



GRADO EN MATEMÁTICA COMPUTACIONAL

PRÁCTICAS EXTERNAS

Y

PROYECTO DE FINAL DE GRADO

---

**Conjuntos difusos: aplicación al control de  
procesos.**

---

*Autor:*  
Ignacio VICENT SALVADOR

*Supervisor:*  
David SÁEZ BAIXAULI  
*Tutor académico:*  
Juan José FONT FERRANDIS

Fecha de lectura: 27 de Octubre de 2014  
Curso académico 2013/2014



PRÁCTICAS EXTERNAS:

HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARIO DE  
CASTELLÓN

Y

ESCUELA DE ENFERMERÍA NUESTRA  
SEÑORA DEL SAGRADO CORAZÓN

Supervisor: David Sáez Baixauli

## **Resumen**

Este documento pretende servir como guía para entender las actividades realizadas durante la estancia en prácticas.

## **Palabras clave**

LifeRay y PHP.

## **Keywords**

LifeRay and PHP.

# Índice general

<b>1. Identificación de las Prácticas</b>	<b>3</b>
1.1. Datos del Alumno . . . . .	3
1.2. Datos de la Empresa . . . . .	3
1.3. Horario y calendario de Prácticas . . . . .	3
<b>2. Información general de la empresa</b>	<b>4</b>
2.1. Razón Social . . . . .	4
2.2. Actividad de la Empresa . . . . .	4
2.3. Área y departamento de prácticas . . . . .	4
2.4. Infraestructura y medios materiales . . . . .	4
<b>3. Actividades desarrolladas</b>	<b>5</b>
3.1. Objetivos generales . . . . .	5
3.2. Plan de trabajo a largo plazo . . . . .	5
3.3. Plan de trabajo a corto plazo . . . . .	6
3.4. Plan de trabajo diario . . . . .	6
<b>A. Manual del programa <i>LifeRay</i></b>	<b>8</b>
<b>B. Certificado</b>	<b>9</b>



# Capítulo 1

## Identificación de las Prácticas

### 1.1. Datos del Alumno

Apellidos y nombre: Vicent Salvador Ignacio  
DNI: 20482764E  
Dirección: Calle Desierto de las Palmas, N.º 3 Esc1 1B. 12006 Castellón.  
Teléfono: 684-00-34-69.  
E-mail: al188417@uji.es

### 1.2. Datos de la Empresa

Razón Social: Hospital General Universitario de Castellón  
Dirección: Avgda. Benicasim 12004 Castellón  
Teléfonos: 964-72-65-00 y 964-72-66-61.  
Fax: 964-25-23-45  
Tutor en la empresa: David Sáez Baixauli  
Cargo en la empresa: Jefe del departamento de Informática  
E-mail: saez.dav@dva.es

### 1.3. Horario y calendario de Prácticas

Horario: De 8 a 13:30 horas y los viernes de 8 a 15 horas.  
Días de la semana: De lunes a viernes.  
Fecha de inicio: 4 de Febrero de 2014.  
Fecha de finalización: 16 de Abril de 2014.  
Total de días: 49.  
Total de horas: 290.

## Capítulo 2

# Información general de la empresa

### 2.1. Razón Social

Razón Social: Hospital General Universitario de Castellón

### 2.2. Actividad de la Empresa

El Hospital General Universitario de Castellón es el principal centro de referencia del Departamento de Salud de Castellón. Con sus casi 600 camas, dispone de prácticamente la totalidad de especialidades médico-quirúrgicas accesibles en la sanidad pública.

La misión del Departamento de Salud de Castellón es prestar la atención sanitaria integral que precisan los pacientes, en el ámbito de la atención primaria y especializada, garantizando la continuidad asistencial de manera eficiente en el uso de los recursos disponibles, segura y de calidad. Así como, la docencia pre y postgrado en el ámbito de las Ciencias de la Salud, la formación continua y la investigación de los profesionales de la Sanidad.

### 2.3. Área y departamento de prácticas

Las prácticas las desarrollé dentro de el departamento de Informática. Concretamente en el departamento de Analista-Programador.

### 2.4. Infraestructura y medios materiales

Para el desarrollo de las prácticas, la empresa me asignó una mesa con ordenador conectado a dos pantallas, a internet, acceso al programa de creación de páginas web (*LifeRay*) y a los datos necesarios para la creación de la misma. En mi zona de trabajo tenía a mi disposición otros elementos como fotocopiadora y fax.



## Capítulo 3

# Actividades desarrolladas

### 3.1. Objetivos generales

- El Objetivo general era implantar un nuevo portal web para el *Hospital Universitario General de Castellón* y para la Escuela de Enfermería *Nuestra Señora del Sagrado Corazón* (anexa al *Hospital Universitario General de Castellón*), dependiente de la *Consellería de Sanidad* y adscrita a la *Universidad de Valencia*, para substituir el actual mediante la plataforma *LifeRay* y *HTML*. *LifeRay* es un portal de gestión de contenidos de código abierto escrito en Java, el cual incluye un sistema de gestión integrado de contenidos web que permite a los usuarios crear sitios web y portales de forma sencilla.
- Configurar y modificar la estructura del portal para adecuarla a las necesidades propias del *Hospital Universitario General de Castellón* y de la Escuela de Enfermería.
- Elaborar un manual de usuario para mantener actualizado el diseño y los contenidos web y formar a las secretarias de la Escuela de Enfermería para que sean capaces de actualizar la web.
- Modificar un programa en *PHP* para poder dar de alta a nuevos usuarios. *PHP* es un lenguaje de programación de código abierto muy popular especialmente adecuado para el desarrollo web y que puede ser incrustado en *HTML*.

### 3.2. Plan de trabajo a largo plazo

Los objetivos anteriores se plasmaron en un plan de trabajo a largo plazo con los siguientes puntos:

1. Conocimiento del programa *LifeRay*.
2. Creación de una nueva página web *Nuestra Señora del Sagrado Corazón* .
3. Creación de una nueva página web *Hospital Universitario General de Castellón*.
4. Configuración y modificación de la estructura del portal para adecuarla a las necesidades requeridas.
5. Confección de un manual para la utilización de la plataforma *LifeRay* y formación a las secretarias de la Escuela de Enfermería.

6. Adquirir conocimientos sobre *PHP*.
7. Modificación del programa en *PHP* para gestionar las altas de personal.
8. Implantación y comprobación del programa en *PHP*.

### 3.3. Plan de trabajo a corto plazo

Lo anterior se concretó en una serie de actividades que en el transcurso del tiempo de las prácticas se desarrollaron en el siguiente orden:

1. Estudio del programa *LifeRay* y *HTML* mediante tutoriales proporcionados por el supervisor de las prácticas.
2. Contacto vía e-mail y en reuniones con la Directora de la Escuela de Enfermería *Nuestra Señora del Sagrado Corazón*, D. Juliana García-Carpintero Susmozas, para concretar la información a poner en la nueva página web.
3. Contacto vía e-mail y en reuniones con el responsable del Gabinete de Comunicación D. Pablo Sendra Abellaneda, para realizar el diseño de la página web del *Hospital Universitario General de Castellón* y su contenido.
4. Confección del manual para la utilización de la plataforma *LifeRay* y formación a las secretarías de la Escuela de Enfermería.
5. Estudio del programa para gestionar las altas de personal disponible en *PHP*.
6. Contacto vía e-mail y en reuniones con el tutor para la modificación del programa.
7. Implantación del programa y comprobación de su correcto funcionamiento.

### 3.4. Plan de trabajo diario

La secuencia de trabajo a lo largo de los 49 días que duraron las prácticas en la empresa fue la siguiente:

**Días 1 al 3.** Búsqueda y estudio de manuales para la utilización de *HTML* y de la plataforma *LifeRay*.

**Días 4 al 11.** Realización de una primera versión de la página web de la Escuela de Enfermería, traducción de la misma al Valenciano y creación de los iconos.

**Días 12 al 18.** Realización de una primera versión de la página web del Hospital y corrección de los fallos detectados en la web de la Escuela de Enfermería.

**Días 19 y 20.** Buscar información acerca de la creación de foros e implantación en la web de la Escuela de Enfermería.

**Días 21 al 30.** Acabar la página web del Hospital y comienzo de la redacción del manual.

**Días 31 al 35.** Entrega del manual definitivo y explicación del funcionamiento de la plataforma *LifeRay* al tutor, a la directora de la Escuela de Enfermería y al responsable del Gabinete de Comunicación.

**Día 36.** Formación a las secretarias de la Escuela de Enfermería para que sean capaces de actualizar la plataforma web.

**Día 37.** Búsqueda y estudio de manuales e información sobre *PHP*.

**Días 38 al 47.** Modificación del programa para dar de alta a los usuarios.

**Días 48 y 49.** Implantación del programa y comprobación de su correcto funcionamiento.

## Anexo A

# Manual del programa *LifeRay*

Manual del programa *LifeRay*. Disponible en el siguiente enlace [https://www.dropbox.com/s/a0kyuraj9vxgoc0/2014%20manual%20web\\_v3.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/a0kyuraj9vxgoc0/2014%20manual%20web_v3.pdf?dl=0)

## Anexo B

# Certificado

Certificado expedido por la directora de la Escuela de Enfermería.

GENERALITAT VALENCIANA  
CONSELLERIA DE SANITAT  
UNIVERSITAT DE VALÈNCIA  
ESCOLA D'INFERMERIA  
"Ntra. Sra. Sgdo. Corazón" - CASTELLÓ

JULIANA GARCÍA-CARPINTERO SUSMOZAS, DIRECTORA DE LA ESCUELA DE ENFERMERÍA "NUESTRA SEÑORA DEL SAGRADO CORAZÓN" DE CASTELLÓN,

CERTIFICA:

Que D. IGNACIO VICENT SALVADOR ha colaborado en el "**DISEÑO Y DESARROLLO**" de la actualización de la pagina Web de esta Escuela (anexa al Hospital Universitario General de Castellón), dependiente de la Consellería de Sanitat y adscrita a la Universidad de Valencia, durante las prácticas correspondientes a la titulación "Grado en Matemática Computacional" de la UJI, tuteladas por D. David Sáez Baixauli.

Y para que conste a los efectos oportunos, se expide este certificado en Castellón a dieciséis de abril de dos mil catorce.



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Juliana", written over a circular scribble.



PROYECTO DE FINAL DE GRADO

CONJUNTOS DIFUSOS:  
APLICACIÓN AL CONTROL DE PROCESOS

Tutor: Juan José Font Ferrandis

## **Resumen**

Este documento pretende servir como guía para entender los conjuntos difusos y cómo se pueden aplicar al control de procesos.

## **Palabras clave**

Conjunto difuso, controlador difuso, variables lingüísticas y funciones de pertenencia.

## **Keywords**

Fuzzy set, fuzzy controller, linguistic variables and membership functions.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
<b>2. Conjuntos Difusos</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción . . . . .	7
2.2. Funciones de pertenencia . . . . .	10
2.3. Operaciones básicas con conjuntos difusos . . . . .	11
2.4. Variables lingüísticas . . . . .	12
<b>3. Controlador Difuso</b>	<b>15</b>
3.1. Introducción . . . . .	15
3.2. Ejemplos de actuación de Controladores Difusos . . . . .	20
3.3. Ventajas del Control Difuso . . . . .	27
3.4. Desventajas del Control Difuso . . . . .	29
<b>4. Conclusiones</b>	<b>31</b>



# Capítulo 1

## Introducción

Existen datos que no tienen una definición precisa, como por ejemplo, “ser joven“, “temperatura alta“, “estatura media“, “estar cerca de“, etc. Para solucionar estos problemas aparecen los conjuntos difusos, como una extensión de los conjuntos clásicos, mediante los cuales podemos manipular información que tiene un alto grado de incertidumbre. Las bases de los conjuntos difusos (o borrosos) fueron presentados en 1965 por el profesor Lofti Zadeh de la Universidad de California, en Berkeley, con un artículo titulado “Fuzzy Sets”. En este artículo Zadeh presenta unos conjuntos sin límites precisos, los cuales, según él, juegan un papel importante en el reconocimiento de formas, interpretación de significados, y especialmente en la abstracción, la esencia del proceso del razonamiento humano.

Como se ha comentado, los conjuntos difusos son una generalización de los conjuntos clásicos que nos permiten describir nociones imprecisas. De este modo, la pertenencia de un elemento a un conjunto pasa a ser cuantificada mediante un “grado de pertenencia“. Dicho grado toma un valor en el intervalo  $[0,1]$ ; si este grado toma el valor 0 significa que el elemento no pertenece al conjunto, si es 1 pertenece al conjunto y si es otro valor del intervalo  $(0,1)$ , pertenece con cierto grado al conjunto. En lugar del intervalo  $[0,1]$ , también se suelen considerar otros conjuntos ordenados más generales, como cadenas, retículos (completos), multiretículos, etc. Actualmente, los conjuntos difusos se utilizan en multitud de campos, tanto en ciencias de la computación para recuperación de información, control difuso, etc, como en ecuaciones diferenciales difusas, B-splines difusos, etc.

Cuando la teoría de los conjuntos difusos se aplica para definir y resolver problemas de control se obtienen los denominados controladores difusos o lingüísticos. El control difuso fue la primera aplicación de la lógica difusa a la resolución de problemas reales (se aplicó al control de una planta de cemento en el año 1980). En el área del control, la lógica difusa ha permitido obtener resultados espectaculares, resultados que han avalado la teoría.

En esencia un controlador lógico difuso contiene un algoritmo que es capaz de convertir una estrategia de control lingüística en una estrategia de control automático. Con la lógica difusa se pueden diseñar aplicaciones para que las máquinas respondan con mayor inteligencia a la imprecisión y a las condiciones del mundo exterior, con lo que se busca imitar el comportamiento humano.

La Lógica Difusa es una lógica de múltiples valores, que permite que sean definidos los valores intermedios entre las evaluaciones convencionales como: verdadero o falso, sí o no, alto o bajo, etc. Nociones como “más alto“ o “muy rápido“ pueden ser formuladas matemáticamente y procesadas por computadoras a fin de aplicar una forma de “pensamiento humano“ a la programación de computadores.

En los últimos años la Lógica Difusa se ha utilizado en distintos tipos de instrumentos, máquinas y en diversos ámbitos de la vida cotidiana. Algunos casos, por ejemplo, son los estabilizadores de imágenes en grabadoras de vídeo, controladores de ascensores e ingeniería de terremotos, los tensiómetros que se pueden adquirir en cualquier farmacia utilizan la lógica difusa para dar un diagnóstico sobre la presión arterial de un paciente, esto es, aplican razonamientos similares al que tendría un médico para decidir si el paciente se encuentra en mejor o peor estado. Este es tan sólo un pequeño ejemplo de las múltiples aplicaciones que tiene la lógica difusa en la medicina y que, en muchas ocasiones, puede salvar vidas. También se ha usado esta técnica en la industria, obteniéndose excelentes resultados, como en el caso del metro de Sendai en Japón, ya que permitía que el metro arrancara y frenara con gran suavidad, sin producir alteraciones entre los pasajeros.

Si dividimos todo lo que se ha conseguido gracias a la Lógica Difusa, podemos hacer tres grupos:

- **Productos creados para el consumidor:** Lavadoras difusas, hornos microondas (establece y afina la energía y el programa de cocción), sistemas térmicos, traductores lingüísticos, cámaras de vídeo, televisores, estabilizadores de imágenes digitales y sistemas de foco automático en cámaras fotográficas.
- **Sistemas:** Ascensores (reduce el tiempo de espera a partir del número de personas), trenes, automóviles (como puede ser la transmisión, frenos y mejora de la eficiencia del uso del combustible en motores), controles de tráfico, sistemas de control de acondicionadores de aire que evitan las oscilaciones de temperatura y sistemas de reconocimiento de escritura.
- **Software:** Diagnóstico médico, seguridad, comprensión de datos, tecnología informática y bases de datos difusas para almacenar y consultar información imprecisa (uso del lenguaje Fuzzy Structured Query Language).

## Capítulo 2

# Conjuntos Difusos

### 2.1. Introducción

Sabemos que un conjunto es una colección de objetos bien especificados que poseen una propiedad común. Recordemos que se puede definir de diversas formas:

- Por enumeración de los elementos que lo componen. Para un conjunto  $E$  finito, de  $n$  elementos, tendríamos, por ejemplo, la siguiente representación:  $E = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ .
- Por descripción analítica de una propiedad que caracterice a todos los miembros del conjunto. Por ejemplo,  $A = \{x \in \mathbb{R} | x \leq 7\}$ .
- Usando la función característica (también llamada función de pertenencia) para definir sus elementos. Si llamamos  $m_A : U \rightarrow \{0, 1\}$  a dicha función de pertenencia, siendo  $U$  el conjunto universal, tendremos que,

$$m_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

Así, un conjunto  $A$  está completamente definido por el conjunto de pares:

$$A = \{(x, m_A(x)) : x \in U, m_A(x) \in \{0, 1\}\}.$$

Es decir, si la función de pertenencia para un valor dado de  $x$  toma el valor 1, ese valor es un elemento del conjunto; por el contrario, si toma el valor cero, no pertenece al conjunto.

**Ejemplo 1:** Si  $E = \{a, e, i, o, u\}$  es el conjunto de las vocales del alfabeto y  $A = \{a, i, u\}$  un subconjunto del mismo, podríamos representarlos en la siguiente forma:

$$E = \{(a, 1), (e, 1), (i, 1), (o, 1), (u, 1)\}$$

$$A = \{(a, 1), (e, 0), (i, 1), (o, 0), (u, 1)\}$$

Para un conjunto difuso, sin embargo, la cuestión de pertenencia de un elemento al conjunto no es cuestión de todo o nada, sino que hay diferentes grados de pertenencia. La función de pertenencia puede tomar cualquier valor en el intervalo real  $[0,1]$ .

**Definición 1.** Se define *Universo de Discurso* como el conjunto  $X$  de posibles valores que puede tomar la variable  $x$ .

**Definición 2.** La *función de pertenencia*  $m_A(x)$  de un conjunto difuso  $A$  es una función:

$$m_A : X \rightarrow [0, 1],$$

quedando perfectamente definido un conjunto difuso  $A$  como sigue:

$$A = \{(x, m_A(x)) : x \in U, m_A(x) \in [0, 1]\}$$

Así, cualquier elemento  $x$  en  $X$  tiene grado de pertenencia  $m_A(x) \in [0, 1]$ .

**Ejemplo 2:** Supóngase que alguien quiere describir la clase de *animales terrestres veloces*. Algunos animales pertenecen definitivamente a esta clase, como el guepardo ó la gacela, mientras otros, como la tortuga o la araña, no pertenecen. Pero existe otro grupo de animales para los que es difícil determinar si son veloces o no. Utilizando notación difusa, el conjunto difuso para los animales *veloces* sería

$$\{(Guepardo, 1), (Avestruz, 0,9), (Liebre, 0,8), (Gacela, 0,7), (Gato, 0,4), \dots\}$$

es decir, la liebre pertenece con grado de 0.8 a la clase de animales *veloces*, la gacela con grado de 0.7 y el gato con grado de 0.4.

Si se supone que  $C$  es un conjunto clásico finito  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , entonces una notación alternativa es

$$C = x_1 + x_2 + \dots + x_n$$

siendo  $+$  una enumeración. A partir de ella, Zadeh propuso una notación más conveniente para conjuntos difusos. Así, otra forma de escribir el conjunto de los animales *veloces* del ejemplo 1 sería:

$$1/Guepardo + 0,9/Avestruz + 0,8/Liebre + 0,7/Gacela + 0,4/Gato$$

Es decir, se puede describir el conjunto difuso como sigue:

$$A = \frac{m_A(x_1)}{x_1} + \frac{m_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{m_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{m_A(x_i)}{x_i}$$

donde el símbolo de división no es más que un separador de los conjuntos de cada par, y el sumatorio es la operación de unión entre todos los elementos del conjunto. Cuando  $X$  es incontable o es continuo, se describe la ecuación anterior como:

$$A = \int_X \frac{m_A(x)}{x}$$

**Ejemplo 3:** La figura 2.1 muestra algunos conjuntos difusos definidos en el universo de discurso Edad. Concretamente, se representan las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos “joven“, “maduro“, “viejo“.

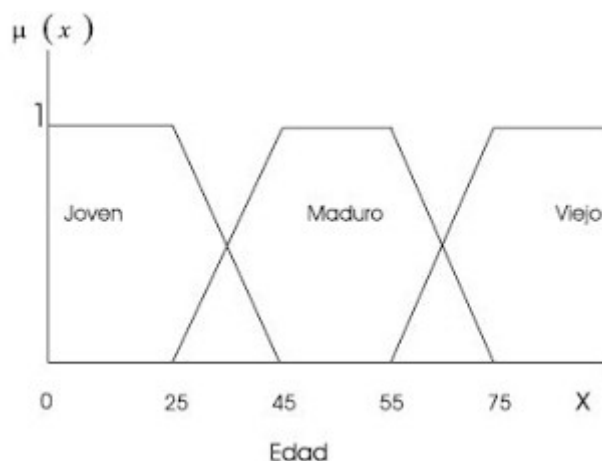


Figura 2.1: Ejemplo de conjuntos difusos

Se puede ver que los conjuntos difusos se superponen, de manera que un individuo podría tener un grado de pertenencia en dos conjuntos: “joven” y “maduro”, indicando que posee cualidades asociadas a ambos conjuntos. Por ejemplo, una persona con 35 años tiene un grado de pertenencia 0.5 para el conjunto “joven” y 0.5 para el conjunto “maduro”.

Algunas definiciones relacionadas con los conjuntos difusos son:

**Definición 3.** El *soporte* de un conjunto difuso  $A$  es el conjunto clásico que contiene todos los elementos de  $A$  cuyos grados de pertenencia no son cero. Esto se define por  $S(A)$ . Es decir:

$$S(A) = \{x \in X | m_A(x) > 0\}$$

**Definición 4.** Un conjunto difuso  $A$  es *convexo* si y sólo si  $X$  es *convexo* y

$$\forall x, y \in X, \forall \alpha \in [0, 1] / m_A(\alpha x + (1 - \alpha)y) \geq \min(m_A(x), m_A(y)).$$

En la teoría de control difuso, es usual tratar sólo con conjuntos difusos *convexos*.

**Definición 5.** Se define la *altura* de un conjunto difuso  $A$  sobre  $X$ , que se denota por  $Alt(A)$ , como:

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

**Definición 6.** Dado un número  $\alpha \in [0, 1]$  y un conjunto difuso  $A$ , definimos el  $\alpha$ -*corte* de  $A$  como el conjunto clásico  $A_\alpha$  que tiene la siguiente función de pertenencia:

$$m_{A_\alpha}(x) = \begin{cases} 1 & \text{cuando } m_A(x) \geq \alpha \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

En definitiva, el  $\alpha$ -*corte* se compone de aquellos elementos cuyo grado de pertenencia supera o iguala el umbral  $\alpha$ .

## 2.2. Funciones de pertenencia

Existe una gran variedad de formas para las funciones de pertenencia asociadas a un conjunto difuso. Las más comunes son las siguientes:

### 1. Forma Singleton

$$A(x) = \begin{cases} 1 & \text{cuando } x = a \\ 0 & \text{cuando } x \neq a \end{cases}$$

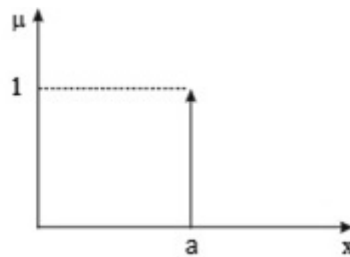


Figura 2.2: Ejemplo Forma Singleton

### 2. Forma Triangular

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

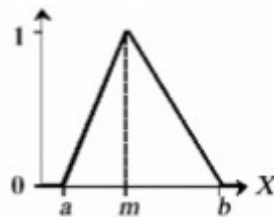


Figura 2.3: Ejemplo Forma Triangular

### 3. Forma S

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



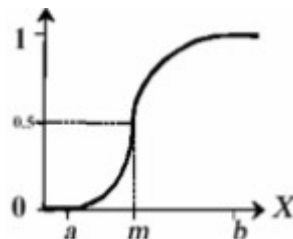


Figura 2.4: Ejemplo Forma S

## 4. Forma Trapezoidal

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

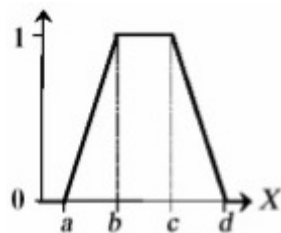


Figura 2.5: Ejemplo Forma Trapezoidal

## 2.3. Operaciones básicas con conjuntos difusos

Las operaciones más usadas en el contexto de los conjuntos difusos son las siguientes:

- Diremos que un conjunto  $A$  es un *subconjunto* difuso de  $B$ , es decir,  $A \subseteq B$ , si

$$\forall x \in U : m_A(x) \leq m_B(x),$$

y si existe, al menos, un punto  $x \in U$  tal que  $m_A(x) \neq m_B(x)$ , entonces escribiremos que  $A \subset B$ .

- *Intersección*: La intersección de dos conjuntos,  $A$  y  $B$ , tiene la siguiente función de pertenencia:

$$m_{A \cap B}(x) = \text{mín}\{m_A(x), m_B(x)\}$$

- *Unión*: La unión de dos conjuntos difusos,  $A$  y  $B$ , tiene la siguiente función de pertenencia:

$$m_{A \cup B}(x) = \text{máx}\{m_A(x), m_B(x)\}$$

- *Negación*: La negación de  $A$  se denota por  $\bar{A}$ , y tiene la siguiente función de pertenencia:

$$m_{\bar{A}}(x) = 1 - m_A(x)$$

**Ejemplo 5:** En la figura 2.6 se observa un trapecio difuso  $A$  entre 5 y 8 (rojo), un triángulo difuso  $B$  entorno al 4 (verde) y la intersección de ambos conjuntos difusos (el resultado es la línea de color azul):

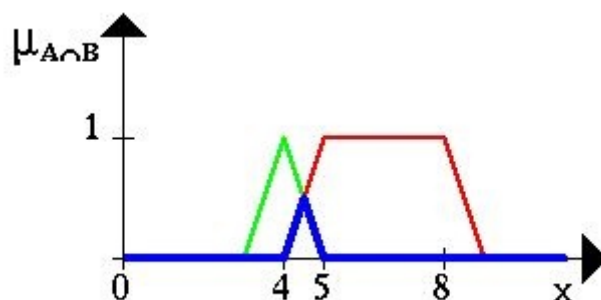


Figura 2.6: Ejemplo de Intersección

La figura 2.7 muestra la unión de ambos conjuntos difusos (el resultado es la línea de color azul):

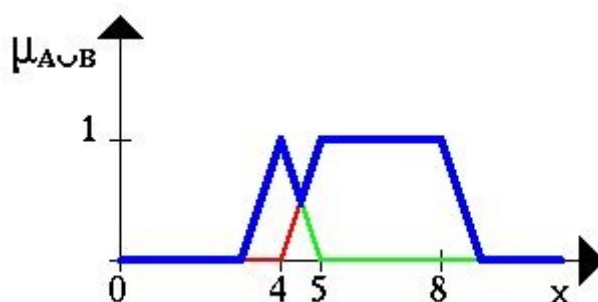


Figura 2.7: Ejemplo de Unión

La figura 2.8 muestra la negación del conjunto difuso  $A$  (el resultado es la línea de color azul):

## 2.4. Variables lingüísticas

Una variable lingüística, como su nombre sugiere, es una variable cuyos valores son palabras o sentencias en un lenguaje natural o sintético (no números). Por ejemplo, *Velocidad* es una

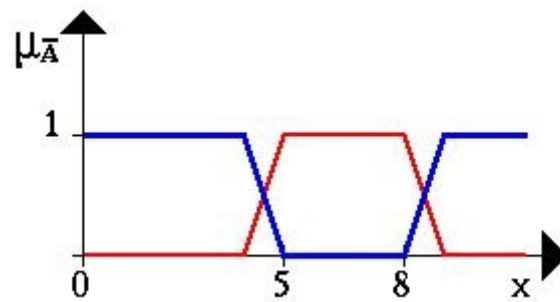
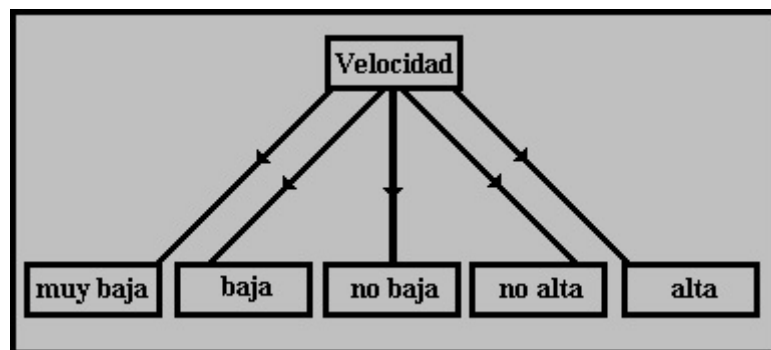


Figura 2.8: Ejemplo de Negación

variable lingüística cuyos valores pueden ser “alta“, “no alta“, “baja“, “no baja“ y “muy baja“ (ver Figura 2.9). Si disponemos de un valor concreto de velocidad, lo podríamos representar mediante un punto en el conjunto, mientras que una etiqueta lingüística es una colección de puntos (velocidades posibles).

Figura 2.9: Valores lingüísticos de la variable difusa *Velocidad*.

Cada valor de una variable lingüística representa un conjunto difuso en un universo determinado como se muestra en la figura 2.10.

Estrictamente, una variable lingüística esto formada por cinco partes ( $v$ ,  $T(v)$ ,  $U$ ,  $G$ ,  $M$ ) donde:

- $v$ : nombre de la variable.
- $T(v)$ : conjunto de términos o valores lingüísticos de  $v$ .
- $U$ : universo de discurso donde se define  $T(v)$ .
- $G$ : regla sintáctica para generar los términos lingüísticos de  $v$ .
- $M$ : regla semántica para asociar cada valor a su significado.

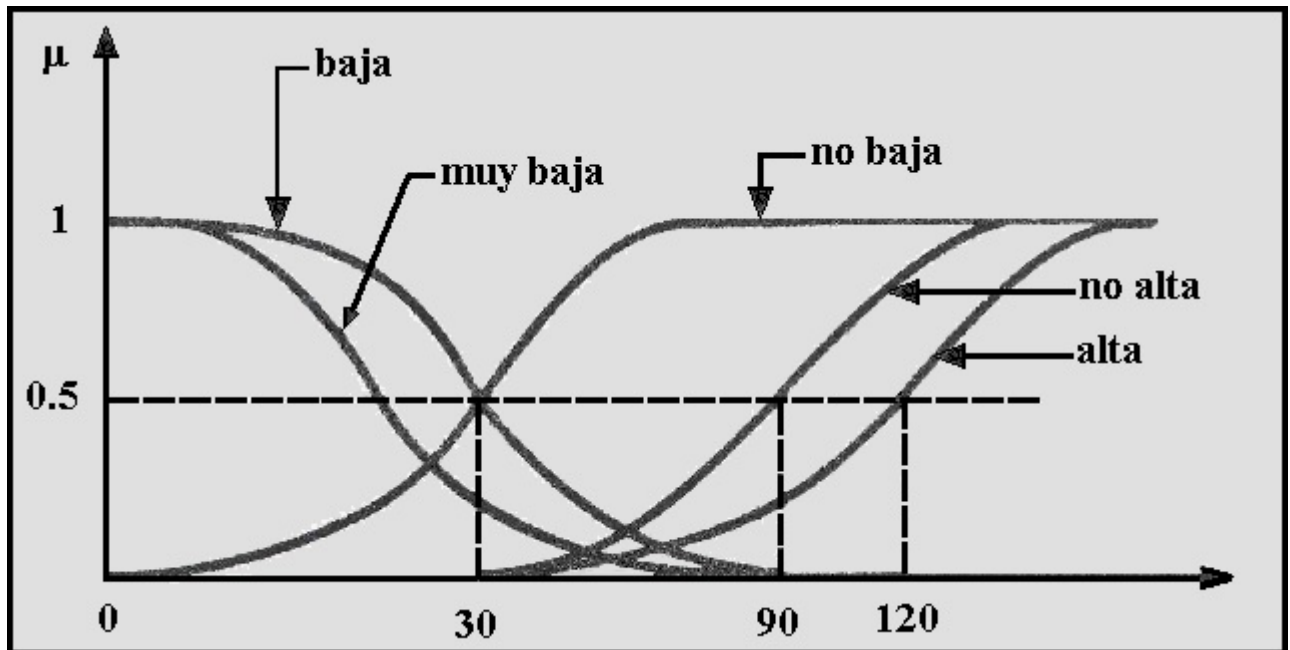


Figura 2.10: Conjuntos difusos de la variable lingüística *Velocidad* con sus correspondientes funciones de pertenencia.

Por ejemplo, *Velocidad* se puede considerar una variable lingüística  $v$ . El conjunto de términos lingüísticos (partición difusa de su universo) es:

$$T(\text{Velocidad}) = \{\text{muy alta, alta, no alta, lento, muy lento}\}$$

Cada término en  $T(\text{Velocidad})$  está caracterizado por un conjunto difuso en el universo de discurso  $U=[0,200]$  km/h. La regla sintáctica (G) determina el orden de las palabras de los términos lingüísticos de *Velocidad*. Por ejemplo *no* y *muy* son modificadores que preceden al término primario *alta* y que sirven para distinguir un término lingüístico del otro. La regla semántica (M) asocia cada término lingüístico con su significado: *alta* es alrededor de 180 km/h, y *baja* es alrededor de 30 km/h, etc.

## Capítulo 3

# Controlador Difuso

### 3.1. Introducción

Un controlador es un dispositivo cuya función es hacer que se cumpla algún objetivo planteado en una planta o proceso. Existen distintos métodos para lograr los objetivos de control. Aquí nos centraremos en el control realimentado por ser muy robusto y simple. Demanda poco conocimiento del proceso por parte del ingeniero de control y es el más ampliamente aplicado de todos los métodos. Un sistema de control retroalimentado es aquel que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control.

**Ejemplo 1.** Sistema de control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se mantiene en un nivel confortable independientemente de las condiciones externas.

El objetivo del controlador con lógica difusa es resolver problemas complejos de control a partir de soluciones simples o más simples que otras, convirtiéndose estas en la base de conocimiento requerida. Este tipo de controlador en ningún caso intenta desplazar a las técnicas tradicionales de control. De hecho se debe emplear control difuso cuando otras herramientas más simples no solucionen el problema de control de manera satisfactoria.

El interés por usar este tipo de controladores es la búsqueda de reducción de costos y mejoras en las prestaciones en los diversos procesos involucrados en una industria. Otro argumento válido para la implementación de controladores difusos es que responden de mejor manera que los controladores lineales ante la variación de parámetros, no linealidades, perturbaciones, tiempos muertos, etc.

Un controlador difuso (véase Figura 3.1) está constituido por 4 principales componentes: base de conocimientos, sistemas de codificación, sistemas de inferencia y sistemas de decodificación. Dicha estructura fue desarrollada por Lee en 1990 ([4]).



Figura 3.1: Estructura general de un controlador difuso.

1. **Base de Conocimientos.** Esta formada por una base de datos y un conjunto de reglas difusas (que suelen presentarse en forma de tabla, como veremos en la siguiente sección). Las reglas difusas toman habitualmente la siguiente forma:

IF [el error es pequeño y su cambio es pequeño] THEN [el esfuerzo es pequeño],

donde la primera parte de la regla se conoce como antecedente: [el error es pequeño y su cambio es pequeño] y la segunda consecuente: [el esfuerzo es pequeño]. La base de conocimientos debe cumplir con dos objetivos fundamentales: el primero es proveer las definiciones necesarias para determinar las reglas lingüísticas de control y la manipulación de los datos difusos del controlador, y la segunda almacenar los objetivos y política de control. Para el diseño de la base de conocimiento el conjunto de variables lingüísticas seleccionadas debe escogerse de forma tal que describan muy bien a los parámetros de control del proceso. Tanto los parámetros de entrada como los de salida deben definirse en esta etapa empleando terminología apropiada. La selección del rango de valores para cada término de las variables de entrada/salida es muy importante para lograr la “suavidad” del control.

La base de conocimientos se elabora tomando en cuenta la descripción lingüística de los parámetros. Para ello se sugieren tres métodos:

- Experiencia y conocimiento de un operador humano: La base de reglas se determina a partir de entrevistas con el operador o a través del conocimiento de la dinámica del proceso:
- Modelado del proceso. Los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de datos de entrada y salida del proceso.
- Auto-sintonización: Es una técnica de aprendizaje que permite que las reglas se vayan ajustando de acuerdo al desempeño observado.

De los métodos anteriores, el primero es el más utilizado.

2. **Codificación.** Bloque en el que cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se han considerado previamente. Las entradas a este bloque son valores concretos (nítidos) de las variables de entrada y las salidas son los grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados.

**Ejemplo 2.** Disponemos de la variable lingüística de entrada *Temperatura* y dos conjuntos difusos asociados: *Baja* y *Normal*. Queremos codificar la variable de entrada *Temperatura*

cuando su valor es de 19.5 °C. Para ello representamos ese valor en el gráfico de los conjuntos difusos y vemos qué grado de pertenencia tiene a cada uno de ellos, como se muestra en la Figura 3.2:

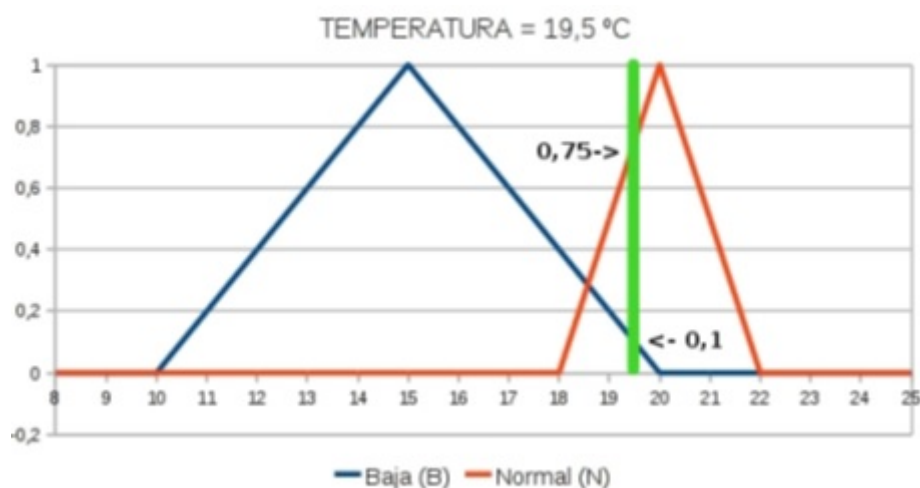


Figura 3.2: Gráfico de codificación de la temperatura

Se observa que el valor  $Temperatura=19.5$  °C tiene un grado de pertenencia de 0.75 al conjunto difuso *Normal* y de 0.1 al conjunto difuso *Baja*.

- Sistemas de Inferencia.** Los sistemas de inferencias son el bloque mediante el cual los mecanismos de inferencia relacionan los conjuntos difusos de entrada y salida simulando el proceso de decisión humano. Las entradas a este bloque son conjuntos difusos y las salidas son también conjuntos difusos, asociados a la variable de salida.

Existen diferentes sistemas de inferencia dentro de la literatura de control difuso y se continua investigando sobre ellos. Se diferencian, básicamente, en la forma en que los grados de pertenencia influyen en las reglas de inferencia difusas.

El sistema de inferencia que utilizaremos aquí es el que *Mamdani* ([5]) propuso en los años 70, dada la facilidad que presenta para su implementación. También es conocido como el sistema de “mínimo-máximo“. Dicho sistema consiste en que los grados de pertenencia a cada conjunto se comparan, se guarda el valor *mínimo* de pertenencia entre ellos y se colocan en el conjunto del universo de salida. Para obtener el producto final del proceso de inferencia, se hace un barrido por cada conjunto, tomando siempre el valor *máximo* de pertenencia que presente cualquier regla. Veamos un ejemplo:

**Ejemplo 3.** Supongamos que partimos de los valores concretos  $x = 10$  e  $y = 26$  y que disponemos de los conjuntos difusos  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$  y  $C_2$  (véase figura 3.3). Supongamos que en la base de conocimientos se pueden encontrar las siguientes reglas difusas:

REGLA 1: Si  $x$  está en  $A_1$  e  $y$  está  $B_1$  entonces  $z \in C_2$

REGLA 2: Si  $y$  está en  $B_2$ , entonces  $z \in C_1$

A continuación, codificamos los valores  $x = 10$  e  $y = 26$ . Así,  $x = 10$  tiene un grado de pertenencia 0.3 a  $A_1$  y 0 a  $A_2$ , mientras que  $y = 26$  tiene un grado de pertenencia de 0.7 a  $B_2$  y de 0 a  $B_1$ .

Al aplicar el método de *Mamdani* a la Regla 1, resulta un grado de pertenencia 0.3 (el *mínimo* de 0.3 y 0.7) al conjunto difuso  $C_2$  (véase figura 3.3(a)).

Si lo aplicamos a la Regla 2, resulta un grado de pertenencia 0.7 al conjunto difuso  $C_1$  (véase figura 3.3(b)).

Finalmente podemos ver en el apartado (c) como el sistema de inferencia de *Mamdani* logra la formación del polígono de salida mediante la unión (*máximo*) del resultado de (a) y (b).

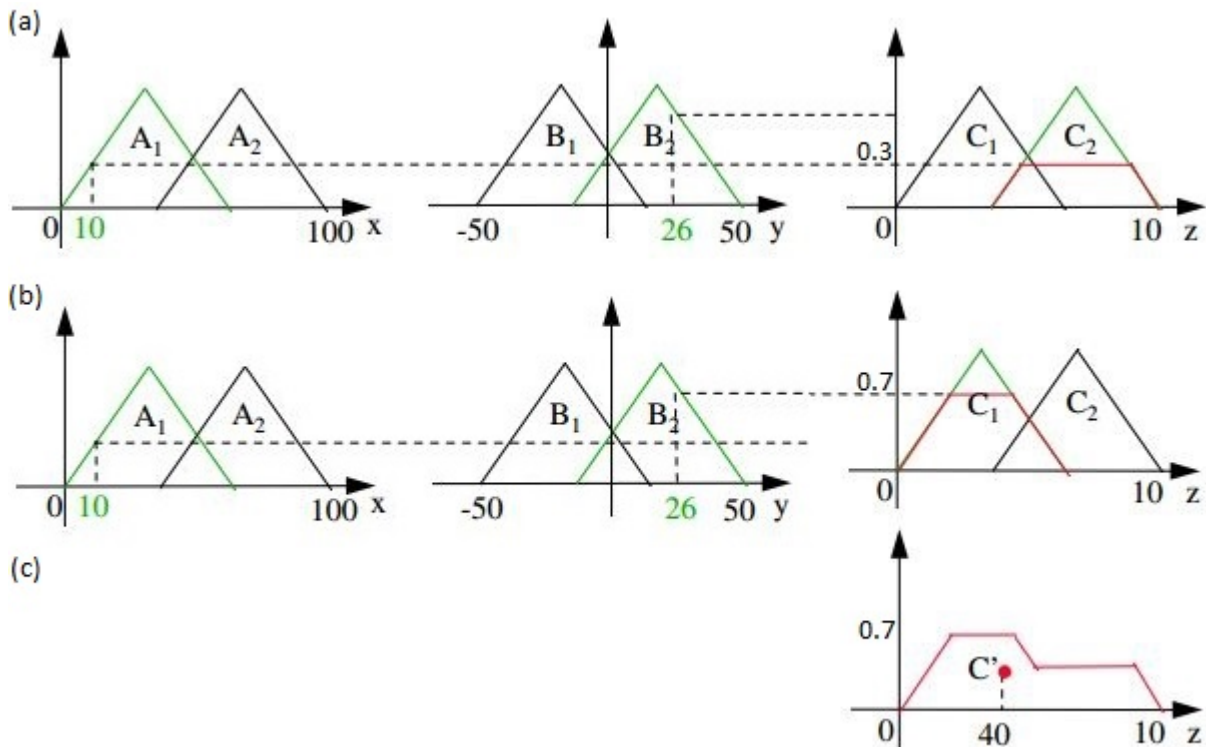


Figura 3.3: Ejemplo sistema de inferencia

4. **Decodificación.** La decodificación es el bloque donde se convierten los conjuntos difusos de las variables de salida que resultan del proceso de inferencia en información precisa expresada mediante un valor *nítido*. Esta etapa es necesaria porque el conjunto borroso de salida para estos sistemas no es directamente utilizable. Para dar una información precisa al operador o mandar un accionador, es necesario pasar del “mundo borroso” al “mundo real”.

La selección del método de decodificación puede jugar un papel decisivo en la síntesis de modelos difusos para muchas áreas de aplicación. Particularmente dentro del área de control difuso, su influencia puede ser determinante en el comportamiento y la robustez del controlador.

A continuación se describen brevemente algunos de los principales métodos de decodificación:

- **Centro de Máximos (COM).** Devuelve como valor decodificado el elemento del



dominio de la función de pertenencia cuyo grado de pertenencia sea mayor. Si hay varios se calcula la media.

En la Figura 3.4 podemos ver como  $Z^*$  es el valor decodificado cuyo grado de pertenencia es mayor.

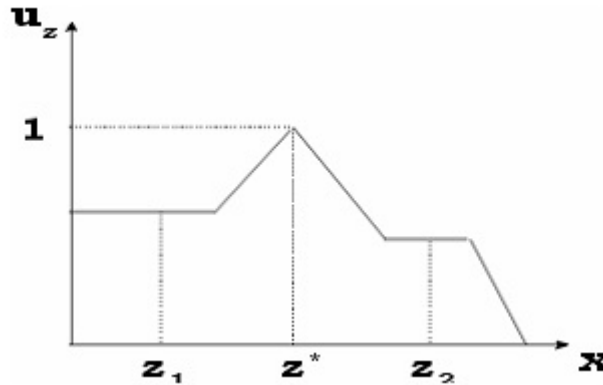


Figura 3.4: Ejemplo centro de máximos

- **Centro de gravedad (Centroide).** Devuelve como valor decodificado el centro de gravedad de la función de pertenencia  $f(x)$  de la variable de salida, es decir

$$x = \frac{\int x f(x)}{\int f(x)} \quad \text{ó} \quad \frac{\sum x_i f(x_i)}{\sum f(x_i)}$$

dependiendo de si el dominio de la función de pertenencia es continuo ó discreto.

En la Figura 3.5 podemos ver como  $Z^*$  es el centroide y su valor es 40.

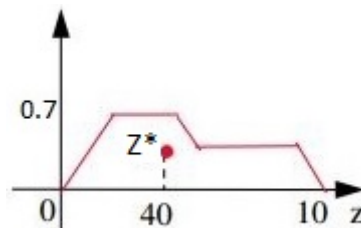


Figura 3.5: Ejemplo centro de gravedad

- **Centro de Área (COA.)** Este método asigna el centro del área de la salida difusa final al valor descodificado y por lo tanto, el área a su izquierda y a su derecha es la misma.

En la Figura 3.6 podemos ver representado el centro de área para una salida difusa.



Figura 3.6: Ejemplo centro de área

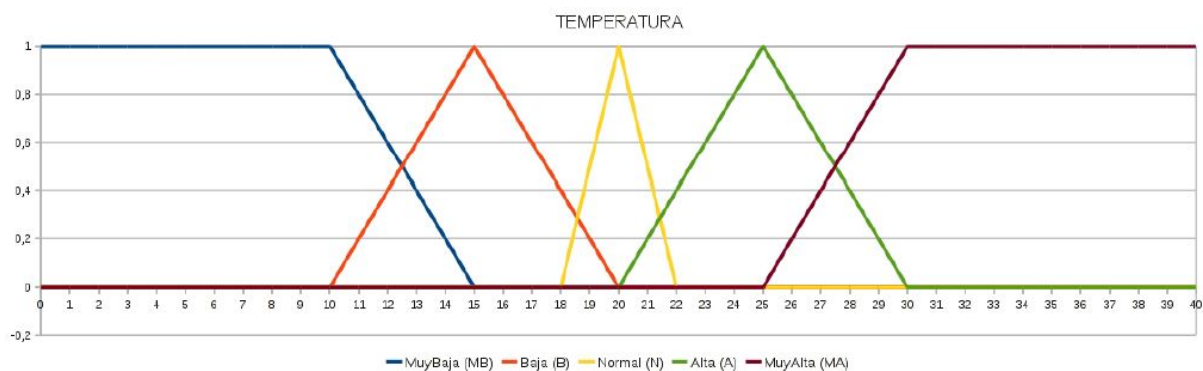
### 3.2. Ejemplos de actuación de Controladores Difusos

1. **Control de la calefacción de un invernadero.** Se pretende controlar la calefacción de un invernadero a partir de los parámetros de la temperatura y humedad del mismo. La finalidad es mantener controlada la temperatura e, implícitamente, la humedad. Para ello contamos con:

- Un sensor de temperatura con un rango de funcionamiento desde  $0^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$  y una precisión de centésimas.
- Un sensor de humedad con un rango de funcionamiento entre  $0\%$  y  $100\%$  de humedad relativa, con una precisión de centésimas.
- La caldera se puede controlar mediante incrementos o decrementos de temperatura, desde  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $+15^{\circ}\text{C}$ .

Las variables lingüísticas de entrada serían:

- *Temperatura*: Se asumen 5 términos lingüísticos: Muy Baja (MB), Baja (B), Normal (N), Alta (A) y Muy Alta (MA).

Figura 3.7: Términos lingüísticos asociados a la *Temperatura*

- *Humedad*: Se asumen 5 términos lingüísticos: Muy Baja (MB), Baja (B), Normal (N), Alta (A) y Muy Alta (MA).

La variable lingüística de salida sería:

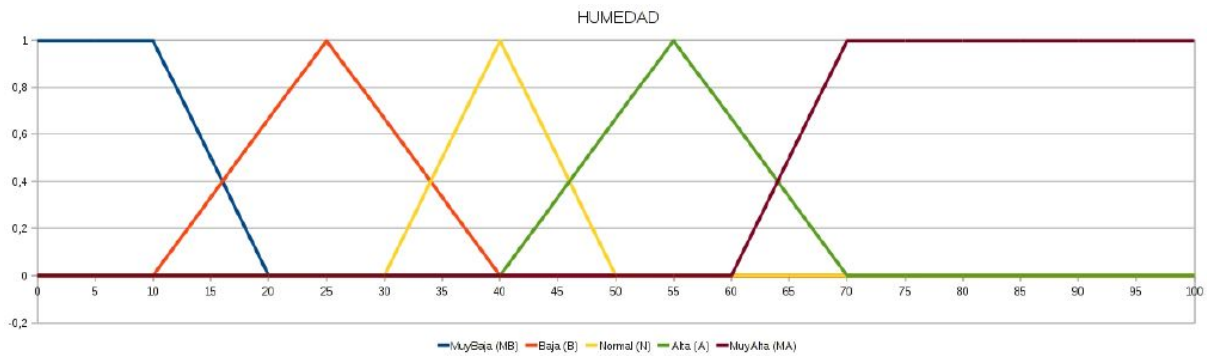


Figura 3.8: Gráfica de la *Humedad*

- Variación de temperatura:* Se asumen 7 términos lingüísticos: Bajada Grande (BG), Bajada Normal (BN), Bajada Pequeña (BP), Mantener (M), Subida Pequeña (SP), Subida Normal (SN) y Subida Grande (SG).

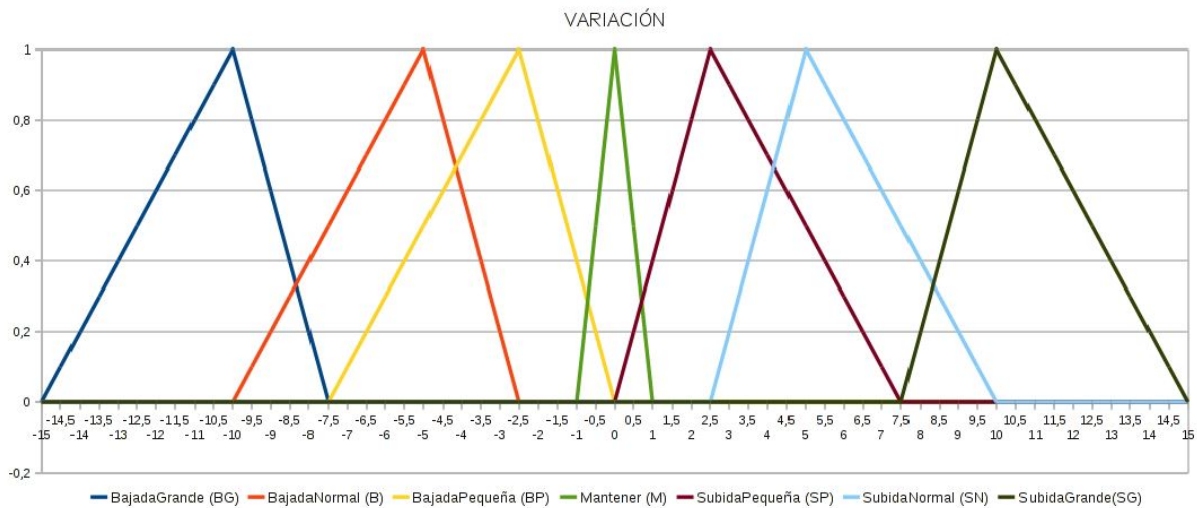


Figura 3.9: Gráfica de la *Variación de temperatura*

Las reglas de inferencia difusas que contiene la base de conocimientos se encuentran en la Figura 3.10.

Temp	Humedad					
	MB	B	N	A	MA	
MB	SN	SN	SG	SG	SG	IF (Temperatura es Baja AND Humedad es Alta) THEN Variación es SubidaPequeña
B	M	M	SP	SP	SN	IF (Temperatura es Baja AND Humedad es MuyAlta) THEN Variación es SubidaNormal
N	M	M	M	M	BP	IF (Temperatura es Normal AND Humedad es Alta) THEN Variación es Mantener
A	M	M	BP	BP	BN	IF (Temperatura es Normal AND Humedad es MuyAlta) THEN Variación es BajadaPequeña
MA	BP	BN	BN	BG	BG	

Figura 3.10: Tabla de reglas (FAM)

A partir de estas definiciones, procedemos a calcular la salida del sistema de control si, por ejemplo, tenemos como datos de entrada los siguientes:

- Temperatura actual: 19,5 °C
- Humedad actual: 65 %

Lo primero que se va a hacer es codificar los datos, como se muestra en la figura 3.11 y en la figura 3.12: El valor nítido “Temperatura=19,5 °C” se corresponde con un grado

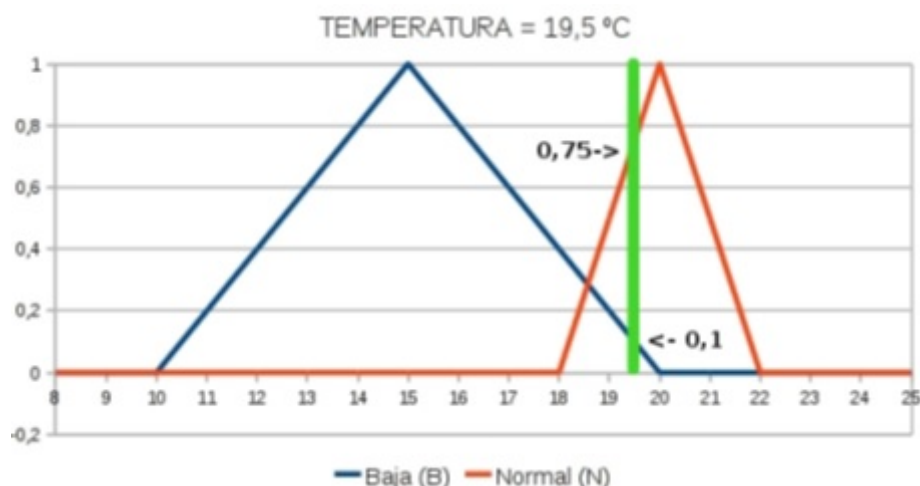


Figura 3.11: Gráfico de codificación de la *Temperatura*

de pertenencia 0.1 para el conjunto difuso Temperatura Baja (B) y con un grado de pertenencia 0.75 para el conjunto difuso Temperatura Normal (N) y cero al resto de funciones de pertenencia. El valor nítido “Humedad=65 %” se corresponde con un grado de

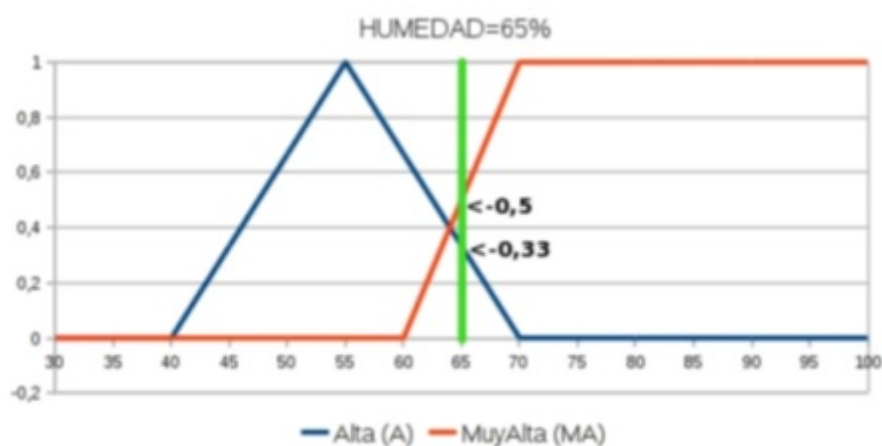


Figura 3.12: Gráfico de codificación de la *Humedad*

pertenencia 0.5 para el conjunto difuso Humedad Alta (A) y con un grado de pertenencia 0.33 para el conjunto difuso Humedad Muy Alta (MA) y cero al resto de funciones de pertenencia.

Una vez tenemos los datos codificados, procedemos a usar las reglas difusas que se muestran en la figura 3.10.

Se observa que solo hay cuatro reglas implicadas (en negrita). Aplicaremos el método de *Mamdani* a cada una de ellas como se muestra en las Figuras 3.13-3.16:

- a) **SI [Temperatura es BAJA(B) Y Humedad es ALTA(A)] ENTONCES Modificación es SUBIDA PEQUEÑA(SP)**

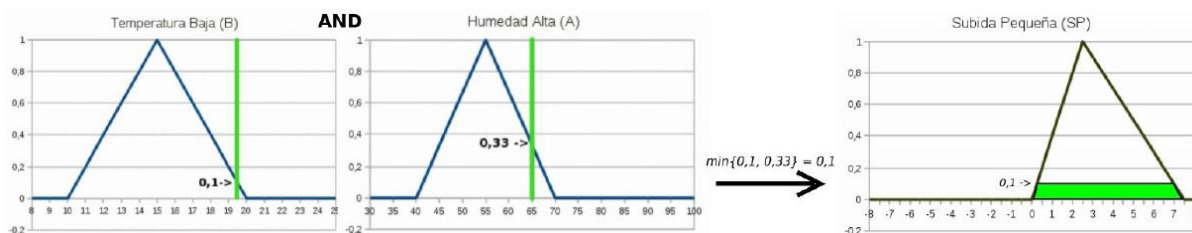


Figura 3.13: Regla 1

En la Figura 3.13 se observa que la *Temperatura* 19.5°C tiene un grado de pertenencia 0.1 al conjunto difuso (B) y que la *Humedad* 65% tiene un grado de pertenencia 0.33 al conjunto difuso (A). En consecuencia, resulta un grado de pertenencia 0.1 al conjunto difuso del consecuente (SP).

- b) **SI [Temperatura es BAJA(B) Y Humedad es MUY ALTA(MA)] ENTONCES Modificación es SUBIDA NORMAL(SN)**

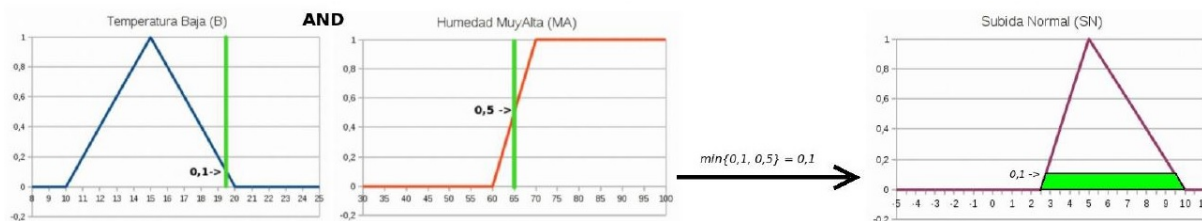


Figura 3.14: Regla 2

En la Figura 3.14 se observa que la *Temperatura* 19.5°C tiene un grado de pertenencia 0.1 al conjunto difuso (B) y que la *Humedad* 65% tiene un grado de pertenencia 0.5 al conjunto difuso (MA). En consecuencia, resulta un grado de pertenencia 0.1 al conjunto difuso del consecuente (SN).

- c) **SI [Temperatura es NORMAL(N) Y Humedad es ALTA(A)] ENTONCES Modificación es MANTENER(M)**

En la Figura 3.15 se observa que la *Temperatura* 19.5°C tiene un grado de pertenencia 0.75 al conjunto difuso (N) y que la *Humedad* 65% tiene un grado de pertenencia 0.33 al conjunto difuso (A). En consecuencia, resulta un grado de pertenencia 0.33 al conjunto difuso del consecuente (M).

- d) **SI [Temperatura es NORMAL(N) Y Humedad es MUY ALTA(MA)] ENTONCES Modificación es BAJADA PEQUEÑA(BP)**

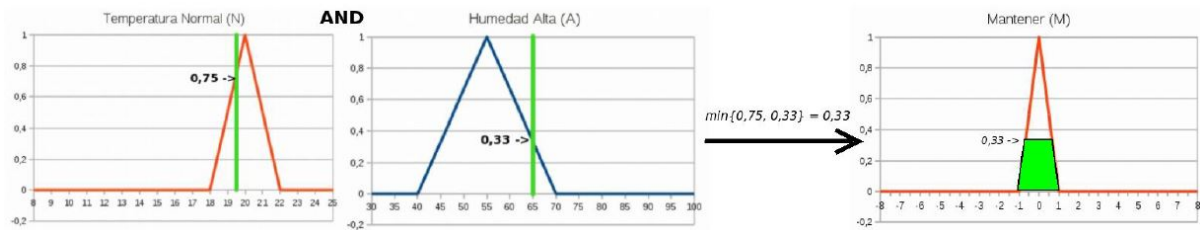


Figura 3.15: Regla 3

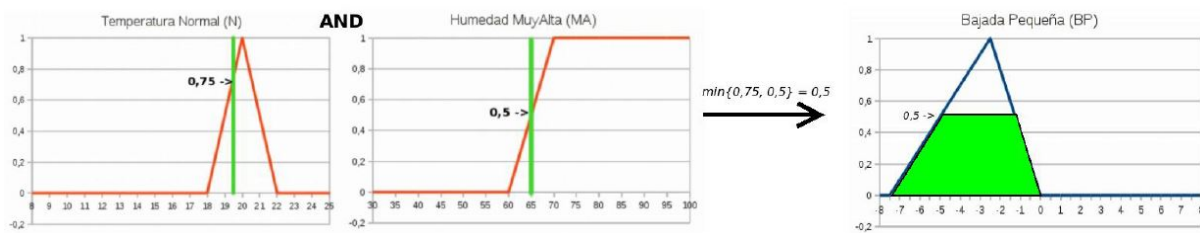


Figura 3.16: Regla 4

En la Figura 3.16 se observa que la *Temperatura* 19.5°C tiene un grado de pertenencia 0.75 al conjunto difuso (N) y que la *Humedad* 65% tiene un grado de pertenencia 0.5 al conjunto difuso (MA). En consecuencia, resulta un grado de pertenencia 0.5 al conjunto difuso del consecuente (BP).

Una vez tenemos los cuatro conjuntos difusos de salida, debemos decodificar para saber cuánto debemos subir o bajar la calefacción, es decir, obtener un valor nítido para la *Variación de temperatura* que debemos aplicar.

En primer lugar, utilizando el método de *Mamdani*, obtenemos el conjunto difuso de salida a partir de los cuatro conjuntos difusos anteriores tomando la unión de ellos (*máximo*). Su función de pertenencia aparece en la Figura 3.17 sombreada en verde.

En segundo lugar, utilizamos el método del centroide para decodificar el conjunto difuso de salida. En la Figura 3.17 se observa que el valor decodificado es -2.125°C.

En resumen, si aplicamos control difuso a una *Temperatura* de 19.5°C y una *Humedad* de 65%, la acción que ejecutará el aparato que regula la calefacción del invernadero será bajar la temperatura 2.125°C.

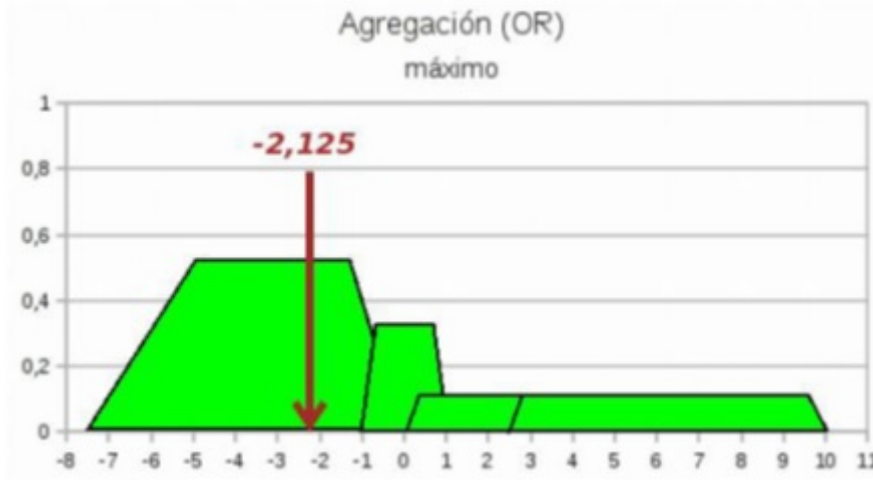


Figura 3.17: Función de pertenencia del conjunto difuso de salida y resultado de la decodificación

2. **Control de riego.** Una floristería experta en el cuidado de rosales comenta que vierte agua en los mismos dependiendo del calor que hace en el día y del grado de humedad de la tierra. Se desea diseñar un controlador difuso que emule este trabajo.

Las variables de entrada serían:

- *Temperatura:* Se asumen 3 variables lingüísticas: Frío (F), Templado (T) y Caluroso (C).

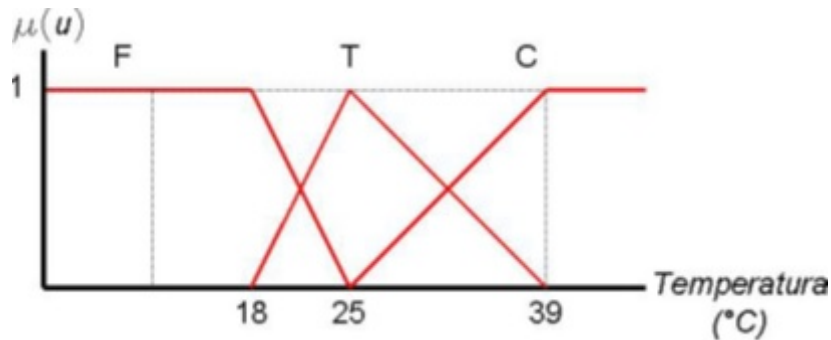


Figura 3.18: Variable de estado *Temperatura*

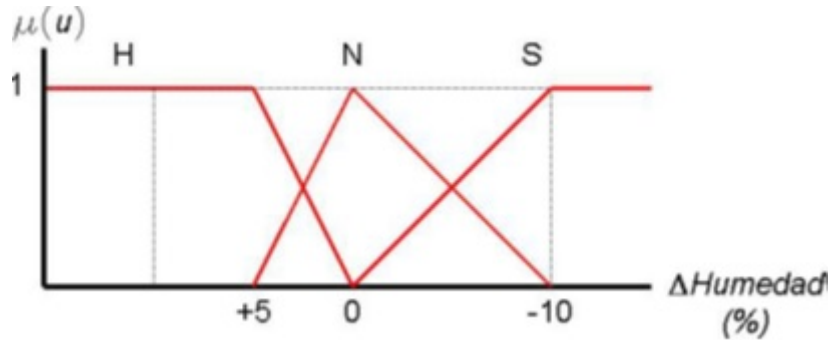
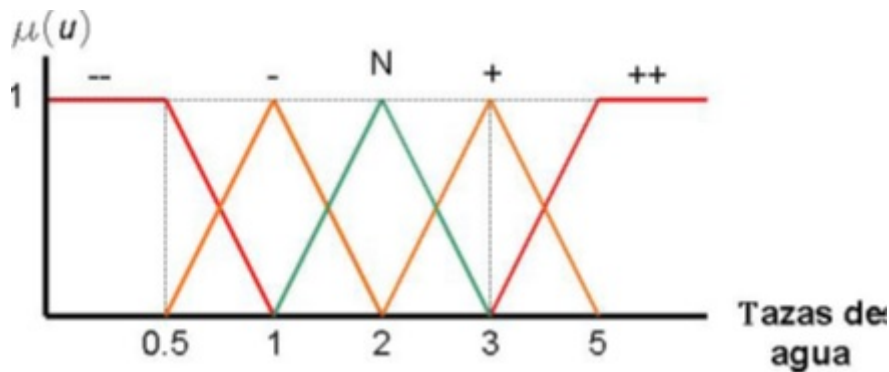
- *Variación de humedad:* Tierra Húmeda (H), Tierra Normal (N) y Tierra Seca (S).

La variable de salida sería:

- *Cantidad de agua:* Se asumen 5 variables lingüísticas: Casi nada de agua (-), Poca agua (-), Lo normal (0), Mucha agua (+) y Bastante Agua (++)

Supongamos que queremos codificar dos situaciones diferentes para determinar dos diferentes acciones de control:

- Supongamos que la *Temperatura* es de 28.5°C y el porcentaje de *Variación de Humedad* es de -2.5%. Con esas condiciones, se observa que el grado de pertenencia de

Figura 3.19: Variable de estado *Variación de Humedad*Figura 3.20: Variable de control *Cantidad de agua*

la *Temperatura* en el conjunto F es 0.0, en el conjunto T es de 0.75 y en el conjunto C de 0.25. A su vez, la *Variación de Humedad* lograría un grado de pertenencia en el conjunto N de 0.5, en el S de 0.5 y de 0.0 en H.

- b) Supongamos que la *Temperatura* es de 21.5°C y el porcentaje de *Variación de Humedad* de de 0.0%. Con esas condiciones, se observa que el grado de pertenencia de la *Temperatura* en el conjunto F es 0.5, en el conjunto T es de 0.5 y en el conjunto C de 0.0. A su vez, la *Variación de Humedad* lograría un grado de pertenencia en el conjunto N de 1, en el S de 0.0 y de 0.0 en H.

Para construir la base del conocimientos se le pregunta al encargado de riego la cantidad de agua que vertería en el rosal para todos los posibles datos de entrada y con ello generamos la tabla con las reglas difusas de la imagen 3.21:

Una vez tenemos los datos de salida, debemos decodificar para saber cuánta agua debemos echar. Para ello utilizamos el método del centroide. Este sería el resultado de la decodificación para los casos anteriores:

- El centro de masas se encuentra en seis tazas de agua.
- El centro de masas se encuentra en 1.75 tazas de agua.



		HUMEDAD DE LA TIERRA		
		H	N	S
T E M P E R A T U R A	F	--	-	+
	T	--	N	++
	C	+	++	++

Figura 3.21: Tabla de reglas

### 3.3. Ventajas del Control Difuso

Podemos mencionar al menos cinco aspectos que hacen que los controladores difusos sean potencialmente atractivos presentando ventajas sobre los controladores clásicos.

1. **Económicos.** Tres factores deben ser tomados en cuenta cuando se estudia el coste de un controlador:
  - a) El número de horas-hombre dedicadas al diseño y al mantenimiento. Durante el desarrollo de un sistema de control, suele haber dos grupos de expertos involucrados. Los que conocen el problema de aplicación y las estrategias de diseño adecuadas para resolverlo, y los expertos en electrónica que conocen los algoritmos numéricos en términos de “bits“ y “bytes“, así como los detalles de la instrumentación en los microcircuitos correspondientes. Los problemas de comunicación entre ambos grupos tienen un impacto directo en los costos de desarrollo. En [Drian 93] se estudia la construcción en paralelo de dos controles de velocidad, un sistema PID convencional y un sistema de control difuso, para un automóvil cuyo objetivo era mantener 800 rpm., independientemente de las perturbaciones del camino o de cargas adicionales, como, por ejemplo, el aire acondicionado. Además de las grandes variaciones en los parámetros del sistema, que implican exhaustivos ajustes, debidos primordialmente a la naturaleza de la producción en serie y a otras causas, los problemas de comunicación entre los especialistas mecánicos y de micro control conducen frecuentemente a que los tiempos de desarrollo se prolonguen de manera considerable. En la prueba de estos dos controladores prácticamente no se encontró ninguna diferencia significativa respecto al comportamiento. Sin embargo, mientras que la solución convencional tardó casi dos años-hombre, la solución de control difuso requirió solamente alrededor

de seis meses-hombre.

- b) El coste de construcción. Un buen número de microprocesadores difusos, tanto analógicos como digitales, así como programas especializados para estos, ha sido desarrollado por empresas comerciales como: Togai Infralogic, Mitsubishi, Micro Devices, Hyper-Logic Corp., entre otras. Estos desarrollos permiten instrumentar controladores difusos a precios muy competitivos y en algunos casos muy inferiores a los de los controladores clásicos tipo PID, PI o PD.
  - c) Mercadotecnia y patentes. En Japón la palabra “Fuzzy“ se ha convertido en un término popular. Todo tipo de aparatos electrodomésticos se comercializan anunciándose como “fuzzy- controlled“ bajo asociaciones positivas como siendo modernos, de alta calidad y fáciles de usar. Por ejemplo, la lavadora de ropa “un solo botón“ constituye el mayor avance respecto a los complejos paneles de control de los anticuados diseños de lavadoras de ropa. En esta máquina se ha incorporado un sensor infrarrojo que permite estimar la cantidad y calidad (suciedad) de ropa; una unidad de lógica difusa interpreta los datos del sensor y subsecuentemente un razonador difuso determina, mediante inferencia de su base de reglas, los detalles del programa de lavado. La industria japonesa de aparatos electrodomésticos reportó varios millones de dólares en ventas de productos “fuzzy-controlled“. Por otro lado, e independientemente de la mercadotecnia, la situación de patentes hace difícil presentar nuevas soluciones utilizando tecnología convencional sin violar o entrar en conflicto con alguna patente de los competidores produciéndose, en el mejor de los casos, retrasos importantes para entrar en el mercado. Utilizando una solución equivalente difusa se puede (y actualmente lo es) rodear la patente existente.
2. **Robustez.** De manera contraria a los controladores óptimos que son muy sensibles a variaciones de parámetros, un controlador difuso puede tratar con mucha más seguridad una planta cuyos parámetros son variantes en el tiempo. Mientras un piloto aéreo humano es incapaz de calcular una trayectoria de vuelo óptimo utilizando su cerebro para solucionar las ecuaciones de Riccati, es perfectamente capaz de conducirlo de forma segura y exitosa bajo condiciones en las que cualquier piloto automático actual fallaría rotundamente. Cuando una anomalía ha ocurrido, la primera cosa que el piloto humano hará es apagar el control automático. Sin embargo, bajo condiciones normales, el piloto automático puede conducir el avión de una manera más suave y económica (en términos de combustible) de lo que ningún piloto humano podría hacerlo. En algún sentido, la optimalidad puede ser intercambiada por robustez. Lo mismo es válido para los controladores difusos. Un controlador difuso nunca podrá competir con un controlador óptimo en términos de eficiencia, pero puede ser construido de manera mucho más robusta que cualquier controlador óptimo.
  3. **Flexibilidad.** Un controlador difuso puede ser diseñado con muy poco conocimiento del sistema que se supone controlará. Consecuentemente, el mismo controlador, mediante el ajuste de sus parámetros de operación, puede ser usado para controlar diferentes tipos de procesos. Solamente el clásico controlador PID puede competir con los controladores difusos en flexibilidad. Este es un aspecto muy importante para fomentar la formación de técnicos especializados en control difuso, que una vez entrenados en esta nueva tecnología pueden readaptarla fácilmente a un gran número de aplicaciones.
  4. **Adquisición del Conocimiento de Expertos.** Una de las mayores cualidades de los controladores difusos es su gran capacidad para capturar de una forma natural el conocimiento que un operador experto tiene de un proceso o sistema. Mediante el uso de

variables lingüísticas como “alto”, “normal”, “muy alto”, etc., un experto puede expresar su conocimiento mediante reglas de la forma:

Si el nivel es alto, entonces disminuir flujo de agua.

Si la presión es baja, entonces aumentar flujo de agua.

Si el consumo es nulo, entonces flujo de agua nulo.

Para diseñar un control difuso, puede no ser necesario conocer, ni ser capaz de expresar mediante ecuaciones diferenciales, un modelo matemático de la dinámica del proceso que se desea controlar. Al no estar basado en un modelo específico, el controlador debe ser capaz de satisfacer las especificaciones a pesar de la incertidumbre.

5. **Alto grado de automatización.** Normalmente los controladores son diseñados para trabajar dentro de un estrecho margen de operación. En muchos casos de control de procesos industriales, como por ejemplo en la industria química, el grado de automatización normalmente es muy bajo. Aunque suelen instalarse algunos bucles de control convencionales, se requiere la intervención de un operador humano durante las etapas de arranque, cambio de nivel de operación y parada, para ajustar los controladores respecto a cada modo de operación. El conocimiento de este operador puede ser expresado en proposiciones tales como “si la situación es A o B, debe llevarse a cabo la secuencia C”. Bajo condiciones de continuo cambio, el control difuso ofrece un método de representar y de instrumentar el conocimiento de alto nivel del operador experto que resulte compatible con los controladores de bajo nivel. Se conocen aplicaciones, como en la industria del papel, en donde la instalación de un sistema de control difuso en el nivel supervisor de todo el sistema de control de procesos ha conseguido un alto grado de automatización permitiendo obtener sustanciales reducciones tanto de la variación de la calidad del producto, como del consumo de energía y materia prima.

### 3.4. Desventajas del Control Difuso

En algunas publicaciones se ha sobregeneralizado e idealizado la utilización del control difuso presentándola como una técnica maravillosa que resuelve todos los problemas de control. En esta sección indicaremos algunas de las desventajas y de los límites actuales de su aplicación.

1. **Sistematización.** Actualmente no existen procedimientos que permitan sistematizar el diseño de los controladores difusos. Hasta ahora los controladores difusos siempre han sido diseñados de una manera ad-hoc basándose en el conocimiento de un operador experto. En muchos casos esto causa que el ajuste de los parámetros del controlador con entradas y salidas múltiples sea una empresa aburrida y desagradable.
2. **Adquisición del Conocimiento.** Si bien, como hemos mencionado anteriormente, una de las principales cualidades de los controladores difusos es su facilidad para expresar de manera sencilla el conocimiento de un operador experto, cuando el conocimiento a priori y relevante de la operación del proceso no está disponible, es pobre, inadecuado, difícilmente representable bajo el paradigma basado en reglas, o no resulta muy consistente. Sus benignas cualidades pueden tornarse en serias desventajas y debe de reconsiderarse la idoneidad de la tecnología difusa para estos casos. Por ejemplo, cuando los datos de

los que disponemos son difíciles de predecir a lo largo del tiempo, puede producirse una descripción un tanto vaga de cómo el proceso es controlado, descripción que al incorporarse en el controlador difuso provocará, posiblemente, una pérdida de la estabilidad y una calidad de operación pobre.

3. **Estabilidad.** La afirmación de que los controladores difusos siempre son más robustos que los controladores convencionales debe ser matizada. El hecho de que los controladores difusos sean más adaptables que los controladores clásicos no significa que puedan adaptarse arbitrariamente bajo cualquier condición y cambio en la operación del sistema. En general no se cuenta, hasta ahora, con técnicas que permitan diseñar controladores difusos que garanticen ser estables bajo todas las posibles condiciones de operación. Esto está en contraste con los sistemas de control retroalimentados clásicos en los cuales pueden probarse analíticamente las propiedades de estabilidad, al menos cuando son aplicados a sistemas lineales.
4. **Número de Especialistas.** En muchos proyectos, por ejemplo en industrias europeas, el desarrollo de controladores difusos puede requerir un mayor tiempo de diseño, debido a que los ingenieros de control involucrados en el desarrollo del proyecto no están aún suficientemente familiarizados con la tecnología difusa. La escasez de personal cualificado en control difuso es uno de los actuales cuellos de botella para la explotación de esta nueva tecnología. Exceptuando el caso de Japón, la tecnología difusa apenas comienza a incluirse en el contenido de los programas académicos de las universidades y deberán pasar aún varios años para contar con un número suficiente de ingenieros formados adecuadamente que puedan explotarla. Como la industria no puede esperar, debería incrementarse el número de seminarios y cursos para permitir que los actuales técnicos sean capaces de utilizar con más soltura esta nueva tecnología.

## Capítulo 4

# Conclusiones

Gracias a la lógica difusa, las computadoras incorporan una nueva capacidad para realizar evaluaciones y decisiones con un criterio más amplio, volcándolas en un conjunto simple de reglas del tipo “if - then“, que permiten describir el funcionamiento del sistema que se pretende automatizar.

Los sistemas basados en los conceptos de la lógica difusa se rigen por una estructura general basada en la de la Figura 3.1. Para diseñar un controlador difuso se necesita especificar, al menos, todos los conjuntos difusos de las variables lingüísticas, obtener todas las reglas difusas necesarias, elegir los operadores de inferencia y el método de defusificación.

La lógica Difusa se está consolidando a través del tiempo cada vez más. Prueba de esto son las múltiples aplicaciones en el área del Control Automático, tales como, Reconocimiento de escritura o Controlador de tráfico. Algunos países, de gran avance tecnológico, como *Japón*, y grandes Industrias, como *NISSAN* y *Mitsubishi*, han utilizado los conceptos de la teoría del Control Difuso para crear e implementar sistemas automatizados que simulen de forma análoga el comportamiento humano. Ejemplo de lo anterior, la máquina de lavado creada por Matsushita, los sistemas de transmisión automática y frenos antibloqueo.

No es posible afirmar que el desarrollo y ajuste de un controlador difuso es una tarea muy fácil. Esto es absolutamente falso.

Finalmente, Zadeh relaciona la complejidad de los sistemas con nuestra capacidad de comprenderlos, definiendo el principio de incompatibilidad: “Conforme la complejidad de un sistema aumenta, nuestra capacidad para ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye hasta un umbral más allá del cual, la precisión y el significado son características excluyentes“.



# Bibliografía

- [1] Aplicaciones de la lógica difusa. <http://logicadifusazarco.blogspot.com.es/2010/11/aplicaciones-de-la-logica-difusa-la.html>. [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [2] Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación Universidad de Málaga. Conjuntos y sistemas difusos. <http://www.lcc.uma.es/~ppgg/FSS/FSS8.pdf>. [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [3] Glosario BITrum. Lógica borrosa. <http://glossarium.bitrum.unileon.es/Home/logica-borrosa>. [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [4] C.C. Lee. *Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controllers*. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1990. Part I pp. 404-435.
- [5] E.H. Mamdani. *Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers*. E.H., 1976. Vol. 8, pp. 669-678.
- [6] Salvador Revelo Andrade. Control difuso. [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/meie/revelo\\_a\\_s/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/revelo_a_s/capitulo4.pdf). [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [7] Tomás Arredondo Vidal. Introducción a la lógica difusa. <http://profesores.elo.utfsm.cl/~tarredondo/info/soft-comp/Introduccion%20a%20la%20Logica%20Difusa.pdf>. [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [8] Universidad de Málaga. Introducción al análisis de datos difusos. <http://webpersonal.uma.es/~MORILLAS/DATOSDIFUSOS.pdf>. [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [9] Universidad de Piura. Lógica difusa y sistemas de control. [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_185\\_184\\_133\\_1746.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf). [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [10] Universidad Nacional de Rosario. Matematica del control fuzzy. <http://usuarios.fceia.unr.edu.ar/~spastel/CAvII%20-%20Matematica%20Control%20Fuzzy.pdf>. [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [11] Universidad Politécnica de Cataluña. Diseño sistemático de controladores difusos usando razonamiento inductivo. [http://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/PhD/paco\\_phd.pdf](http://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/PhD/paco_phd.pdf). [Consulta: 21 de Octubre de 2014].
- [12] Universidad Politécnica de Madrid. Tutorial de introducción de lógica borrosa. <http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/tutfuzzy/introduccion3.html>. [Consulta: 21 de Octubre de 2014].

[13] Universidad Simon Bolivar. Control difuso. <http://prof.usb.ve/montbrun/ps2320/fuzzy/fuzzy.html>. [Consulta: 21 de Octubre de 2014].



# Índice de figuras

2.1. Ejemplo de conjuntos difusos . . . . .	9
2.2. Ejemplo Forma Singleton . . . . .	10
2.3. Ejemplo Forma Triangular . . . . .	10
2.4. Ejemplo Forma S . . . . .	11
2.5. Ejemplo Forma Trapezoidal . . . . .	11
2.6. Ejemplo de Intersección . . . . .	12
2.7. Ejemplo de Unión . . . . .	12
2.8. Ejemplo de Negación . . . . .	13
2.9. Valores lingüísticos de la variable difusa <i>Velocidad</i> . . . . .	13
2.10. Conjuntos difusos de la variable lingüística <i>Velocidad</i> con sus correspondientes funciones de pertenencia. . . . .	14
3.1. Estructura general de un controlador difuso. . . . .	16
3.2. Gráfico de codificación de la temperatura . . . . .	17
3.3. Ejemplo sistema de inferencia . . . . .	18
3.4. Ejemplo centro de máximos . . . . .	19
3.5. Ejemplo centro de gravedad . . . . .	19
3.6. Ejemplo centro de área . . . . .	20
3.7. Términos lingüísticos asociados a la <i>Temperatura</i> . . . . .	20
3.8. Gráfica de la <i>Humedad</i> . . . . .	21

3.9. Gráfica de la <i>Variación de temperatura</i> . . . . .	21
3.10. Tabla de reglas (FAM) . . . . .	21
3.11. Gráfico de codificación de la <i>Temperatura</i> . . . . .	22
3.12. Gráfico de codificación de la <i>Humedad</i> . . . . .	22
3.13. Regla 1 . . . . .	23
3.14. Regla 2 . . . . .	23
3.15. Regla 3 . . . . .	24
3.16. Regla 4 . . . . .	24
3.17. Función de pertenencia del conjunto difuso de salida y resultado de la decodificación	25
3.18. Variable de estado <i>Temperatura</i> . . . . .	25
3.19. Variable de estado <i>Variación de Humedad</i> . . . . .	26
3.20. Variable de control <i>Cantidad de agua</i> . . . . .	26
3.21. Tabla de reglas . . . . .	27