	Bajo	Normal

El segundo usa como antecedentes las longitudes de las colas, y como consecuente la variable "diferencia de colas" que se usa para difuminar los conjuntos obtenidos en el primer conjunto de reglas en función de la importancia que se le de en el Módulo Adaptativo del sistema.

Qv \ Qh	Muy pocos	Pocos	Muchos	Muchísimos
Muy pocos	Normal	Alto	Muy Alto	Altísimo
Pocos	Bajo	Normal	Alto	Muy Alto
Muchos	Muy Bajo	Bajo	Normal	Alto
Muchísimos	Escaso	Muy Bajo	Bajo	Normal

Figura 3.53 Ficha Conjunto de Reglas

Introducción | Controlador Difuso de Tráfico | Variables | Especificaciones | Simulación

Variables de Entrada | Conjuntos de Reglas | Variables de salida

En función del valor que tenga la "importancia de la longitud de las colas" en el módulo adaptativo del sistema podemos obtener los siguientes conjuntos difusos para el tiempo en verde del semáforo de la calle horizontal:

PCS= Ninguna | **PCS=Poca** | PCS=Media | PCS=Alta

Figura 3.54 Ficha Variables de Salida

Si se pulsa sobre la pestaña *Especificaciones*, se muestran en 5 sub-pestañas las limitaciones del sistema y del controlador incluidas en la simulación. Inicialmente se muestra la sub-pestaña *Entradas*, que muestra los valores máximos y mínimos que pueden tener las entradas "Ritmo de Entrada" y "Cola" para cada una de las calles, tal y como se muestra en la Figura 3.55.



Figura 3.55 Especificaciones / Entradas

La segunda de las sub- pestañas pertenecientes a *Especificaciones* es *Máquina de Estados* (Figura 3.56). Muestra información correspondiente a los tiempos y los estados iniciales de los semáforos SC 1, SC 2, SNC 1 y SNC 2.

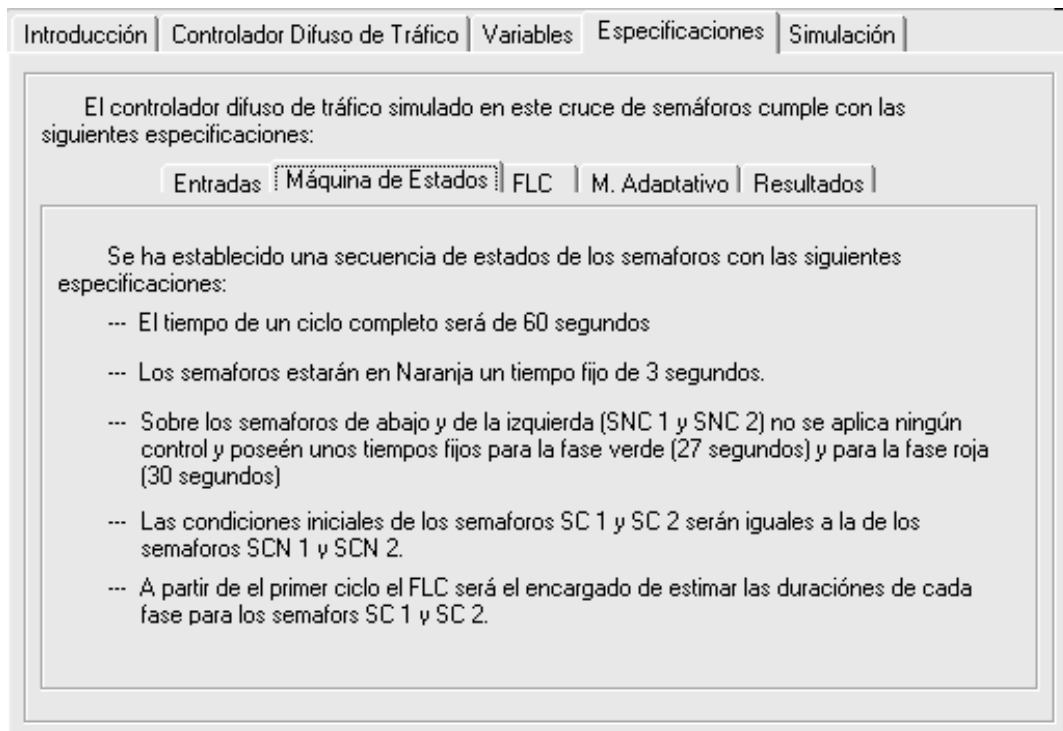


Figura 3.56 Especificaciones / Máquina de Estados

En el caso de que la sub-pestaña abierta sea *FLC* (Controlador de Lógica Difusa, Fuzzy Logic Controller), en la ventana se mostrará información de cómo al final de cada ciclo el controlador calcula los tiempos referentes a los estados de cada uno de los semáforos controlados para el siguiente ciclo, como se puede ver en la Figura 3.57.

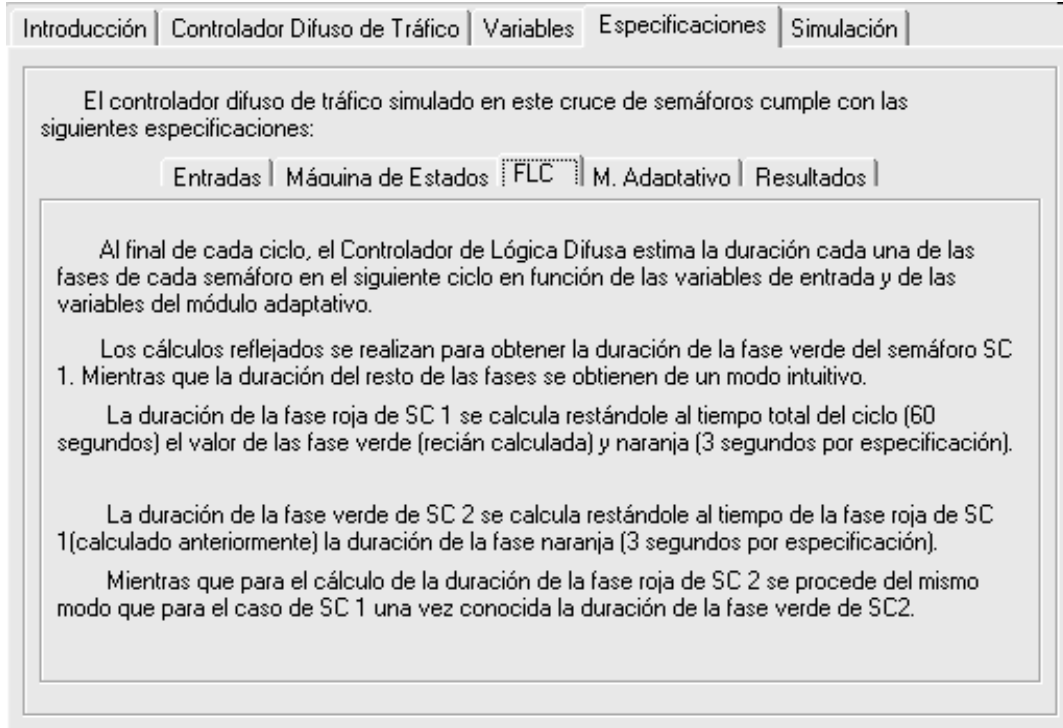


Figura 3.57 Especificaciones / FLC

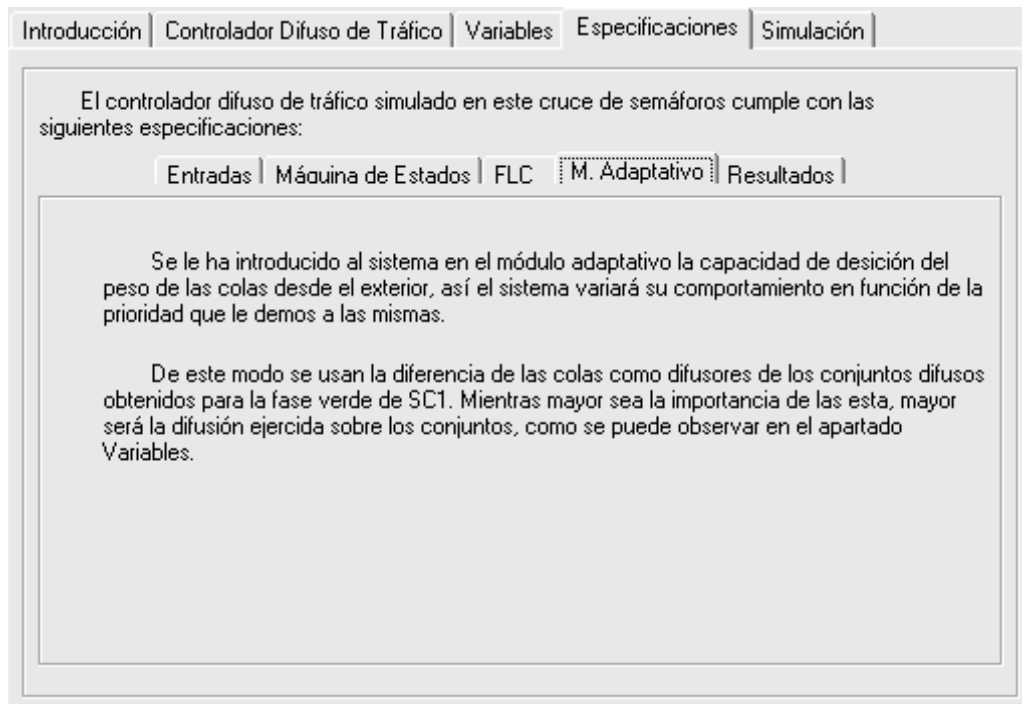


Figura 3.58 Especificaciones / M. Adaptativo

La sub-pestaña *M. Adaptativo* (Figura 3.58) muestra en qué consiste la prioridad de las colas que es la opción incluida en el Módulo Adaptativo del FLC y que puede ser modificada por el usuario durante la simulación.

En la sub-pestaña *Resultados* (Figura 3.59) se muestra la información necesaria para interpretar los resultados obtenidos durante la simulación.



Figura 3.59 Especificaciones / Resultados

Al pulsar sobre la pestaña *Simulación* nos encontraremos la ventana principal de esta aplicación, que es tal y como se muestra en la Figura 3.60. Esta ventana está compuesta por 4 apartados:

- **Variables de Entrada.** Son el "Ritmo de Llegada" y "Longitud de la Cola en el Ciclo Anterior" tanto para la calle vertical como de la calle horizontal, los ritmos de llegada se pueden establecer por el usuario en los intervalos marcados por las especificaciones, mientras que la longitud de las colas se irán estableciendo conforme se inicie la simulación.
- **Variables de M. Adaptativo.** Al igual que con las *Variables de Entrada*, el usuario también puede establecer el valor de las *Variables de M. Adaptativo*, en este caso compuesto por la PCS (Prioridad de las Colas en el Sistema) tal y como se muestra en la sub-pestaña *M. Adaptativo* de la pestaña *Especificaciones* del ejemplo.
- **Datos de Salida.** Muestra el tiempo que estará en verde cada uno de los cuatro semáforos del sistema en el ciclo actual.

- **Resultados Comparativos.** Registra las estadísticas para cada uno de los semáforos referentes al tiempo medio que los coches están en cola (TMC), el número medio de coches en cola en cada ciclo (MCC), así como el número medio de coches que en cada ciclo no llegan a pararse en el semáforo (CNP). El *Tiempo de simulación* es un cronómetro que marca el tiempo de simulación desarrollado para la obtención de los resultados comparativos mostrados, en el momento que se pulse sobre el botón *Reset Datos*, se establecerán los valores iniciales todos los valores comparativos, incluido el *Tiempo de Simulación*.

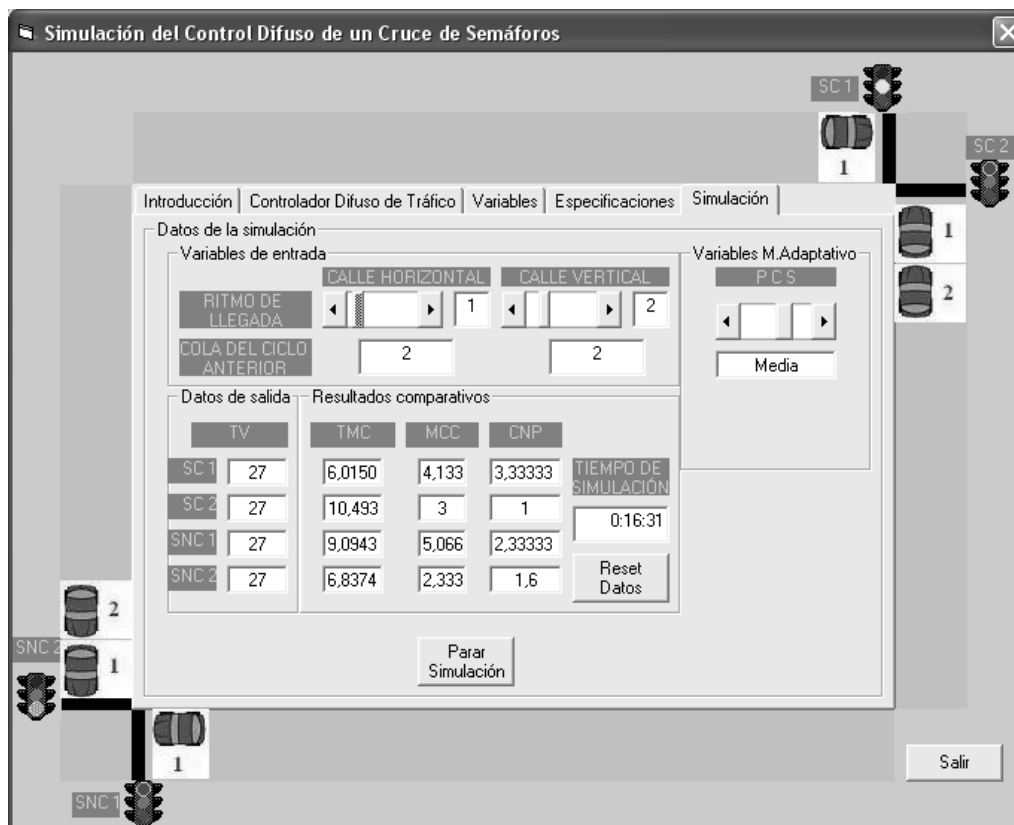


Figura 3.60 Simulación

En el momento en que se pulse el botón *Iniciar Simulación*, empezará a correr el cronómetro y se empezarán a registrar las estadísticas en función de las *Variables de Entrada* y de las *Variables del M. Adaptativo*, si se ha iniciado la simulación y se pulsa el botón *Parar Simulación*, se conservarán los *Resultados comparativos* en el estado que estaban en el momento de pulsar sobre el mismo.

3.3.9.2 Simulación del Control Difuso de un Invernadero

Simulación del Control Difuso de un Invernadero es una aplicación desarrollada dentro de Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso, la utilidad de esta aplicación es mostrar de un modo sencillo el desarrollo de los cálculos que se producen dentro de un controlador difuso en función de unos valores puntuales de entrada y de una serie de

opciones incluidas en el controlador. Esta simulación es un desarrollo simplificado de Software para el Control Difuso de todo tipo de Sistemas (SCD) Aplicación al Control de Invernaderos Industriales, se encontrará más información en [Escobar03].

Al pulsar sobre el menú *Ejemplos/Control Difuso de un Invernadero* la ventana principal de SDICD se abre una nueva ventana denominada *Simulación del Control Difuso de un Invernadero*, tal y como se muestra en la Figura 3.61.

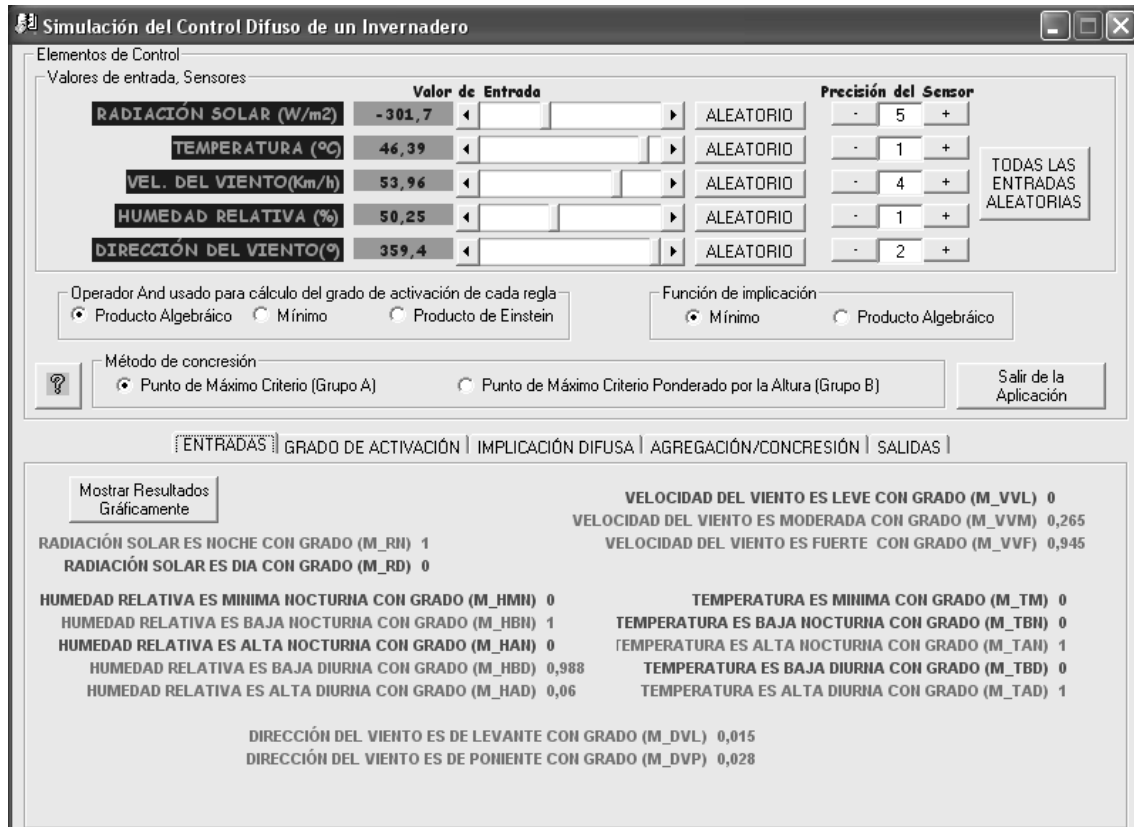


Figura 3.61 Ventana Simulación del Control Difuso de un Invernadero

Dentro de esta aplicación existen dos partes claramente identificables:

- **Elementos de Control.** Dentro de *Elementos de Control* se han incluido una serie de elementos que van a influir en la salida, estos son lógicamente los valores de las entradas del sistema (Sensores), el operador And usado para el cálculo del grado de activación de cada regla, la función de Implicación usada por el controlador y el método de concreción elegido.
- **Desarrollo de los Cálculos.** Mientras tanto en la parte *Desarrollo de los Cálculos* se muestran los pasos seguidos por el controlador en función de todas y cada una de las opciones incluidas dentro de los *Elementos de Control*, pudiéndose observar en función de las entradas el cálculo del grado de activación de cada una de las variables lingüísticas de entrada, el cálculo del grado de activación de cada una de las reglas elegidas por los expertos, la implicación difusa de cada una de estas reglas en las

salidas del sistema, la agregación y concreción de los resultados obtenidos, así como contemplar de un modo gráfico sencillo el estado del invernadero en función de todas y cada una de las variables en cada momento. Se puede navegar entre ellos a través de las pestañas existentes en la ventana.

Todos y cada uno de estos apartados se explican de forma más detallada en los siguientes apartados.

3.3.9.2.1 Elementos de Control

Los elementos que pueden afectar a un controlador son varias, en nuestro ejemplo se han desarrollado las siguientes: Valores de entrada (Sensores), Operador And usado para el Cálculo del grado de activación de cada regla, Función de Implicación y Método de concreción. En la Figura 3.62 se muestra con detalle.

Figura 3.62 Elementos de Control

Como se ha estudiado a lo largo de SDICD cada una de estos elementos opcionales pueden ser de muy diversas formas, en este ejemplo se puede escoger entre dos o tres opciones para cada una de las variables para así observar los cambios que se producen en el sistema en función de las mismas. A continuación se detallan los elementos de Control contenidos por la Figura 3.62:

- **Valores de entrada, Sensores.** Nuestro sistema consta de cinco variables de entrada: Radiación Solar, Temperatura, Humedad Relativa, Dirección del Viento y Velocidad del Viento, se pueden ver las variables junto con los valores mínimos y máximos que pueden tomar en la Tabla 3.2. En la realidad la *Radiación Solar* no podría tomar valores negativos, pero de un modo funcional en este ejemplo los puede tomar para que en la simulación aleatoria tengan el mismo peso las variables lingüísticas Día y Noche.

Se puede modificar también para cada una de las entradas la *Precisión del Sensor* en función de la cual se calculará el conjunto difuso triangular de entrada teniendo en cuenta que el valor de la precisión marca el error admitido por el sensor, con lo cual

mientras menor sea este más preciso se considera el sensor. Además, se puede dar valores aleatorios a cada una de las entradas por separado o a todas a la vez.

VARIABLE	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Radiación Solar	-1000 W/m ²	1000 W/m ²
Temperatura	-2°C	50°C
Humedad Relativa	20%	95%
Dirección del Viento	0°	360°
Velocidad del Viento	0 Km/h	70 Km/h

Tabla 3.2 Rangos de las variables de entrada

- **Operador And usado para el cálculo del grado de activación de cada regla.** En este ejemplo se puede optar entre tres T-Normas para que sean el Operador And usado en el cálculo del grado de activación. Estas opciones son la *Función Mínimo*, el *Producto Algebraico* y el *Producto de Einstein*. En función de la opción elegida variará el valor del grado de activación de cada una de las 15 reglas existentes.
- **Función de Implicación.** En el caso de la función de implicación difusa también se puede optar entre dos T-Normas distintas. La *Función Mínimo* ó el *Producto Algebraico* son en este caso las funciones que realizarán la implicación difusa con el grado de activación obtenido en cada regla. Los consecuentes de algunas de las reglas en sus sentencias IF-THEN llevan a etiquetas lingüísticas triangulares, en función de la implicación elegida el resultado obtenido en el consecuente de cada regla será trapezoidal (función mínimo) o triangular (producto algebraico).
- **Método de Concreción.** De igual modo se puede elegir entre dos métodos distintos de concreción bien diferenciados, el *Punto de Máximo Criterio* y el *Punto de Máximo Criterio ponderado por la Altura*, aunque a simple vista puedan parecer iguales, son dos métodos bien diferenciados ya que uno es del grupo A y el otro del grupo B. Mientras que con el *Punto de Máximo Criterio* obtendremos como valor de salida el valor de mayor altura de entre todos los conjuntos de salida obtenidos para cada variable de salida, con *PMC ponderado por la Altura* todos los conjuntos difusos activados en la salida influirán en el resultado final.

3.3.9.2.2 Entradas

En esta parte de la simulación será en la que se mostrará cómo se difuminan los valores crisp de entrada en función de la precisión de los sensores instalados para la obtención de

los distintos conjuntos difusos de entrada. Es la pestaña abierta por defecto dentro del desarrollo de los cálculos al iniciar la ejecución de la Simulación del Control Difuso de un Invernadero (Figura 3.61). Este apartado se divide en dos:

- **Mostrar Resultados Numéricamente.** Ilustrada en la Figura 3.63, es la ventana que se muestra por defecto al pulsar la pestaña *Entradas*, en ella se muestran todos los valores obtenidos tras la difuminación de los valores crisp de entrada con las etiquetas lingüísticas de entrada para obtener los conjuntos difusos que podrán activar los antecedentes de las reglas. Algunos de los valores se muestran en rojo y otros se muestran en verde, esto se hace para diferenciar de un modo intuitivo que antecedentes están activados, es decir que los antecedentes que están en rojo no activarán sus correspondientes reglas. A lo largo de todo el ejemplo se usa este sistema para un mejor seguimiento de las reglas activadas. En la parte superior izquierda de la figura hay un botón denominado *Mostrar Resultados Gráficamente*, si se pulsa sobre el mismo se podrá observar cómo se obtienen estos datos.

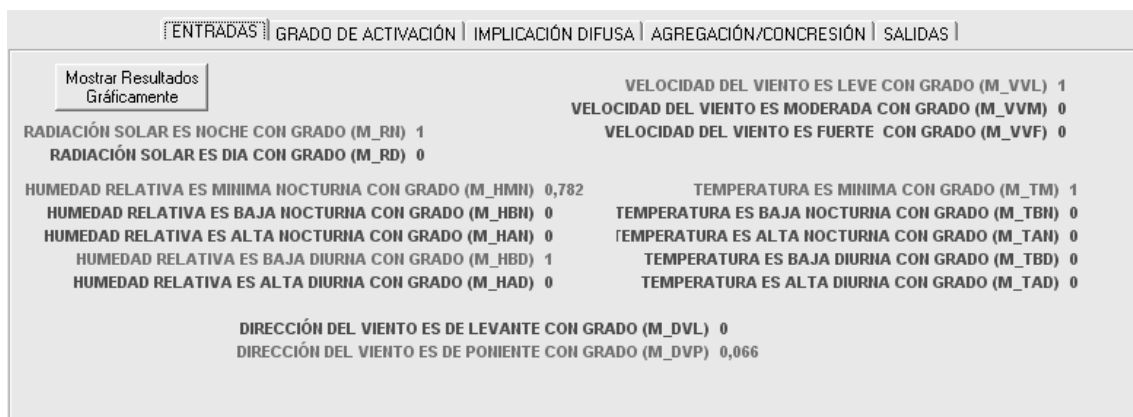


Figura 3.63 Entradas/Mostrar Resultados Numéricamente

- **Mostrar Resultados Gráficamente.** Ilustrada en la Figura 3.64, esta ventana se usa para visualizar de un modo sencillo como se difuminan los valores crisp de entrada, formando un conjunto difuso triangular en función de dichos valores crisp y de la precisión del sensor. Asimismo, también se muestra como se obtiene el grado de activación del antecedente, que será el punto de mayor grado de la intersección del conjunto triangular con la etiqueta lingüística correspondiente.

En La parte superior izquierda de la figura hay un botón denominado *Mostrar Resultados Numéricamente*, si se pulsa sobre el mismo se podrá volver a la ventana anterior. Además, en la parte izquierda encontramos cinco opciones distintas: *Radiación Solar*, *Temperatura*, *Humedad Relativa*, *Velocidad del Viento* y *Dirección Del Viento*. Al pulsar sobre cualquiera de ellos se mostrará en la ventana los gráficos correspondientes al cálculo de los grados de activación para el antecedente de dicha variable. El programa usa distintos colores para diferenciar las distintas etiquetas lingüísticas que se pueden encontrar para cada variable.

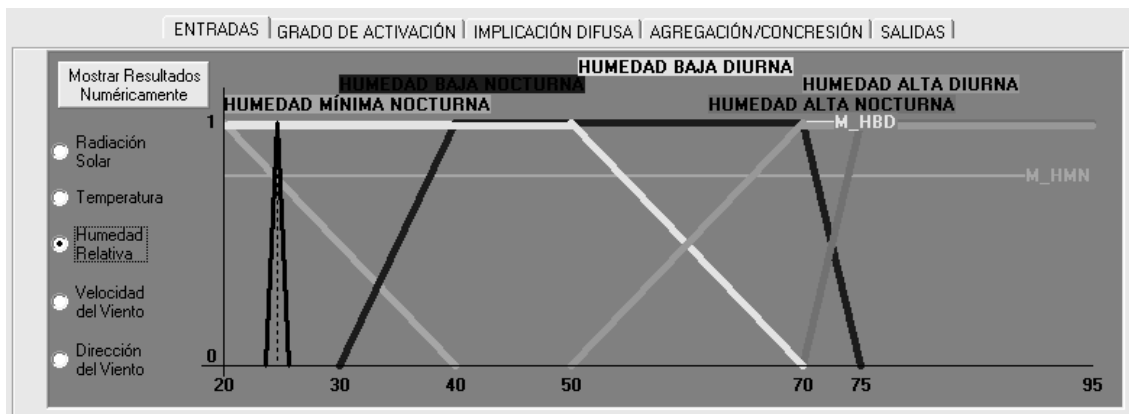


Figura 3.64 Entradas/Mostrar Resultados Gráficamente

A cada uno de los grados de activación en el antecedente se le ha dado un nombre, en la tabla 3.3 se muestran todos a modo de referencia. Se ha optado por el formato M_RN porque M_ es el formato estándar usado para nombrar a los grados de activación.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
M_RN	Radiación Solar es Noche
M_RD	Radicación Solar es Día
M_HMN	Humedad Relativa es Mínima Nocturna
M_HBN	Humedad Relativa es Baja Nocturna
M_HAN	Humedad Relativa es Alta Nocturna
M_HBD	Humedad Relativa es Baja Diurna
M_HAD	Humedad Relativa es Alta Diurna
M_VVL	Velocidad del Viento es Leve
M_VVM	Velocidad del Viento es Moderada
M_VVF	Velocidad del Viento es Fuerte
M_TM	Temperatura es Mínima
M_TBN	Temperatura es Baja Nocturna
M_TAN	Temperatura es Alta Nocturna
M_TBD	Temperatura es Baja Diurna
M_TAD	Temperatura es Alta Diurna
M_DVL	Dirección del Viento es de Levante
M_DVP	Dirección del Viento es de Poniente

Tabla 3.3 Grados de Activación en el Antecedente

3.3.9.2.3 Grado de Activación

Al pulsar sobre la pestaña *GRADO DE ACTIVACIÓN* (Figura 3.61) el marco tomará una forma similar a la que se muestra en la Figura 3.65. De un modo funcional se puede decir que este marco está dividido en 3 partes:

- La parte superior derecha de la misma muestra el valor de todos los antecedentes obtenidos en la pestaña *ENTRADAS*.

- En la parte lateral izquierda se pueden observar una serie de etiquetas que van desde REGLA 0 hasta REGLA 14, que pueden ser de dos colores distintos, rojo o verde, que significa si está o no activada la regla en cuestión. Para ver los antecedentes y consecuentes de cada una de las reglas existentes, así como para ver el grado de activación calculado con cada regla solamente hace falta pulsar con el ratón sobre la etiqueta correspondiente a la regla que se desea ver.

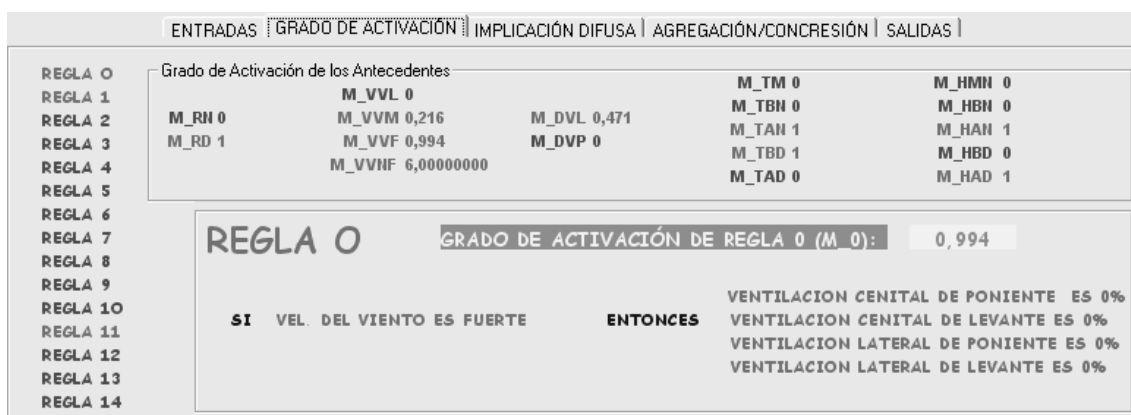


Figura 3.65 Grado de Activación

- Al pulsar sobre las etiquetas cambian los valores mostrados en la parte inferior derecha de la ventana, en la que se puede ver para cada regla los antecedentes y los consecuentes (verdes si están activados y rojos si no lo están), así como el valor del grado de activación correspondiente a esa regla calculado en función de el valor de el grado de los antecedentes y de la función elegida como operador And para el cálculo del grado de activación. Así estos resultados variarán en función de que este marcado el MÍNIMO, el PRODUCTO ALGEBRAICO o el PRODUCTO DE EINSTEIN. En este caso los valores obtenidos como grado de activación de cada regla se representan como M_0, M_1, \dots, M_{14} donde cada número representa a la regla en cuestión.

3.3.9.2.4 Implicación Difusa

Al pulsar sobre la pestaña *IMPLICACIÓN DIFUSA* nos encontraremos con un marco similar al que se muestra en la Figura 3.66. En este apartado se muestra como se calculan los conjuntos difusos de salida en función de los consecuentes activados con cada regla, el valor del grado de activación de cada regla y la función de implicación elegida por el usuario. Al igual que en el caso del grado de activación en esta ventana se pueden diferenciar tres partes distintas:

- En la parte de la izquierda, como en el caso del grado de activación encontramos una columna con las etiquetas correspondientes a cada una de las reglas, que estará coloreada de color verde siempre y cuando el grado de activación de dicha regla sea distinto de 0. En el caso de que este sea 0 la etiqueta tomará color rojo.

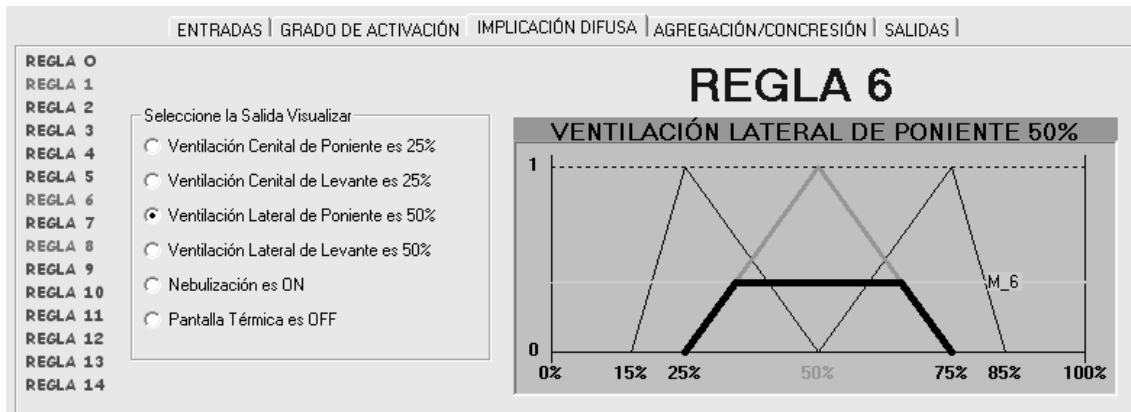


Figura 3.66 Implicación Difusa/Mínimo

- En la parte central encontramos los consecuentes que se activan con la regla seleccionada en cada momento, pudiendo así elegir en el consecuente que se desea ver para la regla seleccionada.
- Es en la parte de la derecha donde se muestra para la regla y el consecuente seleccionado el cálculo del conjunto difuso dependiendo de la función de implicación elegida, en el caso de que la etiqueta lingüística correspondiente a un consecuente sea un valor crisp, también lo será el conjunto difuso de salida obtenido. Pero en el caso de que la etiqueta lingüística sea de forma triangular obtendremos un conjunto triangular o trapezoidal dependiendo de que la función de implicación sea el producto algebraico (Figura 3.67) o el mínimo (Figura 3.66) respectivamente.

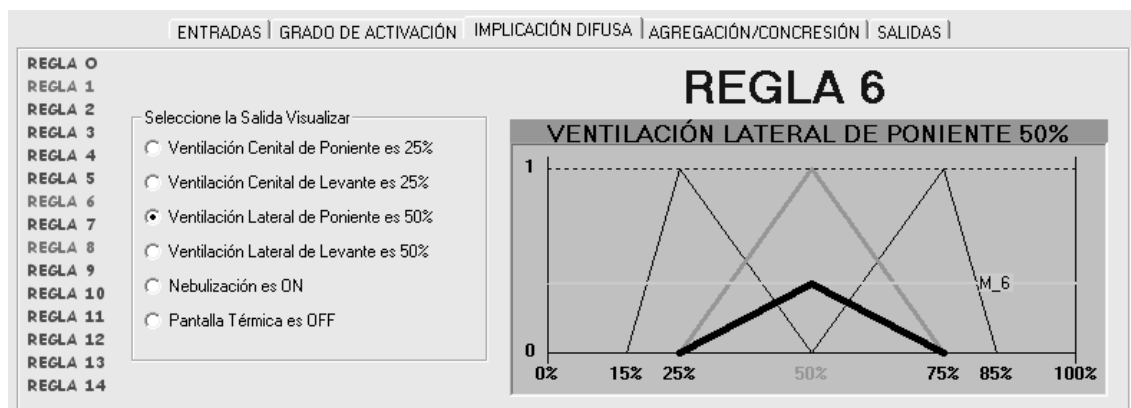


Figura 3.67 Implicación Difusa/Producto Algebraico

3.3.9.2.5 Agregación/Concreción

Al pulsar sobre la pestaña *AGREGACIÓN/CONCRECIÓN* nos encontramos con una marco similar al mostrado en la Figura 3.68, en esta ventana se muestra el valor de todos los conjuntos obtenidos para las diferentes etiquetas lingüísticas en cada una de las reglas activadas, y se muestra el valor crisp de salida obtenido en función de los conjuntos obtenidos y de el método de concreción elegido.

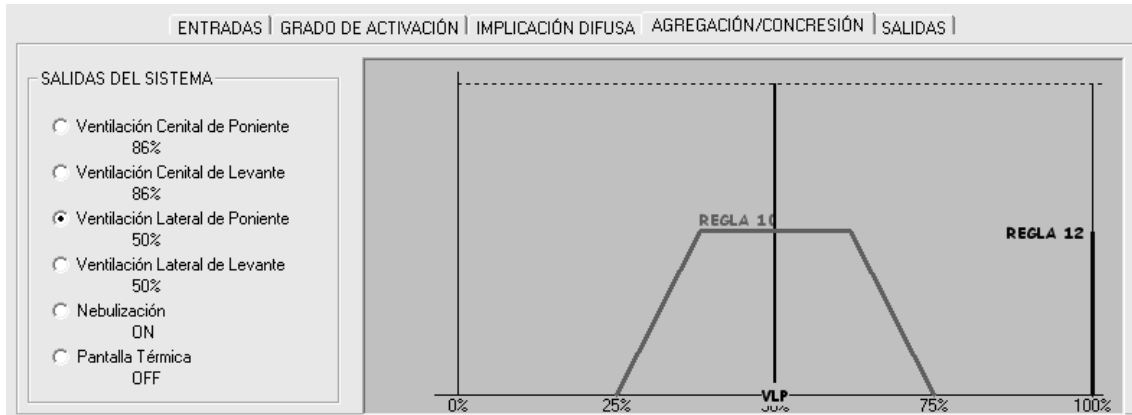


Figura 3.68 Agregación/Concreción--PMC

En dicho marco existen dos partes diferenciadas:

- En la parte izquierda se muestran las diferentes variables de salida existentes junto con el valor activado para cada una en cada momento. Existen 6 salidas diferentes, que son: *Ventilación Cenital de Poniente*, *Ventilación Cenital de Levante*, *Ventilación Lateral de Poniente*, *Ventilación Lateral de Levante*, *Nebulización* y *Pantalla Térmica*, las salidas correspondientes a ventilación pueden tomar valores entre 0 y 100, correspondientes al porcentaje con respecto a 90° que estará activada esa ventana. Mientras que las correspondientes a nebulización y pantalla térmica serán actuadores on/off.
- En la parte derecha del marco se mostrarán los conjuntos difusos de salida activados para la salida elegida, además se muestra el valor crisp de salida obtenido tras aplicar el método de concreción elegido. Cuando está activado el *Punto de Máximo Criterio* el valor de la salida será el correspondiente al punto de mayor altura del conjunto (Figura 3.68), mientras que con el *Punto de Máximo Criterio ponderado por la Altura* se tienen en cuenta todos los conjuntos activados por las distintas reglas (Figura 3.69).



Figura 3.69 Agregación/Concreción—PMC ponderado por la altura

3.3.9.2.6 Salidas

Por último, al pulsar sobre la pestaña *SALIDAS*, podemos observar de un modo gráfico sencillo el estado del invernadero en cada momento. Tomando en este caso los valores de ventilación de poniente en la parte izquierda del invernadero y los de levante a la derecha. Además, en la parte inferior de la ventana podemos observar los valores numéricos para cada una de las salidas, tal y como se muestra en la Figura 3.70.

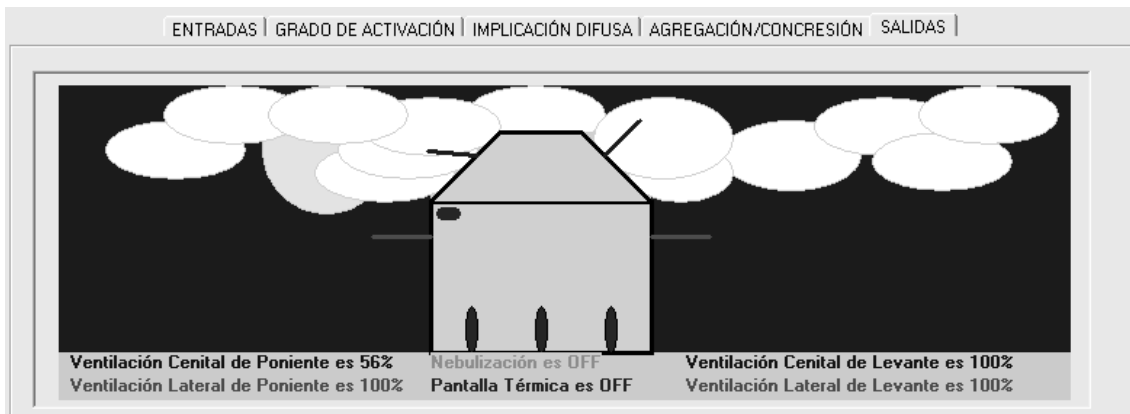


Figura 3.70 Salidas

CAPÍTULO 4 Estructura de SDICD

En el presente capítulo se expone una breve noción del ámbito de programación Visual Basic 6.0[®] [Ceballos99] como herramienta de desarrollo de aplicaciones informáticas bajo plataforma Windows. La información se estructura básicamente en el entorno al diseño de la *interfaz de usuario* compuesta por *formularios* (ventanas), *controles* (elementos visuales contenidos en un formulario) y el *código* que permite establecer la secuencia de funcionamiento de los mismos. Además se pueden solucionar muchos problemas derivados de la programación con Visual Basic mediante consultas a webs como [Network].

4.1 INTRODUCCIÓN AL ENTORNO DE TRABAJO, VISUAL BASIC 6.0[®]

El objetivo al elaborar este apartado ha sido el de introducir al lector en el entorno de programación Visual Basic 6.0, es por ello que no se profundizará en muchos aspectos de Visual Basic pues creemos no es la finalidad de este documento pero si mencionar que esto y todo lo referente a Visual Basic 6.0 podrá encontrarlo en [Ceballos99] de forma clara, concisa y fiable.

A la hora de desarrollar una aplicación informática es necesario contar con una herramienta de desarrollo que permita al programador generar el software que necesita. El producto Visual Basic de Microsoft podría definirse como un *sistema de programación* utilizado para escribir programas basados en Windows, y crear herramientas de productividad personalizadas.

Debido a la naturaleza estructurada de la computación, resulta vital diseñar los programas *antes* de empezar a codificarlos, es por ello que se podría establecer unos pasos genéricos claves para la creación de un programa informático:

- Planificar las tareas del programa: *¿cómo debe funcionar?*.
- Diseñar la Interfaz de Usuario: *¿qué aspecto debe tener?*.
- Generar Código del programa: Implementar los dos pasos anteriores.
- Probar y Depurar el programa.
- Documentar y Distribuir el programa.

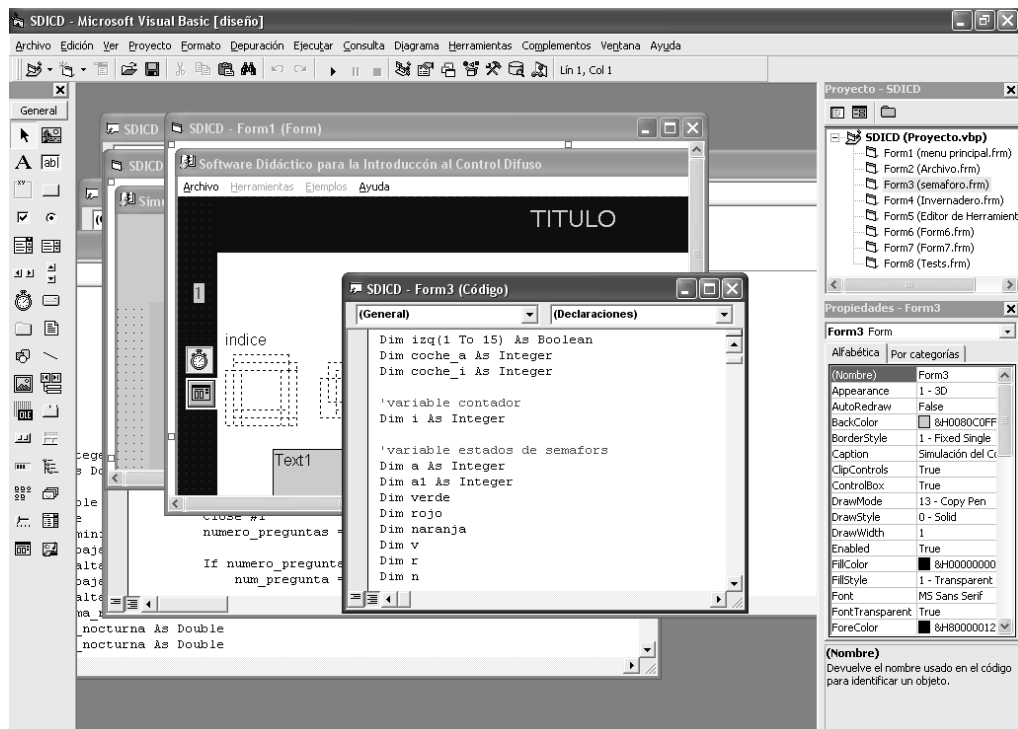


Figura 4.1 Entorno de desarrollo integrado (IDE) de Visual Basic 6.0

Un concepto clave de Visual Basic es la capacidad de crear y utilizar componentes u *objetos*. Un tipo de objeto es un *control* el cual va a permitir agregar funcionalidad a los programas sin tener que entrar en los detalles del modo de funcionamiento de dichas características (encapsulamiento). Los *objetos* tienen *propiedades* que sirven para definir su apariencia, *métodos* que les permiten ejecutar tareas y *eventos* que les permiten responder a acciones de usuario.

Visual Basic ofrece varios tipos de *proyectos*, cada uno ofrece al usuario una determinada funcionalidad y características. El proyecto que más se utiliza y sobre el cual se ha desarrollado la presente aplicación es el tipo *EXE estándar*, proyecto que se emplea para crear un programa estándar de Windows (archivo EXE). En la Figura 4.1 se presenta el *Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, Integrated Development Environment)* de Visual Basic, que constituye la interfaz del propio Visual Basic. Tomándose como partida el proyecto, básicamente se pueden distinguir dos bloques de trabajo a la hora de desarrollar una aplicación:

- Interfaz del Usuario: Diseño de Formularios y Controles.
- Generación de Código: Módulos de Código.

Además de los dos bloques principales de trabajo comentados anteriormente se mencionan los siguientes elementos utilizados en el desarrollo de la aplicación:

- *Asistente de empaquetado y distribución*: A través de este complemento ofrecido en el entorno de Visual Basic se va a poder elaborar el paquete de instalación que permitirá instalar nuestra aplicación.

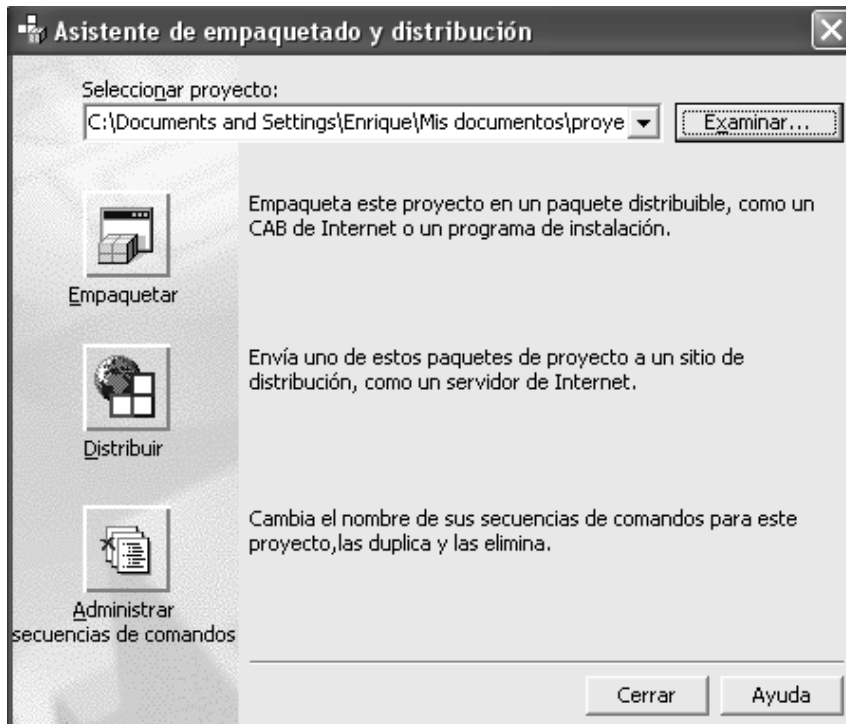


Figura 4.2 Entorno de desarrollo integrado (IDE) de Visual Basic 6.0

Como puede observarse en la Figura 4.2 varias son las posibilidades que ofrece Visual a la hora empaquetar una aplicación. Si nuestro objetivo es el de generar un programa de instalación se opta por la primera opción *Empaquetar*. Las ventanas que se suceden a la ya mencionada establecerán una serie de cuestiones que permitirán establecer los parámetros de instalación.

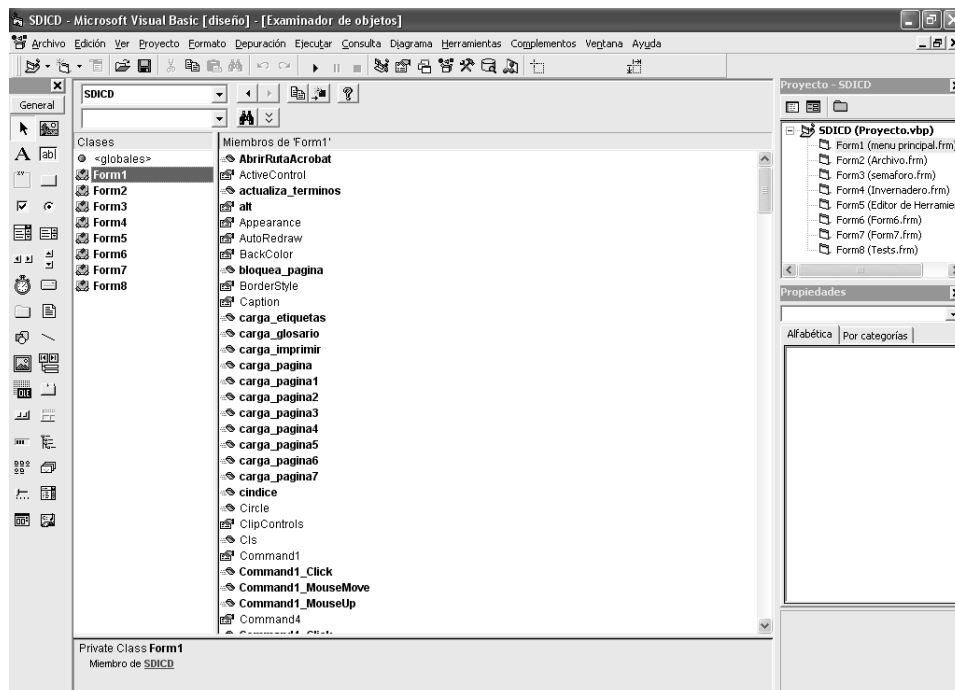


Figura 4.3 Examinador de Objetos

- *Examinador de Objetos*: El código de una aplicación de Visual Basic está organizado de forma jerárquica. Una aplicación típica está compuesta por uno o más módulos: un módulo de formulario por cada formulario de la aplicación, módulos estándares opcionales para el código compartido. Cada módulo contiene uno o más procedimientos que contienen código: procedimientos de evento, procedimientos *Sub* o *Function*, propiedades *Property*, declaraciones de constantes, variables, etc.

A través del *Examinador de objetos* (Figura 4.3) del *Entorno de Desarrollo Integrado (IDE)* de Visual Basic se puede ver la estructura del proyecto, es decir, agrupar toda la información (procedimientos, funciones, enumeraciones, constantes...) de cada uno de los elementos (formularios y módulos de código) que forman la aplicación en una ventana común.

El control lista desplegable de la parte superior izquierda en el examinador de objetos permite seleccionar el proyecto o biblioteca de la cual se desee mostrar los elementos. Una vez seleccionado nuestro proyecto, el examinador de objetos mostrará todos los elementos que contiene en la parte izquierda. A su vez, al seleccionar alguno de estos elementos se mostrará en la parte derecha todos los miembros que contiene. Aquellos elementos que hayan sido creados por el programador estarán resaltados en negrita diferenciándolos de los propios de cada control. En la parte inferior se muestra la información del miembro seleccionado. Así, si por ejemplo se selecciona un procedimiento este recuadro mostrará la cabecera del mismo.

4.2 CONTROLES, EVENTOS, PROPIEDADES Y VARIABLES DE SDICD

Para crear una aplicación, se crean *formularios* o ventanas y sobre ellas se dibujan unos *objetos* o *controles* (etiquetas, botones, cajas de texto, etc.) y a continuación se escribe el código fuente relacionado con cada objeto. Esto es, cada objeto está vinculado a un código que permanece inactivo hasta que se produzca el *evento* que lo activa, como por ejemplo un clic del ratón.

En la aplicación que se desarrolla, se utilizan los siguientes objetos:

- **ComboBox**: son listas desplegables en las que el usuario elige un elemento de una lista. Los elementos de la lista se establecen en la programación.
- **CommandButton**: son botones, en los que el usuario pulsa para acceder a otras ventanas o para realiza acciones.
- **CommonDialog**: estos objetos son las cajas de dialogo que aparecen cuando se quiere guardar, abrir o imprimir un documento de dimensionado de la ampliación.
- **Form**: son los formularios o ventanas que se usan en la aplicación.

- **Frame:** este control proporciona un agrupamiento identificable para controles. También puede usar este objeto para subdividir un formulario funcionalmente; por ejemplo, para separar grupos de controles.
- **HScrollBar:** las barras de desplazamiento permiten explorar fácilmente una larga lista de elementos o una gran cantidad de información.
- **Image:** son imágenes que aparecen en los formularios.
- **Label:** son las llamadas etiquetas de texto, sobre ellas el usuario no puede escribir nada.
- **Line:** es un control gráfico que se muestra como una línea horizontal, vertical o diagonal.
- **Menu:** muestra un menú personalizado para la aplicación. Un menú puede incluir comandos, submenús y barras separadoras.
- **ListBox:** muestra una lista de elementos entre los cuales el usuario puede seleccionar uno o más.
- **OptionButton:** son botones de opción, en los que el usuario debe elegir una sólo opción entre varias.
- **PictureBox:** puede mostrar un gráfico a partir de un mapa de bits, un icono o un metarchivo, así como un metarchivo mejorado, un archivo JPEG o un archivo GIF.
- **Shape:** es un control gráfico que se muestra como un rectángulo, un cuadrado, una elipse, un círculo, un rectángulo redondeado o un cuadrado redondeado.
- **StatusBar:** proporciona una ventana, normalmente ubicada en la parte inferior de un formulario, a través de la cual una aplicación puede mostrar varios tipos de datos de estado.
- **TabStrip:** es una serie de pestañas que se pulsan para mostrar la información de un modo ordenado.
- **TextBox:** son las cajas de texto, se diferencia con las anteriores en que el usuario sí puede escribir en éstas. Se usan para introducir datos en la aplicación.
- **Timer:** Un control **Timer** puede ejecutar código a intervalos periódicos produciendo un evento Timer.

Cuando el usuario realiza una acción sobre alguno de estos objetos, se produce lo que se llama un evento. Cada evento de cada objeto, tiene asignado un módulo de programa que

escribe el programador, así que cada evento produce una acción que define el programador. Los eventos que se usan en la aplicación son:

- **Load:** Este evento se produce cuando se carga por primera vez un formulario. En la programación, este evento se utiliza siempre con objetos *Form* para inicializar los valores que están relacionados con esa ventana o formulario.
- **Unload:** Ocurre cuando un formulario está a punto de quitarse de la pantalla. Cuando ese formulario se vuelve a cargar, el contenido de todos sus controles se reinicializa.
- **Click:** Este evento se produce cuando el usuario hace un clic con el botón izquierdo del ratón sobre un objeto. En la programación, este evento se utiliza en los objetos de tipos *CommandButton*, *ComboBox*, *CheckBox*, *OptionButton* y en las distintas acciones que hay en el menú de la aplicación. Dependiendo del objeto se realizarán unas determinadas acciones.
- **KeyPress:** Este evento se produce cuando se pulsa una tecla del teclado estando el foco situado en un objeto. Este evento se usa en los objetos *TextBox* para evitar que se introduzca texto en casillas de texto donde debe ir un valor numérico.
- **KeyDown:** Ocurren cuando el usuario pulsa una tecla mientras un objeto tiene el enfoque.
- **Change:** Indica que el contenido de un control ha cambiado, en esta aplicación se usa sobre los objetos *HScrollBar*.
- **MouseDown:** Este evento se produce siempre que se pulsa cualquier botón del ratón sobre un objeto.
- **MouseUp:** El evento *MouseUp* se produce cuando el usuario suelta el botón del ratón.
- **MouseMove:** El evento *MouseMove* se produce cuando el puntero del *mouse* se mueve por la pantalla. Tanto los formularios como los controles reconocen el evento *MouseMove* mientras el puntero permanece dentro de sus bordes.
- **Timer:** Ocurre cuando ha transcurrido un intervalo preestablecido para un control **Timer**.

Cada ventana tiene asignada un módulo de programa donde están situados todos los eventos pertenecientes a los objetos que existen en dicha ventana. Pero además, se puede definir módulos de programa que no están asignados directamente a ninguna ventana. En la aplicación existen varios módulos de programa que se verán más tarde.

Todos los objetos tienen diversas propiedades, que se indican en la programación poniendo el nombre de la propiedad justo después del nombre del objeto separados por un punto, por

ejemplo si hay una etiqueta "label1" y queremos cambiar el texto que contiene de modo que muestre la palabra "Ejemplo", utilizamos la propiedad "Caption" de la siguiente manera:

Label1.caption = "Ejemplo"

Ahora se ven las principales propiedades de los objetos utilizadas en esta aplicación:

- **AddItem:** Agrega un elemento a un control *ListBox* o *ComboBox*.
- **BackColor:** Devuelve o establece el color de fondo de un objeto.
- **BorderColor:** Devuelve o establece el color del borde de un objeto.
- **Caption:** Establece el texto que se muestra en los objetos.
- **Count:** Devuelve un tipo *Long* que contiene el número de objetos de una colección (matriz).
- **CurrentX, CurrentY:** Devuelven o establecen las coordenadas horizontal (*CurrentX*) o vertical (*CurrentY*) para el siguiente método gráfico o de impresión.
- **Enabled:** Devuelve o establece un valor que determina si un formulario o un control puede responder a eventos generados por el usuario.
- **FontBold:** Devuelve o establece el estilo de fuente del objeto *Font*, lo que indica si es negrita o no.
- **FontSize:** Devuelve o establece el tamaño de la fuente que se va a usar para el texto mostrado en un control o en una operación de dibujo o impresión en tiempo de ejecución.
- **ForeColor:** Devuelve o establece el color de primer plano utilizado para mostrar texto y gráficos en un objeto.
- **Frompage:** Devuelven o establecen los valores de los cuadros de texto De y A del cuadro de diálogo *Imprimir*.
- **Height:** Devuelve o establece un tipo de datos *Single* que contiene el alto de la ventana medido en twips (la unidad de medida de gráficos de Visual Basic).
- **Hide:** Oculta un objeto *Form* pero no lo descarga.
- **Index:** Establece o devuelve el número que identifica inequívocamente un objeto de una colección.
- **Interval:** Devuelve o establece el número de milisegundos entre las llamadas al evento *Timer* de un control *Timer*.

- **Left:** Devuelve o establece la distancia entre el borde interno izquierdo de un objeto y el borde izquierdo del objeto en el que está contenido.
- **List:** Devuelve o establece los elementos contenidos en la parte de lista de un control. La lista es una matriz de cadenas cuyos elementos se corresponden con los de la lista.
- **ListCount:** Devuelve el número de elementos de la parte de lista de un control.
- **ListIndex:** Devuelve o establece el índice del elemento seleccionado actualmente en el control.
- **Locked:** Devuelve o establece un valor que indica si un control se puede modificar.
- **Max:** devuelve o establece el valor máximo de la propiedad *Value* de una barra de desplazamiento cuando el cuadro de desplazamiento se encuentra en el extremo inferior o derecho.
- **Min:** devuelve o establece el valor mínimo de la propiedad *Value* de una barra de desplazamiento cuando el cuadro de desplazamiento se encuentra en el extremo superior o izquierdo.
- **Picture:** Devuelve o establece un gráfico que se mostrará en un control.
- **RemoveItem:** Quita un elemento de un control *ListBox* o *ComboBox*.
- **Show:** Presenta un objeto *Form*.
- **ScaleHeight:** Devuelve o establece el número de unidades de medida vertical del interior de un objeto al usar métodos gráficos o al colocar controles.
- **ScaleLeft:** Devuelve o establece la coordenada horizontal del borde izquierdo de un objeto al usar métodos gráficos o al situar controles.
- **ScaleTop:** Devuelve o establece la coordenada vertical del borde superior de un objeto al usar métodos gráficos o al situar controles.
- **ScaleWidth:** Devuelve o establece el número de unidades de medida horizontal del interior de un objeto al usar métodos gráficos o al colocar controles.
- **SetFocus:** Mueve el enfoque al control o formulario especificado.
- **Tooltiptext:** Devuelve o establece información sobre herramientas.
- **Top:** Devuelve o establece la distancia entre el borde interno superior de un objeto y el borde superior de su contenedor

- **Text:** Devuelve o establece el texto contenido en el área de edición para un *ListBox* o un *ComboBox*.
- **Visible:** Devuelve o establece un valor que indica si un objeto es visible o está oculto.
- **Value:** devuelve o establece el estado del control *OptionButton*, o el valor, devuelve o establece la posición actual de la barra de desplazamiento para *HScrollBar* y *VScrollBar*.
- **Width:** Devuelve o establece un tipo de datos *Single* que contiene el ancho de la ventana medido en twips (la unidad de medida de gráficos de Visual Basic).
- **X1, X2, Y1, Y2:** Devuelven o establecen las coordenadas del punto inicial (X1, Y1) y del punto final (X2, Y2) de un control *Line*. Las coordenadas horizontales son X1 y X2, y las verticales son Y1 e Y2.
- **Zorder:** Coloca un objeto *Form* o un control al principio o al final del orden z dentro de su nivel gráfico.

En MS Visual Basic, como en cualquier entorno de programación, se pueden declarar diversos tipos de variables. En esta aplicación se utilizan los siguientes tipos de variables:

- **Boolean:** Estas son las variables de tipo booleano, que pueden tomar sólo dos valores que son *False* y *True*.
- **String:** Estas son variables de tipo texto, en las cuales se almacena una cadena de texto.
- **Integer:** Son variables de tipo numérico que toman valores enteros que van de -32.768 a 32.767.
- **Long:** Son variables de tipo numérico que toman valores enteros con un valor comprendido entre -2.147.483.648 y 2.147.483.647.
- **Single:** Son variables de tipo numérico que toman valores reales, con valores que van de -3,402823E38 a -1,401298E-45 para valores negativos y de 1,401298E-45 a 3,402823E38 para valores positivos.
- **Double:** Son variables de tipo numérico que toman valores reales, con valores contenidos entre -1,79769313486232E308 y -1,94065645841247E-324 para valores negativos y de 1,94065645841247E-324 a 1,79769313486232E308 para valores positivos.

Además, se declaran variables de tipo matricial, que almacenan filas y columnas de datos de alguno de los tipos anteriores. Estas variables se declaran seguidas de paréntesis.

4.3 SISTEMA DE ARCHIVOS DE SDICD

La aplicación desarrollada cuenta con una serie de archivos adjuntos que se distribuyen en las carpetas del programa, encontraremos las siguientes carpetas:

- **Textos.** En esta carpeta encontraremos un total de 193 archivos, de los cuales 192 son archivos del tipo "0_1.gif", en el que el primer nº (0 en este caso) indica el número de presentación en que aparece y el segundo (1) el orden en que aparecerá dentro de la presentación ya que hay presentaciones que tienen más de un archivo. Es de importancia saber que todos y cada uno de estos ficheros han sido desarrollados a través del programa MathType, debido a la facilidad de tratar con símbolos matemáticos que posee este programa. Además, en esta carpeta encontraremos el archivo títulos.txt, en el que podemos encontrar los nombres de las 150 presentaciones teniendo un acceso de modo secuencial al mismo desde la aplicación.
- **Usuarios.** En esta carpeta encontraremos el archivo Registro.dat, en este archivo podemos encontrar el nombre y la contraseña de cada uno de los usuarios registrados al programa. Además encontraremos un archivo para cada uno de los usuarios en el que se guardará el progreso en la evaluación de la materia por parte del programa.
- **Imágenes.** En esta carpeta encontraremos un total de 228 imágenes en distintos formatos (bmp, gif, jpg), a las que el programa hará referencia para cargarlas en cada una de las presentaciones y en otras aplicaciones del mismo como pueda ser en las ayudas.
- **Herramientas\Glosario.** En esta carpeta se diferencian 3 grupos de archivos. El primero de ellos es el archivo "glosario.txt", en el que se guardan los nombres de todos los términos contenidos en el glosario del programa. El segundo está compuesto por 254 archivos del tipo "término_valor Crisp.txt", que contendrán la información correspondiente a dicho término. Por último encontraremos 151 archivos del tipo "términos_página_35" que indicará los términos que se muestran en la página en cuestión (en este caso la página 35).
- **Herramientas\Bibliografía.** En esta carpeta se diferencian 3 grupos de archivos. El primero de ellos es el archivo "bibliografía.txt", en el que se guardan los nombres de todas las referencias contenidas en el programa. El segundo está compuesto por 24 archivos del tipo "biblio_Zadeh65.txt", que contendrán la información correspondiente a dicha referencia. Por último encontraremos 151 archivos del tipo "biblio_página_35" que indicará las referencias que se muestran en la página en cuestión (en este caso la página 35).
- **Herramientas\Test.** En esta carpeta se encuentran 7 archivos TXT, que contendrán las preguntas correspondientes a cada uno de los test que se pueden ejecutar en el programa.

Los ficheros (de extensión *.txt*) contenidos por las carpetas *Glosario*, *Bibliografía* y *Test* podrán ser modificados, pero para evitar errores durante la ejecución se recomienda el uso del *Editor de Herramientas*, que se puede ejecutar en modo *Administrador*.

4.4 FORULARIOS DE SDICD

La aplicación desarrollada está compuesta por 8 formularios, a continuación se detalla de un modo escueto el funcionamiento y la funcionalidad de cada uno de ellos.

4.4.1 Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso

Este es el formulario principal de la aplicación, es decir es el encargado de mostrar cada una de las 150 presentaciones que componen el libro electrónico. Como se puede observar en la Figura 4.4 este formulario está compuesto principalmente por controles *CommandButton*, *Label*, *Image*, *ListBox*, *Menu* y *CommonDialog*.

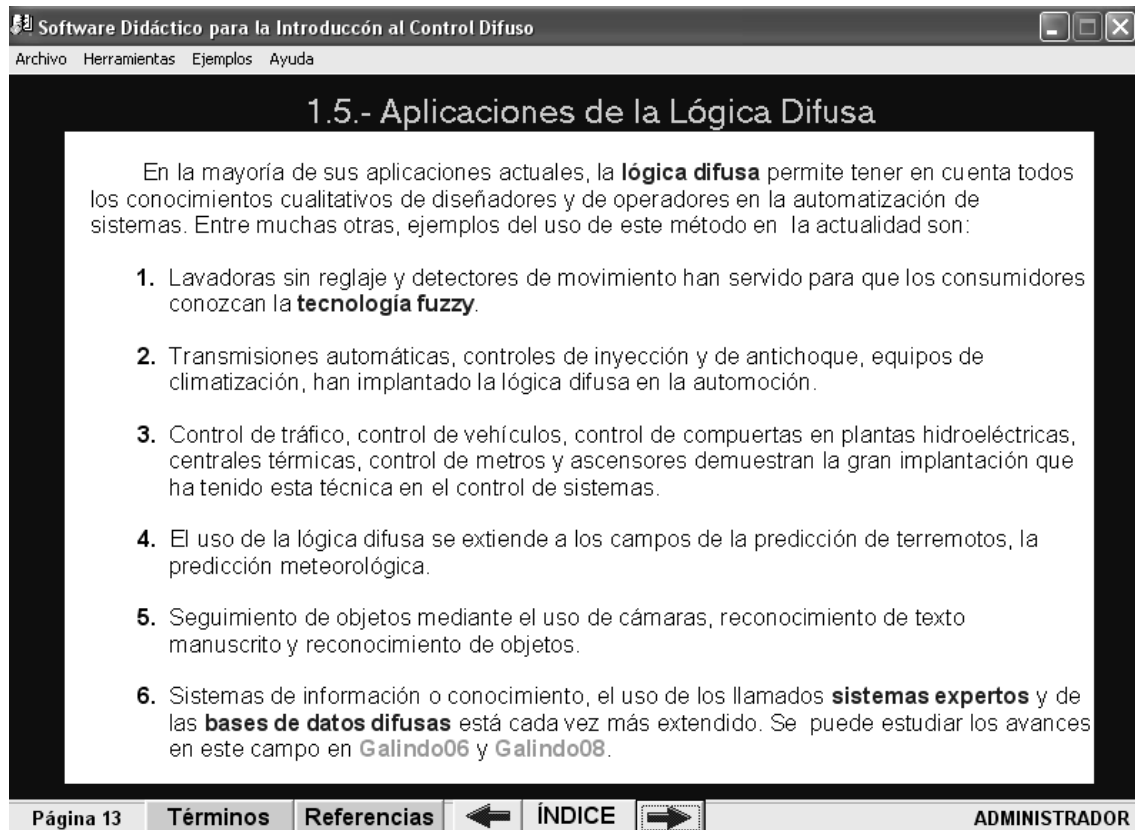


Figura 4.4 Formulario: Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso

De un modo funcional, cuando un usuario desea cambiar la página del libro electrónico comprueba la posibilidad de realizar un test antes de abandonar la página, en caso negativo el programa pondrá en modo no visible todos los controles de imagen. Después se cargará y se ordenará dentro de la página las nuevas imágenes correspondientes a la nueva página y se resetearán los controles *Listbox* para cargar en ellos las referencias y términos correspondientes a la nueva página.

Un caso particular de este formulario es a la hora de imprimir, ya que lo que hace es mantener la página actual en unos controles principales, que se muestran de un modo continuo. Las páginas a imprimir se cargarán en unos controles secundarios que a su vez se cargan en el *Printer* (impresora), se ha programado la impresión de modo que se carguen dos presentaciones por página, debido a motivos funcionales y ecológicos.

4.4.2 Control de Usuarios de SDICD

Este formulario, mostrado en la Figura 4.5, es el encargado de mostrar y gestionar los usuarios de SDICD. Está compuesto principalmente por controles *Label*, *textbox*, *ListBox* y *CommandButton*.



Figura 4.5 Formulario Control de Usuarios de SDICD

A la hora de guardar un usuario justificará las cadenas, y comprobará que las cadenas introducidas tienen un formato correcto y creará un archivo en la carpeta *usuarios* si todo es correcto. A la hora de cargar un usuario comprobará la cadena introducida con la registrada (ignorando mayúsculas o minúsculas). A la hora de iniciar sesión, pasará los datos de usuario al libro electrónico para así hacer el seguimiento de los Test a lo largo del programa.

4.4.3 Simulación del Control Difuso de un Cruce de Semáforos

Este formulario se ha desarrollado para poder seguir los pasos fundamentales necesarios para la implantación de un controlador difuso de tráfico. Los principales controles que encontramos en este formulario son *Label*, *Image*, *TabStrip*, *HScrollBar*, *TextBox*, y sobre

todo *Timer* , ya que un total de 6 controles de este tipo componen el formulario, encargándose desde dar sensación de movimiento continuo a los coches, hasta de la gestión del tiempo en el ejemplo.

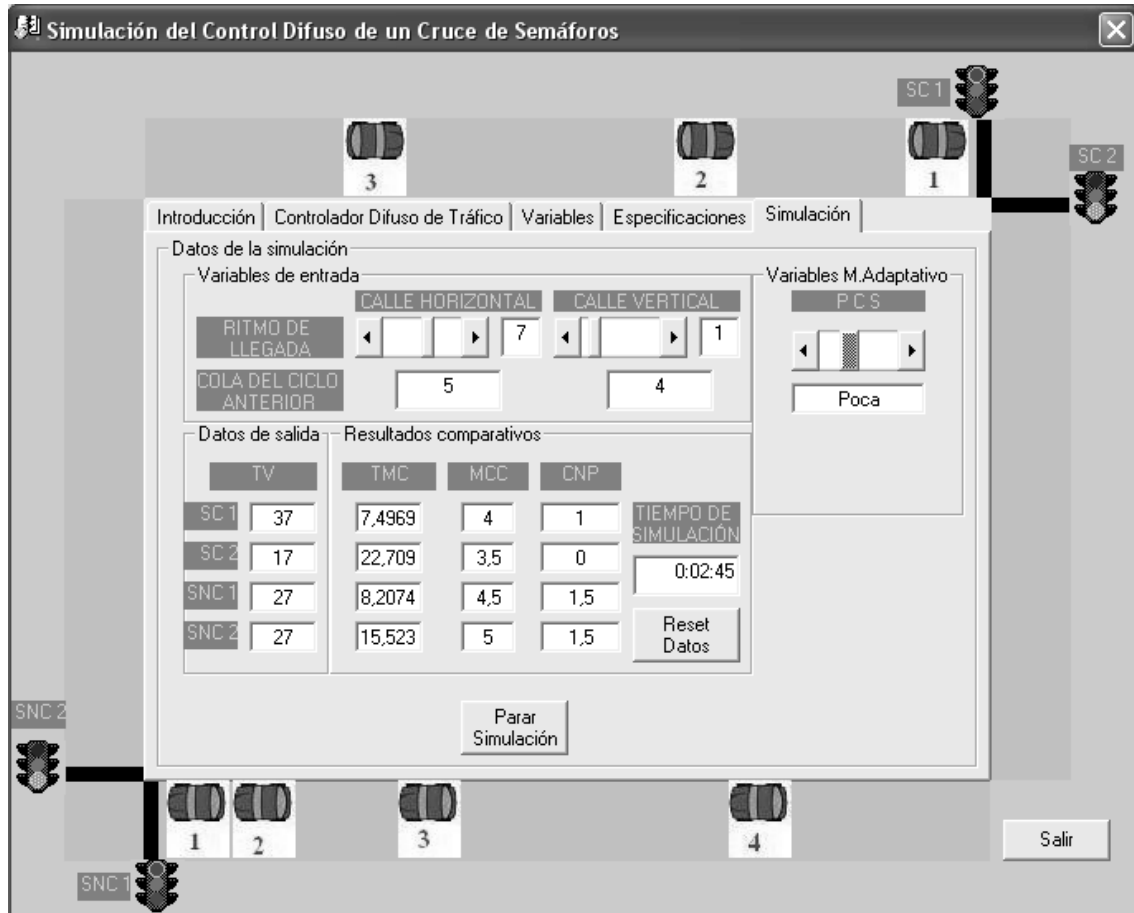


Figura 4.6 Formulario Simulación del Control Difuso de un Cruce de Semáforos

Estudiando la estructura del formulario (Figura 4.6) podemos observar que en la parte central encontramos las siguientes pestañas: *Introducción*, *Controlador Difuso de Tráfico*, *Variables*, *Especificaciones* y *Simulación*. Todas estas pestañas abrirán una ventana informativa (incluso algunas de ellas con otras sub-pestañas) excepto en la pestaña *Simulación* que permite al usuario interactuar con el formulario. En este caso al pulsar sobre el botón *Iniciar Simulación* (*Parar simulación* en la Figura 4.6), pone en marcha los controles *Timer*, que desarrollarán las funciones de introducir coches (imágenes) al sistema, mover los coches, y manipular los semáforos en función del tiempo estipulado para cada ciclo, una vez que acaba el ciclo los datos obtenidos acumulados hasta el momento se actualizan y se muestran en la ventana.

4.4.4 Simulación del Control Difuso de un Invernadero

Este formulario (Figura 4.7), al igual que el de la *Simulación del Control Difuso de un Cruce de Semáforos*, también es un ejemplo, en este caso más que en los pasos necesarios para la

implantación del controlador se muestra el funcionamiento interno del controlador propiamente dicho. Este formulario muestra numéricamente y gráficamente el desarrollo de los cálculos realizados entre los distintos conjuntos difusos en función de una serie de botones (opciones) y valores de variables (valor y precisión de los sensores). Para el desarrollo del presente controlador fundamentalmente se han usado *Label*, *HScrollBar*, *CommandButton*, *OptionButton*, *TabStrip* y *Line*, que es la herramienta fundamental para desarrollar los gráficos de la aplicación.

En el punto de vista funcional este es el formulario más complejo de la aplicación, ya que está programado para que ante cualquier cambio (en variables u opciones) se desarrollen todos los pasos existentes en un *Controlador Difuso*. Ante cualquier cambio se difuminan los conjuntos difusos de entrada en función del valor de cada variable y de la precisión del sensor que la representa, y se obtiene el grado con que cada variable pertenece a sus distintas etiquetas lingüística, una vez hecho esto se calcula el grado de activación de las 15 reglas *Si-Entonces* preestablecidas en el sistema en función de la función del *Operador And* usado para el cálculo del grado de activación de cada regla. Tras esto se calcula la implicación difusa de cada variable de salida con respecto a cada una de las reglas en función de la función de implicación elegida. Finalmente se muestra como se calcula el valor de salida para cada variable en función de los distintos conjuntos difusos de salida obtenidos en la implicación y del método de concreción elegido, y se representa gráficamente (Figura 4.7).

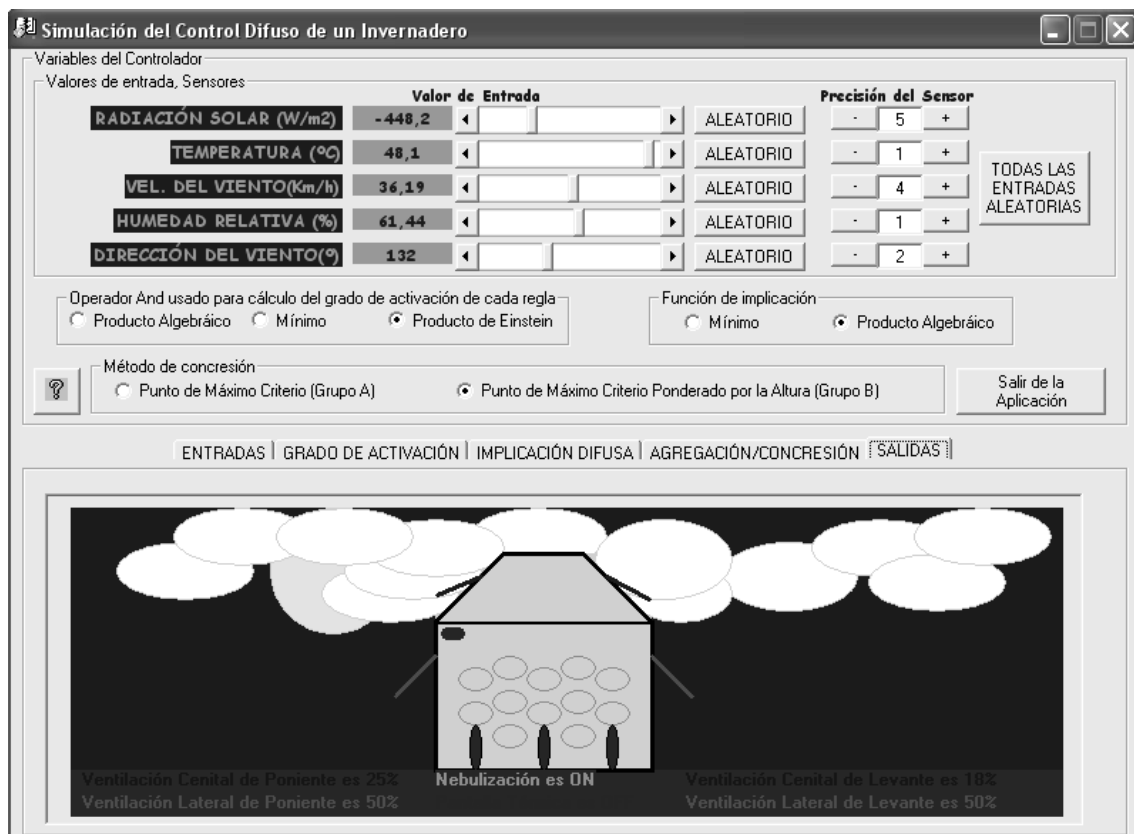


Figura 4.7 Formulario Simulación del Control Difuso de un Invernadero

4.4.5 Ayuda de Simulación del Control Difuso de un Invernadero:

Este formulario es meramente informativo y se ha creado debido a la complejidad de la *Simulación del Control Difuso de un Invernadero*, para poder explicar con detalle todas y cada una de las funciones y características que este tiene. En lo que se refiere a los principales controles contenidos por el formulario podemos encontrar *Label*, *Image*, *TabStrip*, *Frame*, *Timer* y *CommandButton*.

The screenshot shows a software window titled "Ayuda de Simulación de Control Difuso de un Invernadero". It features a menu bar with "GRADO DE ACTIVACIÓN", "IMPLICACIÓN DIFUSA", "AGREGACIÓN/CONCRESIÓN", and "SALIDAS". Below the menu bar are three tabs: "GENERAL", "VARIABLES DEL CONTROLADOR", and "ENTRADAS". The "VARIABLES DEL CONTROLADOR" tab is active, displaying a table of sensor values and several configuration options. The table lists sensors like "RADIACIÓN SOLAR (W/m2)", "TEMPERATURA (°C)", "VEL. DEL VIENTO (Km/h)", "HUMEDAD RELATIVA (%)", and "DIRECCIÓN DEL VIENTO(°)". Below the table, there are radio buttons for selecting the "Operador And" (Producto Algebraico, Mínimo, Producto de Einstein) and the "Función de Implicación" (Mínimo, Producto Algebraico). There are also radio buttons for the "Método de concreción" (Punto de Máximo Criterio (Grupo A), Punto de Máximo Criterio Ponderado por la Altura (Grupo B)). A text box at the bottom explains the operator options. A "Salir" button is located in the bottom right corner.

Figura 4.8 Formulario Ayuda para Sim. del Control Difuso de un Invernadero

Funcionalmente se trata de una aplicación sencilla, ya que al pulsar sobre una pestaña se cargan los contenedores con los textos y las imágenes que se desean mostrar para ese apartado (se puede observar en la Figura 4.8). Como se ha dicho anteriormente algunas imágenes van cambiando su aspecto mediante temporizadores.

4.4.6 Editor de Herramientas de SDICD

El *Editor de Herramientas* (Figura 4.9) es una aplicación desarrollada para la creación y edición e las referencias, términos y tests usados por SDICD durante el desarrollo del mismo, es decir es una herramienta creada para simplificar el trabajo del programador. Estos datos se guardan en el sistema de archivos del programa. Se ha optado por la introducción de esta aplicación dentro del programa para facilitar a cualquier usuario que esté interesado en impartir esta materia el poder libremente editar o introducir nuevos datos en lo que a

referencias, términos y test se refiere. El formulario está principalmente compuesto por *Label*, *TabStrip*, *ListBox*, *TextBox*, y *CommandButton*.

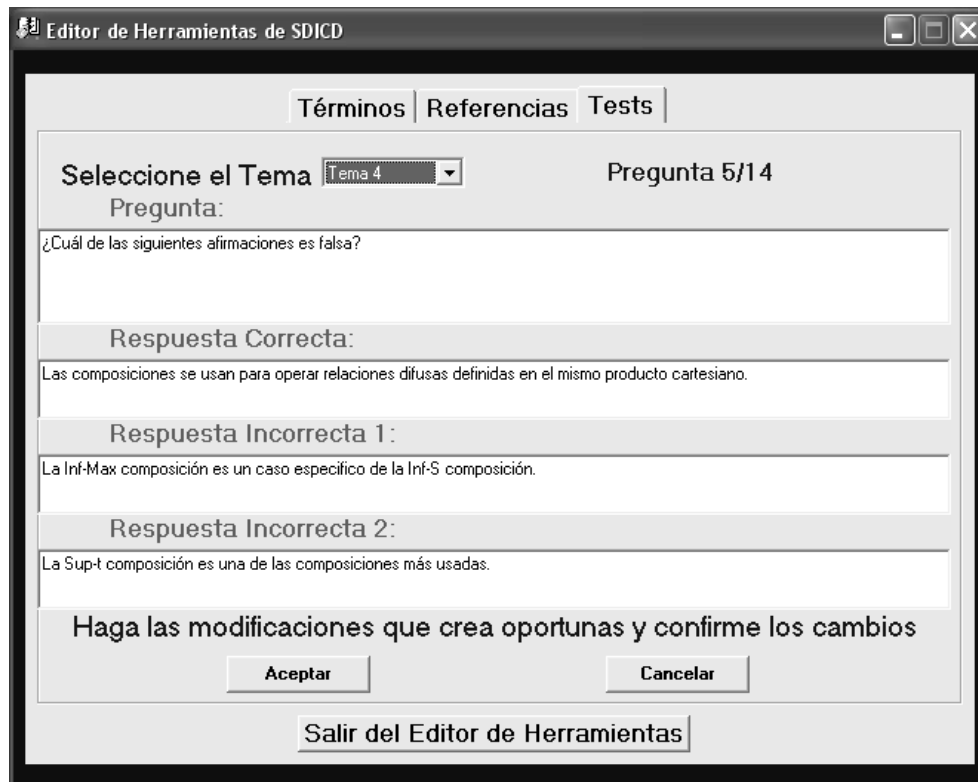


Figura 4.9 Formulario Editor de Herramientas de SDICD

De un modo funcional, al editar cualquier elemento el programa comprobará que los datos que se desean introducir cumplen ciertas características, en caso de que no las cumpla modificará los datos o abortará la operación según el caso, principalmente al aceptar cambios o al introducir un nuevo elemento el programa elimina los saltos de carro contenidos en las cajas de texto, quita las dobles comillas (“ejemplo”) debido a que son incompatibles con la manipulación de información mediante ficheros, sustituyéndolas por la comilla simple (‘ejemplo’), se justifican todas las cadenas (elimina los espacios al inicio y al final de cada cadena de texto), se pone en mayúsculas la cadena principal que refleja el nombre del elemento (no para los tests) y comprueba que todas las cadenas contienen texto (después de haber realizado los pasos anteriores). Una vez pasados estas restricciones el programa se encarga de modificar o crear el archivo correspondiente, según proceda. Al salir del *Editor de Herramientas* se aplicarán los cambios realizados a los términos, referencias y test del libro electrónico de SDICD.

4.4.7 Acerca de SDICD

En este caso se trata de un formulario meramente informativo en el que el usuario podrá saber los datos fundamentales de SDICD, como son autor, fecha y versión, así como los nombres de la Universidad, Facultad y Departamento correspondientes a la aplicación, como

se puede observar en la Figura 4.10. La simplicidad del formulario hace que únicamente este compuesto por controles *Image Label* y *CommandButton*. Funcionalmente este formulario no posee ninguna cualidad que haga especialmente compleja la comprensión sobre el funcionamiento del mismo.



Figura 4.10 Formulario Acerca de SDICD

4.4.8 Test

Este formulario ha sido creado para poder evaluar a los usuarios sobre los conocimientos adquiridos con SDICD. En este caso se usan las preguntas guardadas en la carpeta *herramientas/test* y se aplicará un test de modo aleatorio entre todas las preguntas que correspondan al tema en cuestión. Los controles que forman este formulario principalmente son *Label*, *OptionButton*, *CommandButton* y *Timer*.

Funcionalmente es un formulario bastante interesante, de un modo resumido lo que hace es al iniciar el test selecciona aleatoriamente 10 preguntas de entre todas las que componen el fichero de test para ese tema. Tras esto ordena las respuestas de cada pregunta de un modo aleatorio y en ese momento se inicia la evaluación del test. Cuando el usuario pulse el botón aceptar se guardará la opción elegida, una vez realizadas todas las preguntas se calcula la puntuación cotejando las respuestas elegidas con las respuestas correctas, esto se podrá visualizar al pulsar sobre *Revisar Test* (Figura 4.11)

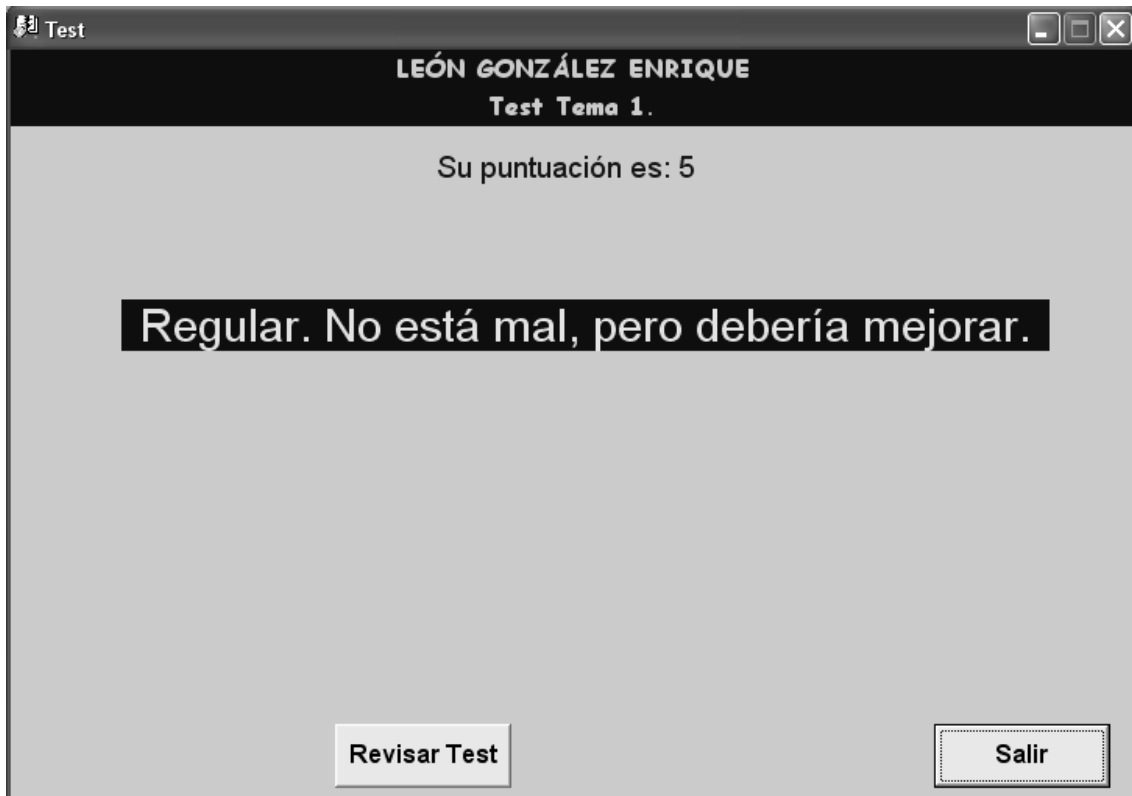


Figura 4.11 Formulario Test

Anexo 1: Glosario de SDICD

El presente anexo contiene la totalidad de los términos incluidos en *Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso*, tal y como aparecen en el programa. Al observar el mismo se podrá ver que en la mayoría de los términos aparece una frase similar a *véase página 82 del texto*, en este caso se está haciendo referencia al texto de SDICD, que podremos encontrar en el **Capítulo 2 Libro Electrónico SDICD** de la presente memoria.

ACCIÓN DE CONTROL: "Acción de un controlador automático que produce una señal de control que trata de minimizar la desviación. Véase página 82 del texto."

ACCIONES DE CONTROL DE OPERADORES ADIESTRADOS: "Reglas de control obtenidas de la observación directa de las acciones del controlador humano, teniendo en cuenta los datos de entrada y salida del proceso. Véase página 109 del texto."

ACTUADOR: "Dispositivo capaz de alterar el valor de las variables de un sistema. Véase la página 81 del texto."

ALFA: "Valor incluido en el intervalo $[0,1]$, se usa para el estudio de los elementos de un universo de discurso cuyo grado de pertenencia a un conjunto difuso es mayor a este valor. Véase la página 42 del texto."

ALFA CORTE: "Conjunto clásico de elementos en el que se incluyen todos los valores del universo del discurso cuyo grado de pertenencia sea mayor a un valor alfa. Véase la página 42 del texto."

ALGORITMO DE BEZDEK: "Nombre con el que comúnmente se conoce al algoritmo fuzzy-isodata, en referencia a su autor. Véase la página 32 del texto."

ALGORITMO FUZZY ISODATA: "Algoritmo usado en el método basado en Agrupación difusa para la obtención de conjuntos Difusos, fue desarrollado por Bezdek. Véase la página 33 del texto."

ALGORITMO MODIFICADOR DE REGLAS: "Componente del SOC (controlador difuso auto-organizado) encargado de modificar las reglas de la base del conocimiento. Véase la página 147 del texto."

ALGORÍTMOS GENÉTICOS: "Herramienta utilizada en el método de ajuste de controladores difusos mediante la modificación de los conjuntos difusos. Véase la página 141 del texto."

ALTURA: "Se llama así al mayor grado de pertenencia de de todos los elementos de un conjunto difuso, es uno de sus valores representativos. Véase la página 40 del texto."

ANTECEDENTE: "Primera parte de una regla difusa, que generalmente posee la forma SI <ANTECEDENTE> ENTONCES <CONSECUENTE>."

APRENDIZAJE: "Reglas autogeneradas por el controlador a partir de meta-reglas, emulando el modo de análisis de los humanos. Véase la página 111 del texto."

ÁREA: "Valor representativo de un conjunto difuso. Véase la página 132 del texto."

BASE DE DATOS: "Bloque del controlador difuso, forma parte del flujo de información introducida durante el diseño del mismo. Véase la página 88 del texto."

BASE DE DATOS DIFUSA: "Son bases de datos que usan terminología y comparadores difusos en su desarrollo. Véase la página 13 del texto."

BASE DE REGLAS: "Bloque del controlador difuso, forma parte del flujo de información introducida durante el diseño del mismo. Véase la página 88 del texto."

BASE DEL CONOCIMIENTO: "Parte de un controlador difuso que contiene el conjunto de reglas de control. Véase la página 88 del texto."

BEZDEK: "Autor del algoritmo que lleva su nombre, publicado en 'Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms', Plenum Press, New York, 1981. Véase la página 32 del texto."

COMPARACIÓN: "Conjunto de operaciones que se realizan entre conjuntos difusos para compararlos entre sí. Véase la página 58 del texto."

COMPLEMENTO: "El complemento de un conjunto difuso es otro conjunto difuso, en el que el grado de pertenencia de cada elemento será 1 menos el grado de pertenencia del conjunto inicial para ese elemento. También se aplica a las relaciones difusas. Véase la página 57 del texto."

COMPOSICIÓN: "Operación entre una relación difusa y la extensión cilíndrica de un conjunto difuso. Véase la página 73 del texto."

CONCENTRACIÓN: "Operación unaria que eleva a una potencia mayor que 1 la función de pertenencia de un conjunto difuso. Véase la página 47 del texto."

CONCEPTO DIFUSO: "Conjunto Difuso cuya función de pertenencia es del tipo gamma, es decir que los primeros elementos del universo de discurso poseen un grado de pertenencia 0, mientras que en los últimos es 1, p.e. muy Caliente. Véase la página 21 del texto."

CONCEPTO DIFUSO INVERSO: "Conjunto Difuso cuya función de pertenencia es contraria a la de un concepto difuso estándar, es decir que los primeros elementos del universo del discurso poseen un grado de pertenencia de valor 1 y los últimos de valor 0, p.e. muy frío. Véase la página 21 del texto."

CONCLUSIONES PLAUSIBLES: "Conclusiones acertadas."

CONCRESIÓN: "Transformación de la información difusa en concreta."

CONCRESOR: "Parte de un controlador difuso que se encarga de traducir la información contenida en los conjuntos difusos en información concreta para los actuadores. Véase la página 88 del texto."

CONJUNCIÓN: "Operación que se realiza entre conjuntos, en términos lingüísticos equivale a la intersección."

CONJUNTO: "Agrupación de objetos, seres o términos que poseen alguna cualidad en común."

CONJUNTO CLÁSICO: "Agrupación de elementos en la que estos pueden estar o no incluidos en el conjunto, pero no estar incluidos parcialmente."

CONJUNTO DE REGLAS: "Agrupación de las reglas difusas de control que forman la Base del conocimiento. Véase la página 95 del texto."

CONJUNTO DIFUSO: "Conjunto sin límites precisos, introducido por el Dr. Zadeh en su libro 'Fuzzy Sets' en 1965, que juega un importante papel en el reconocimiento de formas, interpretación de significados y en la abstracción (esencia del proceso de razonamiento humano). Véase la página 15 del texto."

CONJUNTO DIFUSO CONCAVO: "Conjunto difuso en el cual al menos uno de sus alfa-cortes no es convexo. Véase la página 43 del texto."

CONJUNTO DIFUSO CONVEXO: "Conjunto difuso en el cual todos sus alfa-cortes son convexos. Véase la página 43 del texto."

CONJUNTO DIFUSO DE COMPATIBILIDAD: "Conjunto difuso obtenido tras usar la técnica medidas de compatibilidad para la comparación de dos conjuntos difusos. Véase la página 62 del texto."

CONJUNTO DIFUSO NORMALIZADO: "Se llama así al conjunto difuso en el cual al menos un elemento posee por grado de pertenencia la unidad. Véase la página 41 del texto."

CONORMA TRIANGULAR: "Operación binaria que cumple las propiedades conmutativa, asociativa, monotonía y en la que: $x \text{ s } 0 = x$, $x \text{ s } 1 = 1$. Véase la página 52 del texto."

CONSECUENTE: "Última parte de una regla difusa, que generalmente posee la forma SI <ANTECEDENTE> ENTONCES <CONSECUENTE>."

CONTROL: "Herramienta matemática usada para regular la acción de un mecanismo. Véase la página 81 del texto."

CONTROL AUTOMÁTICO: "Herramienta matemática que se usa para regular automáticamente la acción de un mecanismo."

CONTROL DIFUSO: "Control que se desarrolla en los términos de la lógica difusa."

CONTROL MULTIRRESOLUCIÓN: "Es una variación del efecto ventana, en el que se aplica este en más de una etapa para conseguir mayor precisión aún. Véase la página 143 del texto."

CONTROL REALIMENTADO: "Operación que en presencia de perturbaciones impredecibles tiende a reducir la diferencia entre la salida y la entrada de referencia de un sistema. Véase la página 81 del texto."

CONTROLADOR: "Mecanismo encargado del control de un sistema. Véase la página 81 del texto."

CONTROLADOR AUTOMÁTICO: "Mecanismo encargado del control automático de un sistema. Véase la página 82 del texto."

CONTROLADOR DIFUSO: "Controlador que utiliza los términos de la lógica difusa. Véase la página 87 del texto."

CONTROLADOR DIFUSO BASADO EN T-NORMAS: "Son los controladores difusos que utilizan T-normas como funciones de implicación. Véase la página 120 del texto."

CONTROLADOR I: "Controlador Integral. Véase la página 84 del texto."

CONTROLADOR LINGÜÍSTICO: "Es componente del SOC (controlador difuso auto-organizado). Véase la página 147 del texto."

CONTROLADOR ON-OFF: "Controlador de dos posiciones. Véase la página 84 del texto."

CONTROLADOR P: "Controlador Proporcional. Véase la página 84 del texto."

CONTROLADOR PD: "Controlador Proporcional Derivativo. Véase la página 84 del texto."

CONTROLADOR PI: "Controlador Proporcional Integral. Véase la página 84 del texto."

CONTROLADOR PID: "Controlador Proporcional Integral Derivativo. Véase la página 84 del texto."

CONTROLADORES DIFUSOS ADAPTATIVOS: "Es un controlador capaz de detectar los cambios en las características del proceso y ajustarse a él. Véase la página 146 del texto."

CONTROLADORES DIFUSOS AUTO-ORGANIZADOS (SOC): "Son los controladores capaces de modificar las reglas de la base del conocimiento. Véase la página 147 del texto."

CONTROLADORES DIFUSOS BASADOS EN MODELOS BORROSOS: "Son los controladores desarrollados a partir del modelado del sistema a controlar. Véase la página 149 del texto."

CONTROLADORES DIFUSOS CON AUTO-APRENDIZAJE: "Controladores que responden a procedimientos y técnicas de aprendizaje del tipo gradiente descendente. Véase la página 148 del texto."

CONTROLADORES DIFUSOS DIRECTOS: "Controlador difuso con realimentación negativa. Véase la página 145 del texto."

CONTROLADORES DIFUSOS HÍBRIDOS: "Son controladores difusos formados por dos controladores más simples, uno estándar y otro difuso. Véase la página 150 del texto."

CONTROLAR: "Medir el valor de la variable de control y aplicar la variable manipulada al sistema para obtener el valor deseado. Véase la página 81 del texto."

CUANTIFICADORES DIFUSOS: "Palabras que convierten una proposición difusa básica en cuantificada, la palabra puede ser del tipo: muchos, pocos, la mayoría... Véase la página 99 del texto."

DEFUZZIFICADOR: "Concesor. Véase página 89 del texto."

DIFERENCIA EXTENDIDA: "Extensión de la operación aritmética clásica al tratamiento de números difusos. Véase página 78 del texto."

DIFUMINACIÓN (PROCESO): "Operación unaria que aumenta los valores del grado de pertenencia menores a 0.5 y disminuye los mayores. Véase página 50 del texto."

DIFUMINACIÓN (OPERACIÓN): "Proceso que transforma los valores concretos en números difusos para operar con el controlador difuso. Véase página 92 del texto."

DIFUMINADOR (DIFUSOR): "Parte de un controlador difuso que se encarga de transformar los valores de las variables en conjuntos difusos."

DILATACIÓN: "Operación unaria que eleva a una potencia menor que 1 la función de pertenencia de un conjunto difuso. Véase página 48 del texto."

DISTANCIA: "Función que se utiliza para medir la proximidad entre dos conjuntos difusos. Véase página 59 del texto."

DISTANCIA EUCLIDEA: "Expresión utiliza para la medida de distancias entre dos conjuntos difusos, caso particular de la distancia Minkowski en el que $p=2$. Véase página 59 del texto."

DISTANCIA HAMMING: "Expresión utiliza para la medida de distancias entre dos conjuntos difusos, caso particular de la distancia Minkowski en el que $p=1$. Véase página 59 del texto."

DISTANCIA MINKOWSKI: "Expresión general utilizada para la medida de distancias entre dos conjuntos Difusos. Véase página 59 del texto."

DISTRIBUCIONES DE POSIBILIDAD: "Termino introducido por Zaded, miden la posibilidad de que un valor de un conjunto difuso sea igual al de otro conjunto difuso. Véase página 61 del texto."

DISYUNCIÓN: "Operación que se realiza entre conjuntos, en términos lingüísticos equivale a 'o', Unión."

DIVISIÓN EXTENDIDA: "Extensión de la operación aritmética clásica al tratamiento de números difusos. Véase página 78 del texto."

DRIANKOV: "Experto en control difuso, fue el autor que propuso la estructura de controlador difuso que se estudia en este temario."

EFFECTO VENTANA: "Es un método de ajuste de controladores difusos. Consiste en variar el banco de reglas en función de la salida del sistema de control para conseguir mayor especificidad. Véase página 143 del texto."

ERROR: "Diferencia entre la entrada de referencia y la salida en un sistema de control con realimentación."

ETIQUETA LINGÜÍSTICA: "Palabra que identifica a un conjunto difuso. Véase página 16 del texto."

EVALUADOR DE CARACTERÍSTICAS: "Es un componente del SOC (controlador difuso auto-organizado). Véase página 147 del texto."

EXPERIENCIA DE EXPERTOS: "Reglas difusas obtenidas por formulación directa a expertos y operadores adiestrados. Véase página 108 del texto."

EXPERTO: "Persona muy cualificada para desempeñar un trabajo o con altos conocimientos sobre una materia."

EXTENSIÓN CILINDRICA: "Operación que se usa para afectar al tamaño de la relación difusa sobre la que opera. Véase página 72 del texto."

FACTOR DE ESCALA: "Es un método de ajuste de controladores difusos. Consiste en definir unos conjuntos difusos en un intervalo $[0,1]$ del eje x y ajustar en ellos el universo de discurso de la variable. Véase la página 140 del texto."

FLUJO COMPUTACIONAL: "Elementos que componen la parte funcional del controlador: modulo de difuminación, módulo de concreción, base del conocimiento y motor de inferencia. Véase la página 88 del texto."

FLUJO DE INFORMACIÓN: "Elementos usados para el diseño del controlador difuso: Base de reglas y Base de datos. Véase la página 88 del texto."

FUNCIÓN CARACTERÍSTICA: "Función la lógica clásica para definir un sistema mediante el uso de operadores lógicos (unión, intersección y negación)."

FUNCIÓN DE IMPLICACIÓN: "Función utilizada en el proceso general de inferencia. Véase la página 116 del texto."

FUNCIÓN DE PERTENENCIA: "Función característica que relaciona el valor de un elemento con su grado de pertenencia a un conjunto difuso. Dicho grado de pertenencia pertenece al conjunto $[0,1]$. Véase la página 17 del texto."

FUNCIÓN DE PERTENENCIA CURVA: "Función de pertenencia con formas gaussianas. Véase la página 18 del texto."

FUNCIÓN DE PERTENENCIA LINEAL: "Función de pertenencia formada por líneas rectas. Véase la página 18 del texto."

FUNCIÓN GAMMA: "Tipo de función de pertenencia. Véase la página 20 del texto."

FUNCIÓN GAUSIANA: "Tipo de función de pertenencia. Véase la página 22 del texto."

FUNCIÓN PSEUDO-EXPONENCIAL: "Tipo de función de pertenencia. Véase la página 23 del texto."

FUNCIÓN S: "Tipo de función de pertenencia. Véase la página 21 del texto."

FUNCIÓN TRAPECIO EXTENDIDO: "Tipo de función de pertenencia. Véase la página 25 del texto."

FUNCIÓN TRAPEZOIDAL: "Tipo de función de pertenencia. Véase la página 24 del texto."

FUNCIÓN TRIANGULAR: "Tipo de función de pertenencia. Véase la página 19 del texto."

FUZZIFICADOR: "Difuminador."

FUZZY LOGIC: "Nombre original (en inglés) del concepto 'Lógica Difusa'."

GRADO DE ACTIVACIÓN: "Mide a contribución de una regla concreta en la inferencia global. Véase la página 122 del texto."

GRADO DE CERTEZA: "Palabra que convierte una proposición difusa básica en cualificada, la palabra puede ser del tipo: probable, poco probable, normalmente... Véase la página 99 del texto."

GRADO DE PERTENENCIA: "Es el valor con que se cuantifica la pertenencia de un elemento a un conjunto difuso. Véase la página 15 del texto."

GRADO DE POSIBILIDAD: "Palabra que convierte una proposición difusa básica en cualificada, la palabra puede ser del tipo: posible, poco posible... Véase la página 99 del texto."

GRADO DE PROBABILIDAD: "Palabra que convierte una proposición difusa básica en cualificada, la palabra puede ser del tipo: verdad, falso, casi verdad... Véase la página 99 del texto."

GRUPO A: "Métodos de concreción que están basados en un nuevo conjunto difuso creado a partir de la agregación de todas las funciones de pertenencia de todos los conjuntos difusos existentes. Véase la página 128 del texto."

GRUPO B: "Métodos de concreción que operan directamente con cada uno de los conjuntos obtenidos en el proceso de inferencia para después unir sus resultados en un conjunto difuso. Véase la página 128 del texto."

HEURÍSTICO: "Basado en la investigación de la deducción."

IGUALDAD: "Dos conjuntos difusos o dos relaciones difusas son iguales si para todos los elementos que los componen, el grado de pertenencia a cada uno de ellos es el mismo. Véase la página 36 del texto."

IMPLICACIÓN DIFUSA: "Función utilizada en el proceso general de inferencia. Véase la página 117 del texto."

INCERTIDUMBRE: "Falta de Certeza."

INCLUSIÓN: "Un conjunto difuso está incluido en otro si para todos los elementos que lo componen, el grado de pertenencia a este conjunto es menor o igual al otro. También se aplica a las relaciones difusas. Véase la página 37 del texto."

ÍNDICES DE IGUALDAD: "Herramienta utilizada para la comparación entre conjuntos difusos. Véase la página 60 del texto."

INFERENCIA: "Proceso del razonamiento, relacionando las distintas informaciones entre sí, para obtener un resultado lógico."

INFERENCIA DIFUSA: "Proceso de un controlador difuso que se encarga del razonamiento aproximado de las reglas contenidas en la base del conocimiento."

INF-MAX COMPOSICIÓN: "Composición entre dos relaciones difusas en la que opera entre ellas la s-norma del máximo. Véase la página 69 del texto."

INF-S COMPOSICIÓN: "Composición entre dos relaciones difusas en la que opera entre ellas una s-norma. Véase la página 69 del texto."

INTENSIFICACIÓN DEL CONTRASTE: "Operación unaria que aumenta los valores del grado de pertenencia mayores a 0.5 y disminuye los menores. Véase la página 49 del texto."

INTERSECCIÓN: "La intersección de dos conjuntos difusos da como resultado otro conjunto difuso en el que para cada elemento del universo su grado de pertenencia será el menor grado de pertenencia para ese elemento en los dos conjuntos iniciales. También se aplica a las relaciones difusas. Véase la página 51 del texto."

JAMES WATT: "Fue el pionero en la práctica del control automático, cuando en el siglo XVIII fabricó un regulador de velocidad centrífugo para el control de la velocidad de una máquina de vapor."

LEY DE NORMAN: "La ley de Norman aplicada a los conjuntos difusos establece que para cada t-norma existe una s-norma dual o conjugada. Véase la página 54 del texto."

LÓGICA CLÁSICA: "Lógica bivaluada, usada tradicionalmente en todos los campos de la electrónica y la informática, con la que no es posible manipular informaciones imprecisas."

LÓGICA DIFUSA: "Lógica que soporta modos de razonamiento similares al razonamiento humano, es decir aproximados en lugar de exactos."

MANDANI: "Diseñador del primer controlador basado en lógica Difusa, aplicado para controlar una máquina de vapor simple sobre la que se obtuvieron excelentes resultados."

MECANISMO DE ADAPTACIÓN: "Es un componente de los controladores difusos adaptativos, utiliza la información del monitor del proceso para variar los parámetros del controlador. Véase la página 146 del texto."

MEDIDA DE DISTANCIAS: "Herramienta utilizada para la comparación entre conjuntos difusos. Véase la página 59 del texto."

MEDIDA DE NECESIDAD: "Herramienta utilizada para la comparación entre conjuntos difusos. Véase la página 61 del texto."

MEDIDA DE POSIBILIDAD: "Herramienta utilizada para la comparación entre conjuntos difusos. Véase la página 61 del texto."

MEDIDAS DE COMPATIBILIDAD: "Herramienta utilizada para la comparación entre conjuntos difusos. Véase la página 62 del texto."

META-REGLAS: "Reglas difusas que pueden ser autogeneradas un controlador para un mejor funcionamiento del sistema, emulando al comportamiento humano. Véase la página 111 del texto."

MÉTODO BASADO EN LA AGRUPACIÓN DIFUSA: "Método de determinación de funciones de pertenencia para la formación de conjuntos difusos. Véase la página 32 del texto."

MÉTODO BASADO EN LA ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA: "Método de determinación de funciones de pertenencia para la formación de conjuntos difusos. Véase la página 30 del texto."

MÉTODO BASADO EN LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS: "Método de determinación de funciones de pertenencia para la formación de conjuntos difusos. Véase la página 31 del texto."

MÉTODO DE ANALISIS DE LIAPUNOV: "Método de determinación de funciones de pertenencia para la formación de conjuntos difusos. Véase la página 85 del texto."

MÉTODO DE COMPARACIÓN DE PAREJAS: "Método de determinación de funciones de pertenencia para la formación de conjuntos difusos. Véase la página 29 del texto."

MÉTODO HORIZONTAL: "Método de determinación de funciones de pertenencia para la formación de conjuntos difusos. Véase la página 27 del texto."

MÉTODO VERTICAL: "Método de determinación de funciones de pertenencia para la formación de conjuntos difusos. Véase la página 28 del texto."

MODELO DE REFERENCIA: "Es componente del SOC (controlador difuso auto-organizado). Véase la página 147 del texto."

MODELO DIFUSO DE UN PROCESO: "Reglas difusas obtenidas de la descripción de las características dinámicas del proceso a controlar. Véase la página 110 del texto."

MODELO MATEMÁTICO: "Conjunto de ecuaciones que representan la dinámica de un sistema con precisión."

MODIFICACIÓN DE LAS REGLAS DE LA BASE DEL CONOCIMIENTO: "Es un método de ajuste de controladores difusos. Lo hace modificando el contenido de las reglas. Véase la página 142 del texto."

MODIFICACIÓN DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS: "Es un método de ajuste de controladores difusos. Se basa en la modificación de las etiquetas de los conjuntos difusos. Véase la página 141 del texto."

MÓDULO CONGRESOR: "Parte de un controlador difuso que se encarga de traducir la información contenida en los conjuntos difusos en información concreta para los actuadores, así como de ajustar los valores de salida a los especificados por el sistema (denormalización). Véase la página 126 del texto."

MÓDULO DE DENORMALIZACIÓN: "Parte de un controlador difuso, se encarga de transformar los valores crisp de salida del controlador para que se ajusten a los requisitos del actuador. Véase la página 89 del texto."

MÓDULO DE NORMALIZACIÓN: "Parte de un controlador Difuso, se encarga de ajustar los valores crisp de entrada al controlador para que sean compatibles con el mismo. Véase la página 88 del texto."

MÓDULO DIFUMINADOR: "Parte de un controlador difuso que se encarga de transformar los valores de las variables en conjuntos difusos, así como de normalizar estas informaciones para ajustarlas a los requisitos de los conjuntos difusos (normalización). Véase la página 90 del texto."

MODUS PONENS: "Regla básica de deducción en la lógica de predicados. Es el método de inferencia más utilizado. Véase la página 114 del texto."

MODUS PONENS GENERALIZADO: "Modus Ponens que utiliza etiquetas lingüísticas difusas como variables e informaciones difusas como posibles valores de estas. Véase la página 114 del texto."

MONITOR DEL PROCESO: "Es un componente de los controladores difusos adaptativos. Es el encargado de detectar cambios en las características del proceso. Véase la página 146 del texto."

MOTOR DE INFERENCIA: "Parte de un controlador Difuso. Véase la página 112 del texto."

NEGACIÓN: "Complemento. Véase la página 57 del texto."

NEGACIÓN FUERTE: "Concepto introducido por Trillas que establece las propiedades que ha de tener una operación complemento para conjuntos difusos. Véase la página 57 del texto."

NOMURA: "Autor de la materia, ha desarrollado un método de aprendizaje por propagación hacia atrás de controladores difusos. Véase la página 148 del texto."

NORMA TRIANGULAR: "Operación binaria que cumple las propiedades conmutativa, asociativa, monotonía y en la que: $x \wedge 0 = 0$, $x \wedge 1 = x$. Véase la página 52 del texto."

NORMALIZACIÓN: "Operación unaria que convierte un conjunto difuso no normalizado en uno normalizado dividiéndolo por su altura. Véase la página 46 del texto."

NÚCLEO: "Subconjunto difuso formados por los elementos de un universo de discurso cuyo grado de pertenencia al mismo sea 1. Véase la página 39 del texto."

NÚMERO DIFUSO: "Conjunto difuso convexo, semicontinuo superiormente y cuyo soporte es un conjunto acotado. Véase la página 74 del texto."

NÚMERO DIFUSO NORMALIZADO: "Número difuso cuya altura es de valor uno. Véase la página 75 del texto."

NÚMERO DIFUSO TRAPEZOIDAL NORMALIZADO: "Número difuso en el cual las funciones a trozos que forman su función de pertenencia son lineales y su altura es 1. Véase la página 75 del texto."

OPERACIONES UNARIAS: "Son aquellas operaciones que se pueden aplicar a un conjunto difuso, sin la intervención de otro. Se incluyen en este término las operaciones normalización, concentración, dilatación, difuminación e intensificación del contraste. Véase la página 45 del texto."

OPERADOR DE AGREGACIÓN: "S-norma utilizada en el cálculo de la inferencia. Véase la página 123 del texto."

PERTURBACIÓN: "Señal que tiende a afectar negativamente el valor de salida de un sistema. Véase la página 81 del texto."

PLANTA: "Objeto físico que se va a controlar. Véase la página 81 del texto."

PMC MONO-INTERVALAR: "Un conjunto difuso posee PMC Mono-intervalar cuando un solo intervalo de puntos del conjunto cumple con las condiciones del PMC. Véase la página 130 del texto."

PMC MULTI-INTERVALAR: "Un conjunto difuso posee PMC Multi-intervalar cuando varios puntos o intervalos de puntos del conjunto cumple con las condiciones del PMC. Véase la página 130 del texto."

PMC ÚNICO: "Un conjunto difuso posee PMC único cuando un solo punto del conjunto cumple con las condiciones del PMC. Véase la página 130 del texto."

PRINCIPIO DE EXTENSIÓN: "Herramienta utilizada para transformar conjuntos difusos que tengan iguales o distintos universos, según una función de transformación en esos universos. Véase la página 76 del texto."

PROBLEMA DE GRADOS: "Es un problema el cual todas las informaciones se pueden cuantificar."

PROCESO: "Cualquier operación que se va a controlar. Véase la página 81 del texto."

PROCESO DE CONGRESIÓN O DEFUZZIFICACIÓN: "Proceso por el cual un conjunto difuso inferido es convertido a un valor numérico concreto representativo de dicho conjunto difuso. Véase la página 127 del texto."

PROCESO GENERAL DE INFERENCIA: "Algoritmo utilizado en la operación de inferencia global de un controlador. Véase la página 125 del texto."

PRODUCTO DRÁSTICO: "El Producto Drástico es la menor T-norma. Véase la página 54 del texto."

PRODUCTO EXTENDIDO: "Extensión de la operación aritmética clásica al tratamiento de números difusos. Véase la página 78 del texto."

PROPOSICIÓN DIFUSA COMPUESTA: "Se llama así a la proposición formada por dos o más proposiciones simples mediante el uso de conectores (Y/O). Véase la página 100 del texto."

PROPOSICIÓN DIFUSA ÚNICA: "Proposición difusa que no usa conectores de ningún tipo. Véase la página 100 del texto."

PROPOSICIONES ATÓMICAS: "Proposiciones lingüísticas que forman el antecedente o el consecuente de una regla difusa. Por ejemplo: la temperatura es elevada."

PROPOSICIONES BIEN FORMADAS: "Proposiciones difusas."

PROPOSICIONES DIFUSAS: "Proposiciones formadas a partir de proposiciones atómicas y conectivos lingüísticos y la implicación 'Si-Entonces'. Véase la página 100 del texto."

PROPOSICIONES DIFUSAS BÁSICAS: "Son aquellas proposiciones difusas que no utilizan cuantificadores ni cualificadores. Véase la página 98 del texto."

PROPOSICIONES DIFUSAS CUALIFICADAS: "Son aquellas proposiciones difusas que añaden un grado o etiqueta lingüística (verdad, falso, posible,...). Véase la página 99 del texto."

PROPOSICIONES DIFUSAS CUANTIFICADAS: "Son aquellas proposiciones que utilizan cuantificadores difusos como : muchos, pocos,... Véase la página 99 del texto."

PROPOSICIONES NO CATEGÓRICAS: "Son aquellas proposiciones difusas que usan cuantificadores y/o cualificadores. No tienen porque ser siempre ciertas. Véase la página 99 del texto."

PROYECCIÓN CILÍNDRICA: "Operación que se usa para afectar al tamaño de la relación difusa sobre la que opera. Véase la página 70 del texto."

PUNTO DE MÁXIMO CRITERIO (PMC): "Valor del eje x de un conjunto difuso que maximiza su función de pertenencia. Véase la página 130 del texto."

QM-IMPLICACIÓN DE EARLY-ZADEH: "Es uno de los principales modelos de QM-Implicaciones que se usan hoy día. Véase la página 119 del texto."

QM-IMPLICACIONES: "Implicaciones basadas en la mecánica cuántica. Véase la página 119 del texto."

RAZONAMIENTO APROXIMADO: "Razonamiento de informaciones cargadas de incertidumbre. Véase la página 113 del texto."

REGLA COMPOSICIONAL DE INFERENCIA: "Herramienta utilizada para traducir el Modus Ponens de la lógica clásica a la difusa. Véase la página 115 del texto."

REGLA CUATIFICADA EN EL ANTECEDENTE: "Proposición difusa con un cuantificador en el antecedente. Véase la página 99 del texto."

REGLA DE COMBINACIÓN: "Regla utilizada en el motor de inferencia. Agregación de todos los resultados individuales obtenidos de cada una de las reglas aplicadas. Véase la página 123 del texto."

REGLA DE INFERENCIA: "Conjunto de operaciones que relacionan a los antecedentes difusos para obtener los consecuentes. Véase la página 122 del texto."

REGLA DIFUSA: "Representación de la interpretación de una sentencia lingüística 'Si A-Entonces B'. Representa la relación causal entre las variables de estado del proceso y las variables de control. Véase la página 100 del texto."

REGLAS CON EXEPCIONES: "Son aquellas reglas que incluyen una excepción. Véase la página 102 del texto."

REGLAS CONFLICTIVAS: "Reglas potencialmente inconsistentes, que pueden generar problemas o malos resultados al presentar información contradictoria. Véase la página 104 del texto."

REGLAS DE CONTROL: "Operaciones realizadas por un experto para controlar un proceso, reglas difusas."

REGLAS DE CONTROL DIFUSO: "Conjunto de reglas de control obtenidas mediante el uso de los métodos de la lógica difusa."

REGLAS DE CONTROL DIFUSO PARA LA EVALUACIÓN DE OBJETOS: "Reglas obtenidas a partir de la experiencia de un operador experto. Véase la página 106 del texto."

REGLAS DE EVALUACIÓN DE ESTADO DEL PROCESO: "Son reglas que evalúan el estado del proceso en un intervalo de tiempo y computan una acción de control en función de sus variables lingüísticas. Véase la página 105 del texto."

REGLAS GRADUALES: "Son reglas que introducen proporcionalidad entre variable de control y de estado. Véase la página 103 del texto."

RELACIÓN BINARIA: "Relación difusa de dos dimensiones. Véase la página 70 del texto."

RELACIÓN CLÁSICA: "Conjunto de tuplas, puede ser descrita por una función característica. Véase la página 65 del texto."

RELACION DIFUSA: "Conjunto difuso de tuplas, cuya función característica es extendida al intervalo $[0,1]$. Véase la página 65 del texto."

RELACIÓN DIFUSA COMPUESTA: "Relación difusa obtenida al efectuar una Sup-t Composición o una Inf-s Composición entre dos relaciones difusas. Véase la página 69 del texto."

RELACIÓN TERCIARIA: "Relación difusa de tres dimensiones. Véase la página 70 del texto."

R-IMPLICACIÓN DE GÖDEL: "Modelo de R-implicación. Véase la página 118 del texto."

R-IMPLICACIÓN DE GÖGUEN: "Modelo de R-implicación. Véase la página 118 del texto."

R-IMPLICACIÓN DE RESCHER-GAINES: "Modelo de R-implicación. Véase la página 118 del texto."

R-IMPLICACIONES: "Implicaciones Residuales, formadas por una t-norma. Vease la página 118 del texto."

SENSOR: "Dispositivo encargado de medir el valor de una de las variables de un sistema. Véase la página 81 del texto."

SENTENCIA DIFUSA SI-ENTONCES (IF-THEN): "Sentencia del tipo 'Si A entonces B' que forma cada una de las reglas difusas, siendo A el antecedente y B el consecuente. Véase la página 100 del texto."

SEÑAL DE CONTROL: "Señal que produce un controlador difuso con la intención de minimizar la desviación. Véase la página 82 del texto."

SEÑAL DE ENTRADA DE REFERENCIA: "Es el valor que se desea obtener en un controlador. Véase la página 83 del texto."

SEÑAL DE SALIDA: "Es la respuesta que ofrece un controlador para ajustar el valor de la variable a controlar con el deseado. Véase la página 145 del texto."

SIMILITUD: "Función utilizada para la medida de distancias entre dos conjuntos difusos, es opuesta a la distancia. Véase la página 59 del texto."

S-IMPLICACIÓN DE DIENE: "Modelo de S-implicación. Véase la página 117 del texto."

S-IMPLICACIÓN DE LUKASIEWICZ: "Modelo de S-implicación. Véase la página 117 del texto."

S-IMPLICACIÓN DE MIZUMOTO: "Modelo de S-implicación. Véase la página 117 del texto."

S-IMPLICACIONES: "Implicaciones fuertes, por norma general se basan en el uso de una s-norma y una negación fuerte. Véase la página 117 del texto."

SINGLETON: "Conjunto difuso cuyo soporte está formado por un solo elemento."

SISTEMA: "Conjunto de procesos que se desarrollan para una tarea concreta. Véase la página 81 del texto."

SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO: "Sistema en el que la salida no afecta a la señal de control ni se tienen en cuenta los efectos de las perturbaciones sobre el sistema. Véase la página 81 del texto."

SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO: "Sistema de control realimentado, usa la diferencia entre la salida y la entrada de referencia como medio de control. Véase la página 81 del texto."

SISTEMA DIFUSO: "Sistema que se caracteriza por un conjunto de sentencias lingüísticas en el ámbito del conocimiento experto. Véase la página 95 del texto."

SISTEMA LÓGICO: "Sistema cuyas variables se relacionan mediante el uso de operadores lógicos (unión, intersección y negación)."

SISTEMAS EXPERTOS: "Son sistemas que emulan el comportamiento de un experto en un dominio concreto y en ocasiones son usados en lugar de estos."

S-NORMA: "Modelo genérico para la operación unión, cumple las propiedades de las conormas triangulares. Véase la página 52 del texto."

S-NORMA DEL MÁXIMO: "La función máximo es una s-norma que se corresponde con la operación unión en conjuntos clásicos. Véase la página 53 del texto."

SOPORTE: "Subconjunto difuso formados por los elementos de un universo de discurso cuyo grado de pertenencia al mismo sea mayor a cero. Véase la página 38 del texto."

SUMA DRÁSTICA: "La suma drástica es la mayor S-norma. Véase la página 54 del texto."

SUMA EXTENDIDA: "Extensión de la operación aritmética clásica al tratamiento de números difusos. Véase la página 78 del texto."

SUP-MIN COMPOSICIÓN: "Composición entre dos relaciones difusas en la que opera entre ellas la t-norma del mínimo. Véase la página 69 del texto."

SUP-T COMPOSICIÓN: "Composición entre dos relaciones difusas en la que opera entre ellas una t-norma. Véase la página 69 del texto."

T-CONORMA: "S-norma."

TEOREMA DE REPRESENTACIÓN: "El teorema de representación expresa que todo conjunto difuso puede ser obtenido a partir de la unión de todos sus alfa-cortes. Véase la página 42 del texto."

TEORÍA CLÁSICA DE CONTROL: "Control que trata los sistemas con una única entrada y salida o función de transferencia. Véase la página 80 del texto."

TEORÍA DE CONTROL MODERNA: "Control basado en el análisis, el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados. Véase la página 80 del texto."

TEORÍA DE LA PROBABILIDAD: "Rama de las matemáticas que se basa en la estadística para obtener con que grado una conclusión es posible."

T-NORMA: "Modelo genérico para la operación intersección, cumple las propiedades de las normas triangulares. Véase la página 52 del texto."

T-NORMA DEL MÍNIMO: "La función mínimo es una t-norma que se corresponde con la operación intersección en conjuntos clásicos. Véase la página 53 del texto."

TUPLA: "Par ordenado. Véase la página 65 del texto."

UNIÓN: "La unión de dos conjuntos difusos da como resultado otro conjunto difuso en el que para cada elemento del universo su grado de pertenencia será el mayor grado de pertenencia para ese elemento en los dos conjuntos iniciales. También se aplica a las relaciones difusas. Véase la página 51 del texto."

UNIVERSO DE DISCURSO: "Agrupación de elementos que pueden pertenecer a un conjunto difuso. Véase la página 15 del texto."

UNIVERSO DISCRETO (FINITO): "Es el universo de discurso de un conjunto difuso definido por pares de valores (valor, grado de pertenencia). Véase la página 66 del texto."

UNIVERSO INFITO: "Es el universo de discurso de un conjunto difuso definido por una función de pertenencia, se trata de un intervalo. Véase la página 16 del texto."

VALOR CRISP: "Conjunto difuso cuyo soporte y núcleo es un único valor."

VALOR DIFUSO: "Conjunto Difuso cuya función de pertenencia es del tipo triangular, es decir que el valor de máxima pertenencia se encuentra en un valor del centro del universo, no en los extremos. Véase la página 62 del texto."

VARIABLE CONTROLADA: "Cantidad o condición que se mide y controla. Véase la página 81 del texto."

VARIABLE DE CONTROL: "Variables controlada y manipulada."

VARIABLE DE ESTADO: "Variable con la que se mide directa o indirectamente la variable a controlar en un sistema de control automático. Variable de entrada."

VARIABLE DE MEDIDA DEL PROCESO (ESTADO): "Variable de salida."

VARIABLE FÍSICA: "Variable representada por un conjunto difuso."

VARIABLE LINGÜÍSTICA: "Etiqueta Lingüística."

VARIABLE MANIPULADA: "Cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Véase la página 81 del texto."

ZADEH: "Es el padre de la lógica difusa, fue el primero en referirse al termino conjunto difuso en la Revista científica 'Información and Control' en la que publicó su artículo 'Fuzzy

Sets' en 1965. Es el creador de gran parte de la teoría y la terminología sobre la materia, sobre la que posee una extensa bibliografía."

Conclusiones y Líneas Futuras

Para finalizar el proyecto se presenta un resumen de las principales conclusiones que se han obtenido de la elaboración del mismo.

En primer lugar, hemos de destacar el hecho de que se han satisfecho todos los objetivos inicialmente planteados para el proyecto y cómo a medida que este ha sido desarrollado se han visto ampliados.

Desde el punto de vista teórico se ha intentado realizar un desarrollo lo más claro posible de los principios de la lógica difusa y control difuso. Se han plasmado conceptos matemáticos, definiciones, principios... que permitan al alumno introducirse en el interior de un Controlador Difuso. Además en todo momento el alumno tiene disponibilidad de consultar referencias y términos que se puede encontrar durante el estudio de la materia de un modo accesible y rápido. Además, el alumno en todo momento puede examinarse de la materia y poder medir sus conocimientos de un modo objetivo y claro.

Uno de los pilares de este proyecto ha sido la elaboración de los dos ejemplos que permiten comprender el desarrollo de un Controlador Difuso y simular sistemas basados en lógica difusa. En el caso de la Simulación del Controlador Difuso para un Cruce de Semáforos es una herramienta útil para comprender los pasos necesarios para implementar un controlador Difuso en un Sistema, mientras que la Simulación del Controlador Difuso de un Invernadero es útil para comprender el funcionamiento interno de un Controlador Difuso y su reacción ante los cambios en el Sistema.

La aplicación ha sido desarrollada bajo un entorno lo más ameno posible de forma que permita un cómodo manejo de las distintas opciones implementadas. Este desarrollo ha sido realizado bajo el lenguaje Visual Basic, el cual permite elaborar una aplicación "relativamente" rápida aunque hemos de comentar que quizás hubiera sido mejor, dada la magnitud final de la aplicación, utilizar otra plataforma de desarrollo, sobre todo por las limitaciones de Visual Basic en el tratamiento de gráficos.

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.

Líneas Futuras

Software Didáctico para la Introducción al Control Difuso es una aplicación desarrollada con el objetivo de difundir la materia del Control Difuso entre los estudiantes, su desarrollo ha sido limitado, sobre todo por cuestiones de tiempo. Por lo que cabrían una gran variedad de mejoras que harían de esta aplicación una potente herramienta didáctica, entre otras se podrían implantar:

- Traducción de los contenidos a otros idiomas. SDICD ha sido desarrollado para la comprensión de la materia del Control Difuso en castellano, su implementación en otros idiomas (Inglés, Japonés o Chino principalmente), haría que el Control Difuso fuera una materia accesible a más del 80% de los estudiantes universitarios del mundo.
- Dotar a la aplicación informática de sonido, de tal modo que produjera una lectura total de los textos incluidos en la programación didáctica, así como explicaciones puntuales de algunos puntos que pudieran ser de difícil comprensión. Haciendo además esta aplicación accesible en cierto sentido para alumnos con algún tipo de minusvalía visual. Este punto se ha planteado durante la realización del presente Proyecto Fin de Carrera, pero finalmente se ha desestimado porque el desarrollo temporal del mismo se hubiera visto incrementado sensiblemente.
- El desarrollo de una única aplicación que uniera las ventajas de SDICD con las de SDC. Tras este desarrollo se obtendría una herramienta con un enorme potencial, debido a que encontraríamos en una única aplicación las ventajas de una formación en la materia con la del desarrollo libre de simulaciones en el ámbito del Control Difuso.
- Actualización de Contenidos. Hoy en día, la tecnología avanza al mismo ritmo que el tiempo, lo que hoy es novedad dentro de 5 años estará obsoleto. Probablemente en los próximos años surjan importantes avances en el Control Difuso, por lo que sería importante que SDICD contuviera los nuevos estudios y desarrollos que se produzcan en esta materia.

Referencias Bibliográficas

A continuación se muestra una serie de referencias bibliográficas, webs, o de otra clase que han sido usadas a lo largo de la redacción de esta memoria, están incluidas en el temario de SDICD o que simplemente se han introducido por haber sido consultadas del desarrollo de la aplicación y por su importancia dentro del mundo de la Lógica Difusa y el Control Difuso.

[ANSTROM84]

K. Astrom, B. Wittenmark, "**Computer Controlled Systems: Theory and Design**". Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.

[BEZDEK81]

J. Bezdek: "**Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms**". Plenum Press, New York, 1981.

[BUTNARIO93]

D. Butnario y E. P. Klement. Título: "**Triangular Norm-Based Measures and Games with Fuzzy Coalitions**". Dordrecht Kluwer Academic Publishers. 1993.

[CEBALLOS99]

Francisco J. Ceballos Sierra: "**Enciclopedia de Microsoft Visual Basic 6**". Ra-Ma. 1999.

[CASTRO91]

J. L. Castro. "**La Lógica en la Inteligencia Artificial**". Algunos aspectos del tratamiento de la información en inteligencia Artificial. Ed: Universidad de Granada, 1991.

[CEREZO00]

Alfonso J. García Cerezo, José Ruiz Gómez, Manuel de la Paz Moya: "**Controladores Borrosos**". Publicación Interna GCI-01, Departamento de Ingeniería de Sistema y Automática. Universidad de Málaga. 2000.

[CORDÓN94]

Oscar Cerdón García. "**Estudio de Sistema de Inferencia, Métodos de Defuzzificación y Métodos de Ajuste para un Controlador Difuso del Péndulo Invertido**". Proyecto desarrollado durante una Beca de Iniciación a la investigación. 1994.

[DELGADO91]

M. Delgado. "**Razonamiento Aproximado**". Algunos aspectos del tratamiento de la información en inteligencia Artificial. Ed: Universidad de Granada, 1991.

[DRIANKOV96]

D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank. "**An Introduction to Fuzzy Control**". Second Edition Springer, 1996. ISBN 3-540-60691-2.

[DUBOIS80]

D. Dubois, H. Prade. "**Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications**". Academic Press, NY, 1980.

[DUBOIS85]

D. Dubois, H. Prade. "**Fuzzy Number. An Overview, the Analisis of Fuzzy Information**". J.C. Bezdek CRS Press, Boca Raton F1. USA, 1985.

[DUBOIS88]

D. Dubois, H. Prade "**Possibility Theory. An Approach to Computerized Processing of Uncertainty**". Plenum Press, NY, 1988.

[DUBOIS91]

A. Dubois and H. Prade, "**Basic Issues on Fuzzy Rules and their Application to Fuzzy Control**". *Proceedings of the IJCAI-91 Workshop on Fuzzy Control*, Sydney, 1001, pp. 5-17, 1991.

[ESCOBAR03]

Calixto Escobar Rodríguez "**SOFTWARE PARA CONTROL DIFUSO DE TODO TIPO DE SISTEMAS (SCD): Aplicación al Control de Invernaderos Industriales.**" Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Málaga. 2003.

[GALINODO]

Dr. José Galindo G. "**Curso Introductorio de Conjuntos y Sistemas Difusos (Lógica Difusa y Aplicaciones)**". Universidad de Málaga (España) <http://www.lcc.uma.es/%7Epsc/FSS>

[GALINDO06]

J. Galindo, A. Urrutia, M. Piattini, "**Fuzzy Databases: Modeling, Design and Implementation**". Idea Group Publishing. Hershey, USA, 2006.

[GALINDO08]

J. Galindo (Editor), "**Handbook on Fuzzy Information Processing in Databases**". Information Science Reference (Idea Group Publishing). Hershey, USA, 2008.

[GREENWELL88]

M. Greenwell. "**Knowledge Engineering for Expert Systems**". Ellis Harwood, Chichester, 1988.

[HERRERA93]

F. Herrera, M. Lozano y J.L. Verdegay, "**Algoritmos Genéticos con Parámetros Reales**". V Congreso de la A. Española de Inteligencia Artificial, CAEPIA'93, pp. 41-50, 1993.

[KOSKO92]

Bart Kosko. "**Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence**". Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 1992.

[KOSKO94]

B. Kosko. "**Fuzzy Systems are Universal Approximators**". IEEE Trans. On Computers, 43(11), pp. 329-332, 1994.

[KRUSE94]

R. Kruse, J. Gebhardt and F. Klawonn, "**Foundations of Fuzzy Systems**". John Wiley & Sons, 1994. ISBN 0-471-94243X.

[LECTRIC]

Lectric law library. <http://www.lectlaw.com/def/e066.htm>.

[LEE90]

C. C. Lee. "**Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controllers**". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, nº 20, 1990, Part I pp. 404-435, Part II pp. 419-433, 1990.

[LOPEZ90]

R. López de Mántaras. "**Aproximate Reasoning Models**". Ed. Ellis Hordwoord, 1990.

[MANDANI75]

E.H. Mandani and S. Assilian. "**An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controler**". Int. J. Manchine Studies. Vol. 7, pp.1-13. 1975.

[MANDANI77]

E. Mamdani ,C. Pappis, "**A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Intersection**". IEEETrans. on Systems, Man and Cybernetics, SMC-7, pp. 707-717, 1977.

[MAGREZ89]

P. Magrez and P. Smets. "**Fuzzy Modus Ponens: A New Model Suitable for Applications in Knowledge-Based Systems**". International Journal of Intelligent Systems, Vol. 4, pp. 181-200, 1989.

[MCNEILL94]

F.M. McNeill and E. Thro, "**Fuzzy Logic: A practical approach**". AP professional, 1994. ISBN 0-12-485965-8.

[MENGER42]

K. Menger. "**Statistal Metric Spaces**". Proc. of the National Academy of Sciences 37, USA. 1942.

[MIZUMOTO87]

M. Mizumoto. "**Fuzzy Control under various Approximate Reasoning Methods**". Preprints of Second IFSA Congress, pp. 143-146, 1987.

[MOHMMD93]

J. Mohammd, N. Vadiie, T.J. Ross, Eds. **“Fuzzy Logic and Control. Software and Hardware Applications”**. Eaglewood Cliffs, NJ:PTR. Prentice Hall, 1993.

[NETWORK]

Intermedia Network S.L <http://www.canalvisualbasic.net/>

[NOMURA91]

H. Nomura, I. Hayashi and N. Wakami. **“A Self-Tuning methods of fuzzy control by descent methods”**. V IFSA Congress Vol Engineering. pp 135-138, 1991.

[OGATA03]

Ogata, Katsuhiko. **“Ingeniería de Control Moderna”** Ed: Prentice Hall, 2003.

[PETRY96]

F.E. Petry. **“Fuzzy Databases: Principles and Applications”** (with chapter contribution by Patrick Bosc). International Series in Intelligent Technologies. Ed. H.-J. Zimmermann. Kluwer Academic Publishers (KAP), 1996.

[PEDRYCZ98].

W. Pedrycz, F. Gomide. **“An introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design”**. A Bradford Book. The MIT Press, Massachusetts, 1998. ISBN 0-262-16171-0.

[RUSPINI98]

E. H. Ruspini and E. H. Mamdani. **“Why fuzzy logic?”**. In E. H. Ruspini, P. P. Bonissone and W. Pedrycz, editors, Handbook of fuzzy computation, pages A2.1:1-3. IOP Publishing, Bristol, 1998.

[SCHREIBER00]

G. Schreiber, H. Akkermans, A. Anjewierden, R. de Hoog, N. Shadbolt, W. van de Velde and B. Wielinga. **“Knowledge Engineering and Management: the CommonKADS methodlogoy”**. Mit press, Cambridge, MA, 2000.

[SKLAR83]

B. Schweizer, A. Sklar. **“Probabilistic Metric Spaces”**. North-Holland, 1983.

[TRILLAS79]

E. Trillas. **“Sobre Funciones de Negación en la Teoría de Conjuntos Difusos”**. Stochastica, Vol. 3 N° 1, pp. 47-59, 1979.

[TRILLAS85]

E. Trillas y L. Valverde. “**On Implication and Indistinguishability in the Setting of Fuzzy Logic**”. J. Kacprzyk, R. R. Yager, Eds., management Decision Support Systems Using Fuzzy Sets and Possibility Theory (Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1985), pp. 198-212.

[TURBAN95]

E. Turban. “**Decisión Support and Expert Systems**” Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.

[WELBANK83]

M. Welbank. “**A review of knowledge acquisition techniques for expert systems**”. Technical report, Martlesham Consultancy Services, Ipswich, UK, 1983.

[YAGER80]

R. R. Yager, “**On a General Class of Fuzzy Connectives**”. Fuzzy Sets and Systems, pp. 235-242, 1980.

[YAGER87]

R. R. Yager, S. Ovchinnikov et al.: “**Fuzzy Sets and Applications: Selected Pappes by L. A. Zadeh**”. Wiley Intersc., 1987.

[ZADEH65]

L. A. Zadeh, “**Fuzzy Sets**”. Information Control, 8, pp. 338-353, 1965.

[ZADEH73]

L. A. Zadeh. “**Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decisions processes**”. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 3: 28-44, 1973.

[ZADEH75]

L. A. Zadeh. “**The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Aproximate Reasoning**”. Information Sci., 8, pp. 199- 249, pp. 301-357, 9, pp. 43-80, 1975.

[ZADEH78]

L. A. Zadeh. “**Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility**”. Fuzzy Sets and Systems, 1, pp. 3-28, 1978.

[ZADEH89]

L. A. Zadeh. "**Knowledge Representation in Fuzzy Logic**". IEEE Trans. On Knowledge and Data Engineering, 11(1), pp. 89-100, 1989.

[ZADEH92]

L. A. Zadeh. "**Knowledge Representation in Fuzzy Logic**". "An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems". Cap. 1. Ed: Kluwer Academic Publisher, 1992.

[ZADEH94]

L. A. Zadeh. "**Fuzzy Logic, Neural Networks and Soft Computing**". Communications of the ACM, 37(3), pp. 77-84, 1994.