

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
SEDE TALCAHUANO "REY BALDUINO DE BELGICA"



LOGICA DIFUSA
Conceptualización, Aplicaciones e
Implementación

Iván Acencio Barrientos

- 2003 -

UNIVERSIDAD FEDERICO SANTA MARIA



3 5609 01523 0599

T600.895
a 34
2003

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
SEDE TALCAHUANO "REY BALDUINO DE BELGICA"

C.-1

logica difusa



LOGICA DIFUSA

Conceptualización, Aplicaciones e Implementación

Trabajo para optar al Título Profesional de
Ingeniero de Ejecución en Control e Instrumentación
Industrial

Alumno: Sr. Iván Orlando Acencio Barrientos
Profesor Guía: Sr. Sergio Briceño M.

- 2003 -

0719.



Dedico este trabajo a todas y a cada una de aquellas personas que tuvieron alguna participación en él, en especial a mi Madre y hermanas, y al recuerdo siempre presente de mi Padre y de mi tío Lucho.



INDICE GENERAL

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PRINCIPIO DE LA LÓGICA DIFUSA	6
3. VARIABLES LINGÜÍSTICAS	7
4. CONJUNTOS DIFUSOS	9
4.1. Operaciones	12
4.2. Propiedades	17
4.3. Relaciones entre Conjuntos Difusos	18
4.4. Funciones de Pertenencia	19
4.4.1. Tipos de Funciones de Pertenencia	20
4.5. Cálculo de la Función de Pertenencia	25
4.6. Características de los Conjuntos Difusos	27
4.7. Operaciones sobre Conjuntos Difusos	30
5. LOGICA DIFUSA	32
5.1. Principio de la Lógica Difusa	34
5.2. Operación de Implicancia	36
5.3. Reglas Difusas	37
5.4. Inferencia Difusa	41
5.5. Sistemas de Lógica Difusa	42
6. MODELOS DIFUSOS	44
6.1. Definición de las Características del Modelo	47
6.2. Definición de los Conjuntos Difusos	48

6.3. Número de Reglas	51
6.4. Orden de Reglas	52
6.5. Diseño de la Base de Reglas	53
6.6. Desfusificación	54
6.6.1. Métodos de Desfusificación	55
6.7. Simulación y Ajuste	58
7. APLICACIONES	59
7.1. Sistemas Híbridos	66
8. HISTORIA DEL CONTROL DIFUSO	68
9. DISEÑO DE UN CONTROL DIFUSO	70
10. TIPOS DE CONTROLADORES	72
• Controladores difusos sin optimizar	
• Controladores difusos con optimizar	
• Controladores Híbridos	
11. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL CONTROL DIFUSO	76
12. AMBIENTES DE SIMULACIÓN	78
13. IMPLEMENTACIÓN	83
14. IMPLEMENTACIÓN DIFUSA EN PLC	93
15. REFERENCIA MODULOS IEC	94
16. CONCLUSIONES	95
ANEXO	
FUENTES DE INFORMACION	

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Ejemplo 4.2:	11
Fig.4.1: Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos A y B	12
Fig.4.2: La línea azul representa $\mu A \cup \mu B$	13
Fig.4.3: La línea azul representa $\mu A \cap \mu B$	14
Fig.4.4: Complemento del conjunto A	15
Ejemplo 4.3:	19
Ejemplo 4.4:	29
Ejemplo 5.1:	38
Ejemplo 5.2:	39
Fig.5.1: Estructura de un Sistema de Lógica Difusa	42
Fig.6.1: Ciclo de la metodología de Diseño	46
Fig.6.2: Descomposición de una variable en sus términos difusos	49
Fig.6.3: Traslape de las particiones de los conjuntos difusos	50
Fig.6.4: Ejemplo de conjuntos para entrada y salida	51
Fig.6.5: Ejemplo de diseño de una base de reglas	53
Fig.6.6: Método de desfusificación de Centro de Area(COA).	55
Fig.6.7: Método de desfusificación de Media del Máximo (MOM).	56
Fig.6.8: Método de desfusificación de Criterio del Máximo	57
Fig.10.1: Controladores difusos directos sin optimización	72
Fig.10.2: Controladores difusos directos con optimización	74
Fig.12.1: Ventana inicial de MATLAB	79

Figura	Página
Fig.12.2: Pantalla de trabajo de FuzzyTech	81
Fig.12.3: Ventana UNFUZZY y Ventana de trabajo	82
Fig.13.1: Editor FIS	84
Fig.13.2: Editor de Función de Pertenencia	84
Fig.13.3: Editor de Reglas Difusas	85
Fig.13.4: Visor de Reglas	85
Fig.13.5: Visor de Superficie	86
Fig.13.6: Ventanas de creación de un bloque difuso	87
Fig.13.7: Sistema difuso	87
Fig.13.8: Editor de proyectos	88
Fig.13.9 a) Reglas de variable distancia b) Reglas de variable	91
Fig.13.10: Simulación de Grúa	92

INDICE DE TABLA

Página

Tabla 5.1: Correspondencia entre operadores	34
---	----

INTRODUCCION

Las sociedades occidentales han basado su desarrollo en la lógica dicotómica (verdadero o falso). La sociedad oriental en cambio, ha planteado una realidad de forma diferente, que admite matices en la verdad y falsedades parciales. Al analizar una situación referida a un problema planteado, es frecuente encontrar que mientras algo suele ser verdadero en la mayoría de las circunstancias, puede no ser así en el caso de situaciones específicas. Al usar múltiples valores para la verdad o la confianza, se le proporciona mayor flexibilidad al proceso de toma de decisiones.

Lo planteado en el párrafo anterior es la esencia propia de lo que se conoce como lógica difusa. La lógica difusa o borrosa (conceptos imprecisos, en definitiva) es la conclusión de diversos estudios realizados durante el desarrollo del pensar del hombre, matemáticos, filósofos, quienes de alguna manera no aceptaban el determinismo planteado por la lógica clásica. Un ejemplo de esto es el trabajo efectuado por el filósofo polaco Jan Lukasiewicz⁽¹⁾, que en 1920, establece teorías de conjuntos con diferentes grados de pertenencia entre 0 y 1. Este cuestionamiento de la efectividad de la dicotomía verdadero – falso, tuvo su resultado más importante, cuando Lofti Zadeh⁽²⁾ guiado por el principio de que las matemáticas pueden ser usadas para encadenar el lenguaje con la inteligencia humana, toma la lógica y la teoría de conjuntos propuesta por Lukasiewicz, para hablar de los conjuntos difusos y moldear luego la teoría de la lógica difusa. Se considera que su nacimiento es en 1965 a partir de la difusión del artículo "Fuzzy Sets" escrito por Lofti Zadeh y publicado en la revista "Information and Control".

⁽¹⁾(1878-1956)Logicista polaco, profesor en las universidades de Lvov y de Varsovia. Realizó estudios sobre lógica y estudió profundamente los sistemas axiomáticos. Fue el creador de la lógica polivalente.

⁽²⁾(1922- -) Estadounidense de origen iraní, padre de la lógica difusa, es profesor en el área de Ciencias de la Computación de la Universidad de California, en Berkeley.

En contraste con la lógica convencional, que utiliza conceptos absolutos para referirse a la realidad, la lógica difusa la define en grados variables de pertenencia a los mismos, siguiendo patrones de razonamiento similares a los del pensamiento humano.

Así por ejemplo, mientras dentro del marco rígido de la lógica formal un recinto está solamente "oscuro" (0) o claro (1), para la lógica difusa son posibles también todas las condiciones relativas intermedias percibidas por la experiencia humana como "muy claro", "algo oscuro", "ligeramente claro", "extremadamente oscuro", etc. Las condiciones extremas o absolutas asumidas por la lógica formal son sólo un caso particular dentro del universo de la lógica difusa. Esta última nos permite ser relativamente imprecisos en la representación de un problema y aún así llegar a la solución correcta.

Pero surge la pregunta ¿qué significa la teoría difusa?, ¿Por qué utilizar el término difuso? :

El termino "difuso" procede de la palabra inglesa "fuzzy" que significa "confuso, borroso, indefinido o desenfocado". Entenderemos como difusificar, la forma en la cual procesamos la información, esto es, nuestras decisiones, nuestro pensamiento, pero particularmente nuestro lenguaje, ya que en muchas ocasiones no expresamos con claridad lo que queremos comunicar. Frases como: "Nos vemos luego", "un poco más", "no me siento muy bien", son expresiones difusas, decimos que son difusas porque la difusificación surge de las diferentes interpretaciones que damos a "luego", "un poco más", "muy bien". Por ejemplo "luego", para el análisis de fenómenos rápidos en ingeniería puede ser del orden de nanosegundos, pero para paleontólogos del orden de miles de años. Como se puede observar la magnitud del orden es relativa, por lo tanto si se emplea una unidad difusa (fuzzy), se debe tener claramente definido el contexto donde se esta utilizando para así encontrar un punto de referencia y una unidad de medida.

Desde un punto de vista psicológico, la lógica difusa puede definirse como la resolución de problemas que implica cierto grado de inferencia e intuición para lograr la conclusión propia, vista como una distinción crucial entre la inteligencia humana y la mecánica. Ahora teniendo como referencia la inteligencia artificial, corresponde a un método de razonamiento de maquina, similar al pensamiento humano, que puede procesar información incompleta o incierta, característico de muchos sistemas expertos.

La Lógica Difusa, de gran importancia en estos últimos años, aparece para dar solución a problemas complejos de diversas áreas, las que van de procesos industriales, hasta artefactos domésticos. Si bien es aplicada en variadas disciplinas y existe gran cantidad de información sobre el tema, resulta desconocido para el común de la gente si consideramos que, una no despreciable cantidad de artefactos de uso domésticos viene con el rótulo de "fuzzy logic".

Dentro de su desarrollo, la lógica difusa ha abarcado distintas áreas del quehacer humano, no estando exento de esto, el control de procesos. Es así, que esta lógica se ha utilizado en la implementación de controladores difusos, los que han venido a dar soluciones, o mejorar las ya existentes, en algunas aplicaciones industriales.

Los controladores difusos son las aplicaciones más importantes de la teoría difusa. Ellos trabajan de una forma bastante diferente a los controladores convencionales; el conocimiento experto se usa en vez de ecuaciones diferenciales para describir un sistema. Este conocimiento puede expresarse de una manera muy natural, empleando las variables lingüísticas que son descritas mediante conjuntos difusos.

Algunos conceptos pueden ser mejor definidos en términos de palabras, que por matemáticas; la lógica difusa y su base en los conjuntos difusos, entregan las herramientas para poder construir modelos más cercanos a la realidad.

El objetivo de este proyecto es dar a conocer los fundamentos que sostienen a la lógica difusa, para lo cual se comenzará introduciendo la teoría de conjuntos difusos, donde se abordan conceptos como implicancia, reglas difusas, sistemas difusos, etc. , todo orientado a su implementación en alguna área de interés. De esta forma se entrega la estructura para realizar un modelo difuso, lo que puede parecer algo contradictorio, debido a que la lógica difusa, es utilizada en la mayoría de los casos, en dar solución a problemas en los que no se cuenta con un modelo, en este caso matemático, que represente el problema en cuestión.

Se presentan algunas de las distintas aplicaciones que se le ha dado a la lógica difusa, en diversas áreas, demostrando su gran adaptabilidad al medio donde se utiliza. Como ejemplo de esto, se mencionan su empleo en sectores tan distintos como en el diagnóstico de enfermedades, control de trenes, traducción de variables auditivas a visuales, evaluación agro - ecológica de tierras, en plantas de fabricación de cemento, etc., además se entrega una visión de su actualidad, en aplicaciones combinada con otras tecnologías, como redes neuronales, algoritmos genéricos, y sistemas de control convencional.

En lo que respecta a la implementación de un sistema difuso, se utilizarán herramientas de simulación de control difuso. Dentro de los ambientes que permiten el desarrollo de sistemas basados en lógica difusa, encontramos entornos de tipo matemático y entornos de lógica difusa.

Para la implementación se desarrollaran ejemplos de sistemas difusos, realizados en los entornos mencionados con anterioridad, en particular Matlab(Simulink), y una simulación incluida en FuzzyTech. Sobre estos ambientes de trabajos se entrega mayor información en el capítulo correspondiente a la implementación.

Se presenta una descripción generalizada de un documento que contiene información de controlador difuso y sobre bloques utilizados en la implementación de procesos que emplean esta lógica.

Además se incluye un anexo, en el cual se muestra un estudio, realizado por el Departamento de Electrónica de la Universidad Autónoma de México, donde se establece una comparación entre un control PID y un control Difuso. La experiencia consistió en el control de temperatura, teniendo como objetivo, mantener un bloque de Cobre a temperatura constante. Como conclusión general de este estudio se desprende: que el control difuso presenta mejores resultados en un alto porcentaje de las pruebas realizadas en estos dos tipos de control.

2. – PRINCIPIOS DE LA LOGICA DIFUSA

La Lógica Difusa (*fuzzy logic*) aparece en el campo tecnológico, ante la necesidad de controlar con mayor eficiencia, sistemas donde los métodos tradicionales no se pueden implementar, debido a la complejidad de estos. Es considerada dentro de las lógicas multivaluadas, es decir, que otorga variados criterios en la toma de decisiones y más de una posibilidad de asignación a una sentencia, esto es, se aleja de los tradicionales valores deterministas de "verdadero" o "falso", empleados en la lógica clásica. Un ejemplo sería: la temperatura del agua, si la definiéramos con la lógica booleana (digital), diríamos 'caliente' o 'fría', en cambio la lógica difusa permite múltiples valores para definir la temperatura del agua, como, 'gélida', 'fría', 'templada', 'caliente' o 'ardiendo'. Pero para entender mejor los fundamentos de la lógica difusa debemos conocer, de manera previa, el concepto de variables lingüísticas, y la teoría de los conjuntos difusos. Las variables lingüísticas son palabras que utilizamos cotidianamente, y que su mayor característica es que la información que aportan es en cierto grado imprecisa, como la definición de la temperatura del agua dada anteriormente.

La teoría de los conjuntos difusos ofrece un herramienta para modelar sistemas pocos precisos. Esta teoría trabaja basándose en conjuntos o subconjuntos difusos asociados a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística, cada elemento esta asociado a un conjunto por un grado de pertenencia, éste toma un valor del intervalo cerrado entre cero y uno.

3. - VARIABLES LINGÜÍSTICAS

Como se mencionó anteriormente, la Lógica Difusa se fundamenta en los denominados conjuntos difusos, donde se utilizan sentencias del formato de la implicancia(\rightarrow), entre condiciones, esto es:

"Sí..... ENTONCES.....", (*if...then*)

aquí los valores lingüísticos, juegan un papel fundamental en la asignación de las sentencias.

Los conceptos utilizados son expresiones lingüísticas, las que corresponden a un lenguaje cotidiano, los que se caracterizan por ser conceptos con cierto grado de incertidumbre, o poca claridad, donde se indica algún atributo, esta es una característica propia de la comunicación humana, la que es empleada para definir conjuntos o algoritmos,

Una Variable Lingüística es aquella variable cuyos valores son palabras o sentencias que van a enmarcarse en un lenguaje predeterminado. Esto es, que puede tomar por valor expresiones del lenguaje natural, estas palabras realizan el papel de etiquetas en un conjunto difuso. Lo dicho anteriormente es el objetivo central de asignar con palabras el valor de una variable, pero a una variable lingüística también se le podrán asignar valores numéricos.

En términos más formales, una variable lingüística se define de la siguiente forma, $(A, T(A), U, G, M)$, donde:

A: nombre de la variable

$T(A)$: conjunto de términos de los valores que puede tomar A

U: valores numéricos que puede tomar una variable, *Universo de Discurso*.

G: regla sintáctica que genera los nombres de los valores.

M: regla semántica para asociar un significado a cada valor.

Ejemplo N°3.1: si consideramos la variable lingüística Presión, entonces, $A = \text{Presión}$, $T(\text{Presión})$ corresponde al conjunto de todos los términos que puede hacer referencia Presión, como por ejemplo, baja, media, alta, muy alta, U es el universo de discurso, que se le asigna el rango de acuerdo a la situación puntual, para este ejemplo es de 2psi a 10psi.

Los Conjuntos Difusos pueden utilizarse para representar expresiones tales como:

- La velocidad es RÁPIDA.
- Temperatura MEDIA.

Un ejemplo de la utilización de la implicancia, con las sentencias vistas anteriormente, podría ser:

1. Si la velocidad es Rápida ENTONCES aplicar freno.
2. Si la temperatura es Baja ENTONCES activar calefactores.

4. - CONJUNTOS DIFUSOS

Los conjuntos nacen de la necesidad de clasificar los objetos que, generalmente, presentan alguna característica común. Al hablar de conjuntos, la primera idea que se tiene, es la de una colección de elementos, que forman parte de un universo, y que *pueden* o *no* pertenecer a un conjunto específico. Esta cualidad de '*pertenecer*' o de '*no pertenecer*' a un conjunto no es tan rígida en los conjuntos difusos, debido a que todos los elementos del universo poseen algún grado de pertenencia en relación con un conjunto.

Un conjunto difuso es una correspondencia o función continua, cuyo dominio es el universo (universo de discurso), y su recorrido es un intervalo cerrado real, comprendido desde el 0 al 1, es decir, [0,1].

En cuanto a los grados de pertenencia de un elemento con un conjunto, este tendrá una mayor pertenencia mientras más cercano esté del uno(1), y una menor pertenencia mientras más cercano esté del cero(0). Las primeras diferencias que se hacen evidentes entre los Conjuntos Concretos y los Conjuntos Difusos son las siguientes:

- La función de pertenencia asociada a los conjuntos concretos sólo puede tener dos valores: 0 ó 1, mientras que en los conjuntos difusos puede tener cualquier valor entre 0 y 1.
- Un elemento puede pertenecer (parcialmente) a un conjunto difuso y simultáneamente pertenecer (parcialmente) al complemento de dicho conjunto. Lo anterior no es posible en los conjuntos concretos, ya que constituiría una violación al *principio del tercer excluido* ($A \cup A' = U$).

- Las fronteras de un conjunto concreto son exactas, en tanto que las de un conjunto difuso son, precisamente, difusas, ya que existen elementos en las fronteras mismas, y estos elementos están a la vez dentro y fuera del conjunto.

Definición 4.1: un conjunto difuso D se define como una **función de pertenencia** μ_D que relaciona a un Universo X con los elementos del intervalo cerrado $[0, 1]$.

$$\mu_D : X \longrightarrow [0, 1]$$

- de forma continua queda representado por:

$$D = \int \mu_D(x) / x \quad (1)$$

- en el caso discreto queda representado por:

$$D = \mu_D(x_1) / x_1 + \mu_D(x_2) / x_2 + \dots + \mu_D(x_n) / x_n \quad (1)$$

Nota ⁽¹⁾: tanto en el caso continuo como discreto no deben considerarse como operaciones algebraicas.

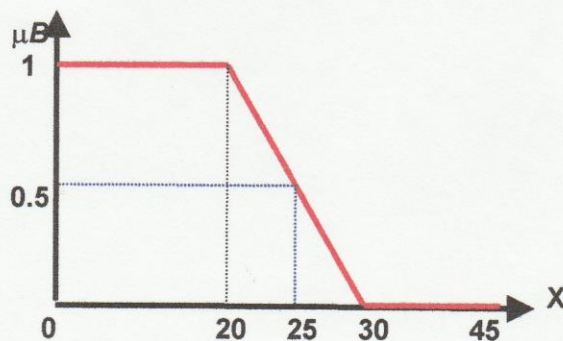
Ejemplo 4.1: considérese el conjunto difuso discreto A, definido por personas de estatura 1,70 mt., a continuación se indica el grado de pertenencia y la estatura.

0.76 / 1,3; 0.88 / 1,50; 0.94 / 1,54; 0.95 / 1,62; 0.98 / 1,68; 1 / 1,7

esto significa en el caso de las personas de 1,3mt. que un 76 % pertenece a A, y un 24% pertenece al complemento de A.

Ejemplo 4.2: consideremos ahora un ejemplo gráfico. Si definimos el conjunto difuso de "personas jóvenes", para el cual fijamos como límites a todas las personas menores de veinte años, es decir, $[0, 20]$, su representación gráfica sería:

De acuerdo al gráfico, una persona de 25 años pertenece en un 50% al conjunto difuso B.



4.1. -OPERACIONES

En los conjuntos difusos, también nos encontramos con las operaciones de Unión, designada como **max**, Intersección con el operando **min**, y Complemento o negación. Para ir ejemplificando, consideremos los siguientes conjuntos difusos, sean:

- A, todos los números entre 5 y 8
- B, un número en torno al 4

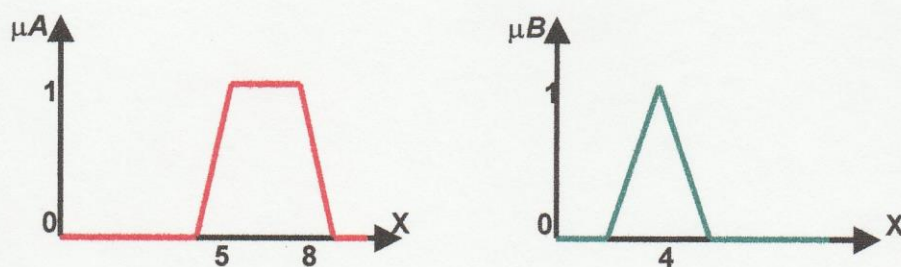


Figura. N°4.1: funciones de pertenencia del los conjuntos difusos A y B

Definición 4.2:

Unión. La unión de dos conjuntos difusos A y B con sus respectivas funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ es un nuevo conjunto difuso C escrito como $C(x) = A(x) \cup B(x)$ de manera tal que:

$$\mu_C = \mu_A \cup \mu_B \quad \text{ó} \quad \mu_C(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

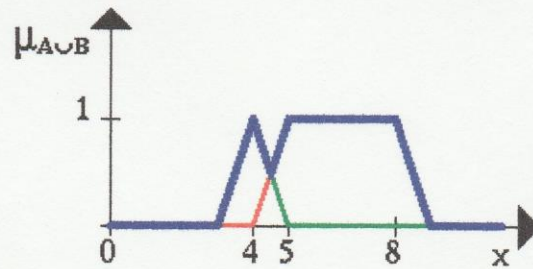


Figura N°4.2: La línea azul representa $\mu_A \cup \mu_B$

Definición 4.3:

Intersección. La intersección de dos conjuntos difusos A y B con sus respectivas funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ es un nuevo conjunto difuso C escrito como $C(x) = A(x) \cap B(x)$ de manera tal que:

$$\mu_C = \mu_A \cap \mu_B \quad \text{ó} \quad \mu_C(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

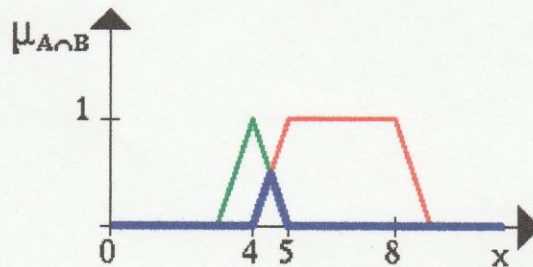


Figura. N°4.3: La línea azul representa $\mu_A \cap \mu_B$

Comentario: de los gráficos de la Unión y de la Intersección, se desprende que estas operaciones se comportan de igual forma que en la teoría de conjuntos tradicionales.

Definición 4.4:

Complemento. El complemento de un conjunto difuso A , denotado por A' se define como:

$$\mu_{A'} = 1 - \mu_A$$

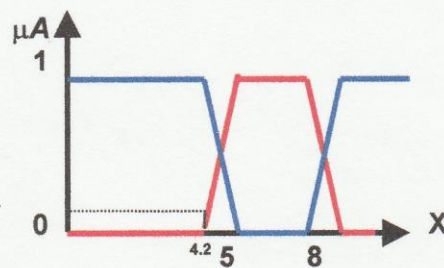


Figura N°4.4: complemento del conjunto A

Comentario: hay que notar que en el caso del complemento, existen elementos que son comunes entre A y A' , esto debido a que elementos que poseen un grado de pertenencia menor que 1 en el conjunto A , también poseen un grado de pertenencia al conjunto A' , situación que no se presenta en los conjuntos tradicionales.

Por ejemplo, el número 4,2 posee un grado de pertenencia a A de 0,47, y de acuerdo a la expresión:

$$\mu_{A'} = 1 - \mu_A,$$

4,2 tiene un grado de pertenencia al complemento de A (A') de 0,53.

También es importante mencionar que en algunos casos el complemento en conjuntos difusos se comporta de la misma manera que en la lógica clásica, esto es, si a una función de pertenencia le corresponde como grado de pertenencia uno (1), entonces su complemento será cero (0), y viceversa.

$$\mu_A(x)=1 \text{ entonces } \mu_{A'}(x)=0 \text{ y viceversa.}$$

Es importante hacer mención que existen otras formas de nomenclatura de las operaciones indicadas anteriormente, pero las definiciones presentadas corresponden a las realizadas por Lofti A. Zadeh, y se ha demostrado por estudios posteriores que lo propuesto por Zadeh, es donde se respetan una mayor cantidad de propiedades de la lógica clásica.

En las operaciones recién vistas, hay que resaltar que coinciden con la teoría clásica de conjuntos, con la salvedad que se produce en el complemento, por lo cual se puede decir entonces que la teoría clásica de conjuntos es un caso particular de la teoría de conjuntos difusos, si restringiéramos los valores de pertenencia sólo a 0 y 1.

4.2. -PROPIEDADES BÁSICAS

Sean A, B, C tres conjuntos difusos, para éstos se definen las siguientes propiedades:

Conmutativa: $A \cup B = B \cup A;$ $A \cap B = B \cap A$

Asociativa: $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C) = A \cup B \cup C$
 $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C) = A \cap B \cap C$

Distributiva: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
 $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$

Idempotencia: $A \cup A = A;$ $A \cap A = A$

4.3. -RELACIONES ENTRE CONJUNTOS DIFUSOS

Definición 4.5: Sean A y B dos conjuntos difusos, diremos que, son iguales, sí y sólo sí $\mu A(x) = \mu B(x)$ para todo x en X , y lo notaremos como $A(x) = B(x)$. (Para simplificar en la escritura en adelante lo escribiremos como $\mu A = \mu B$).

$$A(x) = B(x)$$

Definición 4.6:

Inclusión(Subconjunto), A está incluido en B sí y sólo sí la función de pertenencia de A es menor o igual que la de B para todo elemento.

$$A(x) \subseteq B(x) \text{ ssi } \forall x \in X, \mu A(x) \leq \mu B(x)$$

Por ejemplo, la intersección de dos conjuntos (A y B) genera un tercer conjunto (C), el cual es a su vez subconjunto de A y B

Definición 4.7: Un conjunto difuso D es vacío sí y sólo sí su función de pertenencia asigna 0 a todos los elementos de X .

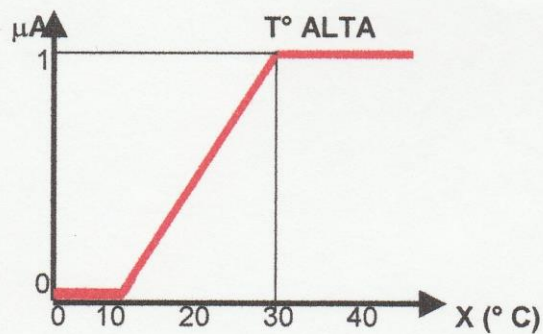
$$D = \phi \text{ ssi } \forall x \in X, \mu D(x) = 0$$

4.4. – FUNCION DE PERTENENCIA

Los conjuntos difusos, como se mencionó anteriormente, corresponden a una función de pertenencia, la que relaciona el conjunto con los elementos, de acuerdo al grado de pertenencia existente entre ellos.

Esta función de pertenencia también se puede expresar de forma gráfica, especialmente cuando su universo de discurso (dominio) es continuo. En él, la abscisa (eje x) corresponde al universo de discurso, en tanto la ordenada (eje y), corresponde a los grados de pertenencia en el intervalo $[0, 1]$.

EjemploN°4.3: concepto de T° "ALTA"



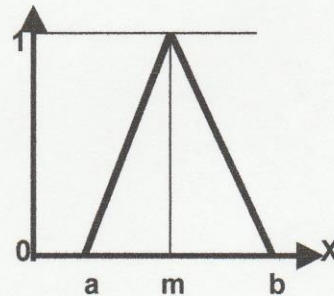
4.4.1. – ALGUNOS TIPOS DE FUNCION DE PERTENENCIA

$$\mu_D : X \longrightarrow [0, 1]$$

- Cualquier función μ_D es válida: Su definición exacta depende del **concepto** a definir, del **contexto** al que se refiera, de la **aplicación**.
- En general, es preferible usar **funciones simples**, debido a que simplifican muchos cálculos y no pierden exactitud, debido a que precisamente se está definiendo un concepto **difuso**.

- a) **F. Triangular:** Definido por sus límites, inferior a y superior b , y el valor modal m , tal que $a < m < b$.

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



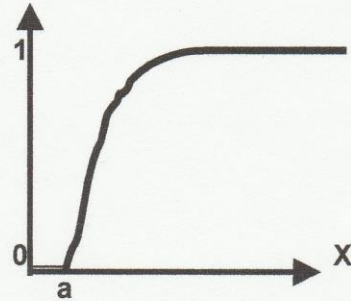
- También puede representarse así:

$$D(x;a,m,b) = \text{máx} \{ \text{mín} \{ (x-a) / (m-a), (b-x) / (b-m) \}, 0 \}$$

b) F. Gamma (Γ): definida por su límite un inferior a , y un valor $k > 0$

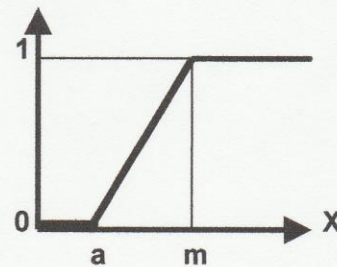
$$D(x) = \begin{cases} 0 & \text{sí } x \leq a \\ 1 - e^{-k(x-a)^2} & \text{sí } x > a \end{cases}$$

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



- Esta función se caracteriza por un crecimiento rápido a partir de a .
- Mientras mayor sea el valor de k , el crecimiento es más rápido.
- La primera definición tiene un crecimiento más rápido.
- Nunca toma el valor uno(1), aunque posee una asíntota horizontal en uno
- Se aproxima linealmente por:

$$D(x) = \begin{cases} 0 & \text{sí } x \leq a \\ (x-a) / (m-a) & \text{sí } x \in (a, m) \\ 1 & \text{sí } x \geq m \end{cases}$$

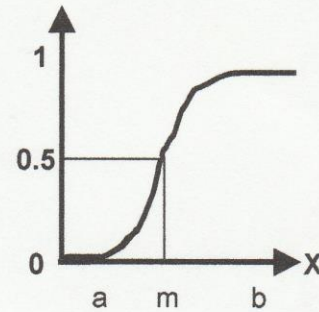


- Existe una función opuesta a la función gamma, conocida como función L

c) **Función S:** Definida por sus límites, inferior a y superior b , y el valor m , que corresponde al punto de inflexión, donde $a < m < b$.

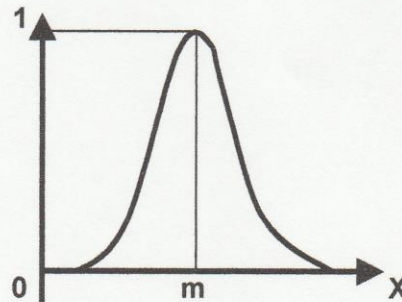
- Un valor característico es: $m = (a + b) / 2$
- El crecimiento es más lento cuanto mayor sea la distancia entre a y b

$$D(x) = \begin{cases} 0 & \text{sí } x \leq a \\ 2 \left\{ \frac{x-b}{b-a} \right\}^2 & \text{sí } x \in (a, m] \\ 1 - 2 \left\{ \frac{x-b}{b-a} \right\}^2 & \text{sí } x \in (m, b) \\ 1 & \text{sí } x \geq b \end{cases}$$



d) **Función Gaussiana:** corresponde a la clásica campana de Gauss, esta definida por su valor medio m y el valor, $k > 0$

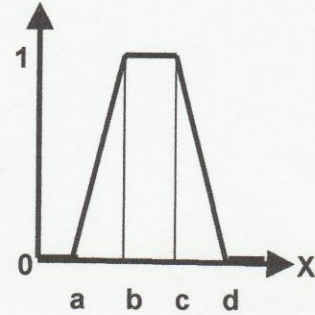
$$D(x) = e^{-k(x-m)^2}$$



- Cuanto mayor sea el valor de k , más se estrecha la campana.

e) **Función Trapezoidal:** Definida por sus límites, inferior a y superior b , y los límites de su soporte, b y c , inferior y superior respectivamente.

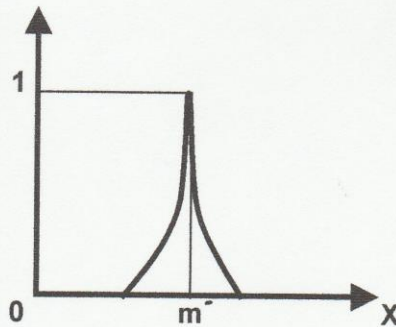
$$D(x) = \begin{cases} 0 & \text{sí } (x \leq a) \text{ ó } (x \geq b) \\ (x-a) / (b-a) & \text{sí } x \in (a, b] \\ 1 & \text{sí } x \in (b, c) \\ (d-x) / (d-c) & \text{sí } x \in (c, d) \end{cases}$$



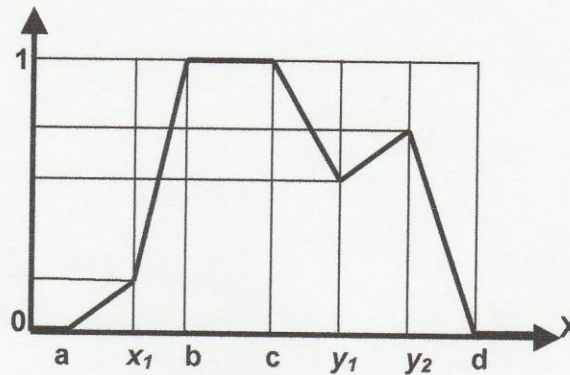
f) **Función Pseudo-Exponencial:** Definida por su valor medio m y el valor de la constante $k > 1$.

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

- Cuando mayor es el valor de k , el crecimiento es más rápido, y la campana es más estrecha.



g) **Función Trapecio Extendido:** Definida por los cuatro valores de un trapecio, a, b, c, d , y una lista de puntos entre a y b , o entre c y d , con su valor de pertenencia asociado a cada uno de estos puntos.



- La función Trapezoidal se adapta bastante bien a la definición de cualquier concepto, con la ventaja de su fácil definición, representación y simplicidad de cálculos.
- En casos particulares, el Trapecio Extendido puede ser de gran utilidad. Este permite gran expresividad aumentando su complejidad.
- En general, **el usar una función más compleja no agrega mayor precisión**, pues debemos recordar que se está definiendo un **concepto difuso**.

4.5. –CALCULO DE LA FUNCION DE PERTENENCIA

Existen diversas formas de calcular las funciones de pertenencia, la elección del método va a depender de la aplicación, del modo en que se manifieste la incertidumbre, y que esta sea medida durante los experimentos. A continuación se hace mención de algunos métodos de cálculo:

a) Método Horizontal:

- Se basa en las respuestas de un grupo de N "expertos"
- Se realiza la siguiente pregunta "¿Puede x ser compatible con el concepto D ?" .
- Sólo se acepta como respuesta un "sí" o un "no", de forma que:

$$D(x) = (\text{respuestas afirmativas} / N)$$

b) Método Vertical:

- Se escogen varios valores para α , y así construir α - cortes.
- Se efectúa la siguiente pregunta, para los valores de α predeterminados, "¿identifique los elementos de X que pertenecen a D con grado no menor a α ?".
- A partir de esos α - cortes se identifica el conjunto difuso D

c) Método basado en la especificación del problema:

- Se requiere una función numérica que sea aproximada.
- El error se define como un conjunto difuso, el que mide la calidad de la aproximación.

d) Método basado en la optimización de parámetros:

- La forma de un conjunto difuso depende de unos parámetros, denotados por el vector \mathbf{p} : representado por $D(\mathbf{x}; \mathbf{p})$.
- Se obtienen algunos resultados experimentales, en la forma de pares (elemento, grado de pertenencia). $(\mathbf{E}_i, \mathbf{G}_i)$, con, $i=1,2,3,\dots, n$
- El problema consiste en optimizar el vector \mathbf{p} , una forma de hacerlo es minimizar el error cuadrático

$$\min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^n (\mathbf{G}_i - D(\mathbf{E}_i; \mathbf{p}))^2$$

4.6. – CARACTERISTICAS DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS

Definición 4.8. – Altura de un conjunto difuso, corresponde al valor más grande de su función de pertenencia:

$$\sup_{x \in X} D(x)$$

Definición 4.9. – Conjunto difuso normalizado, se habla de conjunto difuso normalizado cuando existe algún elemento con grado de pertenencia o su altura sea igual a uno(1),

$$x \in X / \mu D(x) = 1 \quad \text{ó} \quad \text{Altura } (D) = 1$$

En el caso del ejemplo N°4.1, página 11, la altura del conjunto difuso discreto es uno (1), por lo cual diremos también que dicho conjunto es Normalizado

Definición 4.10. - Soporte de un conjunto difuso, el soporte de un conjunto difuso D en el conjunto universal X , es un conjunto clásico que contiene todos los elementos de X donde el grado de pertenencia a D es mayor que cero; es decir:

$$\text{soporte}(D) = \{x \in X / \mu_D(x) > 0\}$$

Se puede definir que un conjunto difuso es vacío cuando el soporte es vacío.

Definición 4.11: α - Corte, el α - corte D_α de un conjunto difuso D , es un conjunto clásico definido de la siguiente manera:

$$D_\alpha = \{x \in X / \mu_D(x) \geq \alpha\} \quad (\text{débil})$$

ó

$$D_\alpha = \{x \in X / \mu_D(x) > \alpha\} \quad (\text{fuerte})$$

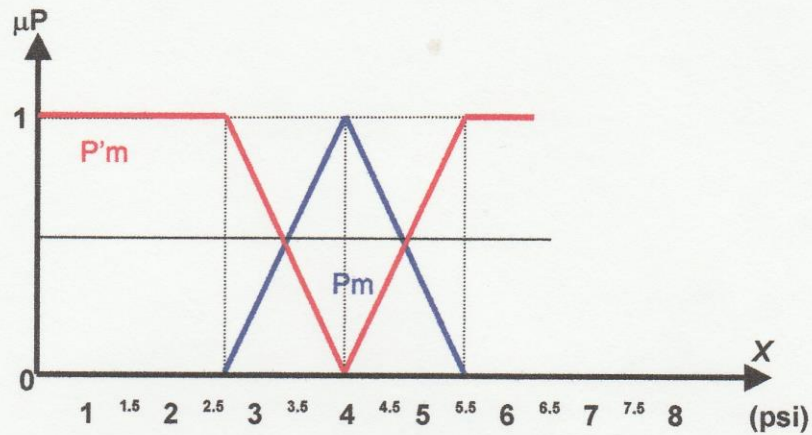
Propiedades:

$$(A \cup B)_\alpha = A_\alpha \cup B_\alpha$$

$$(A \cap B)_\alpha = A_\alpha \cap B_\alpha$$

$$(A')_\alpha = (A_\alpha)'$$

Ejemplo N°4.4 – consideremos el siguiente conjunto difuso, "presión media(P_m)". El gráfico de la función de pertenencia es el siguiente:



por comprensión

$$\mu_{P_m} = \{x \in X \mid 2.5 \leq x \leq 5.5\};$$

por extensión

$$\mu_{P_m} = 2.5/0.1 + 3/0.25 + 3.5/0.5 + 4/1 + 4.5/0.5 + 5/0.25 + 5.5/0.1$$

complemento de P ,

$$\mu_{P'm} = 1/1 + 2/1 + 2.5/0.9 + 3/0.75 + 3.5/0.5 + 4/0 + 4.5/0.5 + 5/0.75 + 5.5/0.9 + 6/1 + 7/1$$

$$\text{soporte}(P) = \{2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5\}$$

$$\text{altura } \text{hgt}(P) = 1$$

α -corte para un $0 < \alpha < 0.5$

$$\alpha\text{-}P = \{2.5, 3, 5, 5.5\}$$

4.7. – OPERACIONES SOBRE CONJUNTOS DIFUSOS

- a) *Normalización*, convierte un conjunto difuso NO normalizado en uno normalizado, dividiendo por su altura:

$$\text{Norm}_D(x) = D(x) / \text{Altura}(D)$$

- b) *Concentración*, la función de pertenencia tomara valores más pequeños, concentrándose en los valores mayores:

$$\text{Con}_D(x) = (D(x))^p, \quad \text{con } p > 1, \text{ (normalmente, } p=2)$$

- c) *Dilatación*, esta operación produce el efecto contrario, al de la concentración, existen dos formas:

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

Estas dos últimas operaciones conocidas como modificadores, permiten, en el caso de la concentración, “estrechar” la función de pertenencia original, ya que al elevar al cuadrado un número entre 0 y 1, se obtiene un valor más pequeño, haciendo de mayor exigencia decidir el valor de una variable. Caso contrario es el de la dilatación, debido a que al extraer raíz cuadrada a un número entre 0 y 1, se obtiene un número mayor, dando menor exigencia al asignar un valor a una variable.

- d) *Intensificación del Contraste*, se disminuyen los valores menores a $\frac{1}{2}$ y se aumentan los mayores:

$$\text{Int}_D(x) = \begin{cases} 2^{p-1} D^p(x) & \text{sí } D(x) \leq 0.5 \\ 1 - 2^{p-1} (1 - D(x))^p & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Con $p > 1$, normalmente $p=2$, a medida que aumenta p mayor la **intensificación**

- e) *Difuminación*, produce el efecto contrario al de la intensificación:

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

5. - LOGICA DIFUSA

La lógica difusa nace en 1965 a partir de la publicación del artículo "*Fuzzy Sets*" escrito por Lofti Zadeh para la revista "*Information and Control*". En contraste con la lógica convencional, que utiliza conceptos absolutos para referirse a la realidad, la lógica difusa la define en grados variables de pertenencia a los mismos, siguiendo patrones de razonamiento similares a los del pensamiento humano.

Si bien ya van más de treinta años desde su aparición formal, es en la década de los 80 donde existe una masificación en la utilización de la lógica difusa, siendo aplicada en diversas áreas en las que se cuentan procesos de control industrial, diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, además de artefactos de uso doméstico, como en sistemas de diagnóstico, etc.

La lógica difusa, corresponde a una lógica multivaluada (las lógicas multivaluadas son aquellas en donde existe más de un valor de verdad que se le asigna a una sentencia). Estas poseen mayor extensión de valores que las lógicas clásicas. Estas últimas pueden ser consideradas lógicas biestable o bivaluadas, debido a que a sus enunciados se les clasifican con dos valores, "*verdadero*" o "*falso*". Esto sin desconocer la importancia que tiene y ha tenido la lógica clásica, las que han ayudado a modelar, desde épocas antiguas, el razonamiento natural.

Es innegable que el razonamiento humano asigna los valores de verdad o falsedad, pero también resulta innegable el hecho de que no todo puede ser tan "determinístico", pues en la definición de algún evento, no necesariamente este va a ser "*blanco*" o "*negro*". Por ejemplo, al definir la estatura de una persona, ésta puede ser alta, pero que tan alta es, aunque esto no implique cuantificar la estatura exacta. De esto último podemos decir

que la lógica difusa, utiliza conceptos (palabras), cuyos valores son expresados lingüísticamente, y no en números.

El concepto de "difuso" viene dado de los valores de verdad "no determinista", que se le asignan a los eventos, debido a que contienen grados de incertidumbre, por ejemplo; ante un vaso con agua, en su nivel medio, este puede estar medio lleno o medio vacío, el hecho de que no se encuentre medio lleno ni medio vacío, posee un grado de incertidumbre, es decir, difusidad.

La lógica difusa es una herramienta poderosa utilizada en sistemas donde la modelación matemática de éstos, no es posible, ya sea por poseer una alta complejidad en su modelación, o por no corresponder a sistemas lineales. Así la lógica difusa pretende dar soluciones a partir de datos no exactos, siendo particularmente útil en aplicaciones electrónicas o computacionales.

La lógica difusa se basa fundamentalmente en asociar sus expresiones a valores (grados) de veracidad o falsedad, lo que proporciona un mayor espectro que el asignar a un evento de verdadero o falso. El objetivo de todo sistema empleador de lógica difusa es describir los grados de las expresiones de salida en términos de los de entrada, existiendo sistemas capaces de refinar los valores de salida en forma que se refinan los valores de entrada. Debido a esta propiedad es que ciertos sistemas de lógica difusa, aparentan una labor de aprendizaje, los que resultan ser excelentes en mecanismos de control de procesos.

Desde el punto de vista tecnológico, la lógica difusa se enmarca en lo que se considera Inteligencia Artificial, lo que ha dado origen a sistemas expertos de tipo difuso y a sistemas de control automático. En la actualidad se utiliza en combinación con redes neuronales constituyendo nuevos sistemas de procesamiento y control, lo que ha ampliado su campo de desarrollo.

5.1. - Principios de la Lógica Difusa

La teoría de conjuntos, el álgebra booleana y la lógica tradicional, poseen una estructura similar, y por tanto definiciones que se realicen en cualquiera de estas tres teorías puede llevarse a las otras dos, con las transformaciones adecuadas.

<i>Teoría de Conjuntos</i>	Álgebra Booleana	Lógica Tradicional
Intersección	Conjunción	And
Unión	Disyunción	Or
Complemento	Negación	Not

Tabla 5.1: Correspondencia entre operadores

El razonamiento lógico consiste en la combinación de proposiciones, para producir nuevas proposiciones, ejemplo de esto sería, "X es A" y "Y es B", utilizando el operador AND, "X es A AND Y es B", la tabla 1 sugiere que esta combinación puede realizarse de forma análoga con el operador Intersección.

Lo anterior es posible porque en la lógica tradicional toda proposición puede tener uno de dos valores: *verdadero* o *falso*, lo que corresponde en la teoría de conjuntos concretos a los únicos dos valores que puede tomar la función de pertenencia para cualquier conjunto: 1 ó 0.

Ahora bien, en lógica difusa una proposición puede representarse por un conjunto difuso: "X es A" corresponde a un conjunto A con función de pertenencia $\mu_A(x)$, mientras que "Y es B" corresponde a un conjunto B con función de pertenencia $\mu_B(y)$, y la combinación de estas dos proposiciones con el operador AND, es decir, la proposición "X es A AND Y es B", corresponde a un nuevo conjunto difuso "A AND B", con función de pertenencia:

$$\mu_{A(x) \text{ AND } \mu_B(y)} = \min [\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

En esta expresión se ha utilizado el operador *min* (de acuerdo a la nomenclatura planteada por Zadeh), para realizar la intersección de los conjuntos A y B. Hay que aclarar que los universos de discurso tanto de A como de B, no son necesariamente el mismo.

En forma análoga esta operación realizada con el operador AND, puede realizarse con el operador lógico OR, el que corresponde a la operación difusa *max*, el que representa la unión de conjuntos difusos.

5.2. - Operador de Implicancia

Existe otro operador lógico utilizado, el que corresponde al de Implicación (\rightarrow), el que combina dos proposiciones con la expresión "SI..... ENTONCES....." (*if.....then.....*), el que es fundamental en las inferencias realizadas en Sistemas Difusos.

La importancia de este operador, es la de encontrar una forma de interpretar proposiciones semejantes a las realizadas en la experiencia común para describir conocimientos, es decir, encontrar un camino matemático para evaluar proposiciones como por ejemplo:

- "Si las vibraciones son altas *Entonces* el rodamiento está desgastado"
- "Si los ingresos del cliente son bajos *Entonces* su capacidad de endeudamiento es poca"

Como se vio en el punto 1.1 existen los operadores lógicos AND, OR, los que pueden ser usados, al igual que el operador de implicancia, en la relación de dos conjuntos difusos, como ejemplo de ésto consideremos (a OR b), que corresponde a o bien b, ahora si consideramos "SI T° es baja *Entonces* activar calefactor", esto es "SI T° es baja o bien activar calefactor"

5.3. - Reglas Difusas

Las *reglas difusas*, relacionan uno o más conjuntos difusos de entrada, llamados "*antecedentes*" o "*premisas*", y se les asocia un conjunto difuso de salida llamado "*consecuente*" o "*consecuencia*". Los conjuntos difusos de entrada se asocian mediante conjunciones lógicas como *y*, *o*, etc. Una regla típica es del tipo IF- THEN, mencionada anteriormente.

Dos razones explican el hecho de que la regla "*si entonces*" tengan una posición central en las aplicaciones de la lógica difusa, la primera es que el uso de variables lingüísticas permite moldear el comportamiento de sistemas que no se prestan a un análisis mediante ecuaciones diferenciales. La segunda es que el uso de reglas "*si - entonces*", permite explotar la tolerancia a la imprecisión y verdades parciales, con el fin de facilitar su tratamiento en aplicaciones reales. Las *reglas difusas* permiten expresar el conocimiento disponible sobre la relación entre uno o más conjuntos difusos de entrada y uno o más conjuntos difusos de salida (antecedentes y consecuentes). Para expresar este conocimiento de forma completa por lo general se necesitan de varias reglas, las que se agrupan formando la que se conoce como **base de reglas**, esto es, un conjunto de reglas que expresan las relaciones entre antecedentes y consecuentes. Esta base de reglas se puede representar mediante tabla de las reglas que la forman, o bien como una matriz conocida como memoria asociativa difusa FAM (*Fuzzy Associative Memory*). Estas representan la consecuencia de cada regla definida para cada combinación de dos entradas, además las FAM permiten realizar una representación gráfica de las relaciones entre dos variables lingüísticas de entrada y la variable lingüística de salida, debiéndose indicar todas las combinaciones que dan como resultado las reglas del controlador. (En la figura 6.5 del capítulo 6, se ve un ejemplo de FAM).

Formalmente una base de reglas difusas es una colección de reglas con el siguiente formato:

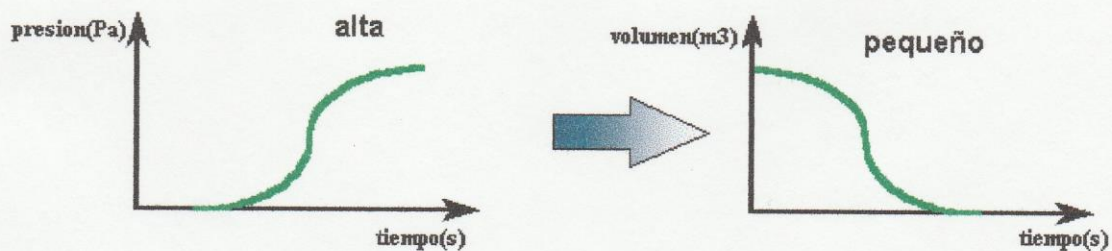
“Si x_1 es A^l_1 and..... and x_n es A^l_n ENTONCES y es B^l ”

donde, A^l y B^l son conjuntos difusos que pertenecen a sus respectivos universos de discurso, en tanto x e y son variables lingüísticas. Este formato de reglas se conoce como *difuso puro o de tipo Mamdani*, por ser él quien lo propuso para realizar un controlador que estabiliza un sistema en torno a su punto de trabajo.

Las reglas tipo Mamdani, permiten expresar el conocimiento previo disponible sobre el sistema, expresando así el adquirido durante el proceso de optimización de éste.

Ejemplo 5.1: Estilo Mamdani

- Si la presión es alta, ENTONCES el volumen es pequeño



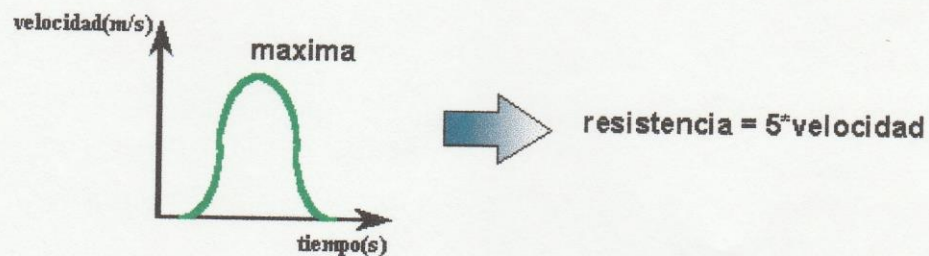
Existe otro formato frecuentemente utilizado el llamado tipo Sugeno, donde la función de salida es una combinación lineal de las variables de entrada, esto es, simplifican los cálculos de salida, pero en general no resultan tan adecuados para expresar el conocimiento de los expertos.

De manera más general, resulta ser una función genérica de las variables de entrada:

“Si x_1 es A^e_1 and..... and x_n es A^e_n ENTONCES $y^e = f^e(x)$ ”

Ejemplo5.2: Estilo Sugeno

- Si la velocidad es máxima, ENTONCES la resistencia = 5 * velocidad



El método de Takagi-Sugeno-Kang de inferencia difusa, conocido comúnmente como método de Sugeno, introducido primero en 1985, es similar al método de Mamdani en muchos aspectos. De hecho ambos métodos de inferencia difusa procesan, fuzifican las entradas y la aplicación del operador difuso, es exactamente igual. La diferencia principal está en que el rendimiento del número de funciones de pertenencia sólo es lineal o constante para el método inferencia difusa de Sugeno.

Si llamamos M al número de reglas IF – THEN de la base de reglas entonces $\ell = 1, 2, 3, \dots, M$ en las ecuaciones anteriores. El vector x representa el conjunto de las entradas, mientras que y es la salida del sistema difuso. Los sistemas difusos con n -entradas y una sola salida se conocen como MISO (*Multiple Input Single Output*), mientras que los que tienen varias salidas, se conocen como MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Para este último sistema, se puede generalizar el formato anterior de las reglas, o bien descomponerlo en n - sistemas MISO.

5.4. - Inferencia en Lógica Difusa

Consiste en la combinación de proposiciones para producir nuevas proposiciones. La inferencia en la lógica difusa, interpretan las reglas del tipo IF- THEN de una base de reglas, con el fin de obtener los valores de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema. Así al combinar la proposición "X es A" con la proposición "IF X es A THEN Y es B", se puede inferir la proposición "Y es B"

Una inferencia como la presentada, sólo es posible en la lógica tradicional si la primera proposición ("X es A") es idéntica a la primera parte de la segunda proposición ("(IF) X es A"); sin embargo, en la lógica difusa estas dos proposiciones no necesariamente deben ser idénticas, debido a que las fronteras de los conjuntos no son precisas. Así, al combinar la proposición "X es A*" con la proposición "IF X es A THEN Y es B", puede obtenerse la proposición "Y es B*"

5.5. - Sistemas de Lógica Difusa

La inferencia en la lógica difusa, permite obtener conjuntos difusos de la combinación de otros conjuntos difusos utilizando las reglas IF- THEN, de esta forma se aprovecha este mecanismo para el cálculo de un sistema cuyas entradas y salidas son números concretos.

La estructura básica de un Sistema de Lógica Difusa se muestra en la figura. El sistema recibe varias entradas numéricas y entrega varias salidas numéricas. El bloque *Fuzificador* se encarga de convertir las entradas en conjuntos difusos, que son entregados al bloque *Dispositivo de Inferencia*; este bloque, apoyado en un conjunto de reglas de la forma *IF... THEN...* almacenadas en la *Base de Reglas*, produce varios conjuntos difusos para que el bloque *Defuzificador* los tome y los convierta en salidas numéricas concretas.

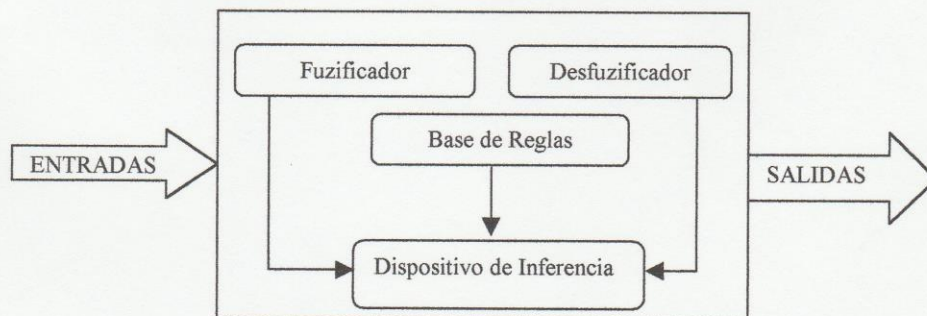


Figura5.1: Estructura de un Sistema de Lógica Difusa

Cada una de las variables de entrada y de salida tiene una representación dentro del Sistema de Lógica Difusa en forma de *Variables Lingüísticas*. Una variable lingüística tiene, entre otras cosas, una colección de atributos que puede adquirir la variable, y cada atributo está representado por un conjunto difuso.

6. - MODELOS DIFUSOS

Los modelos difusos son una aplicación muy útil que se da a los conjuntos difusos, su objetivo es construir un *modelo* para un determinado sistema con las siguientes características:

- Operar al nivel de Términos Lingüísticos
- Representar y procesar Incertidumbre.

Los modelos difusos empleados en el control de procesos tienden a seguir la misma metodología empleada en el diseño de sistemas de control clásico, esto es: en primer lugar el diseño conceptual es hecho en papel una vez que se ha entendido tanto la mecánica del comportamiento del sistema como su dinámica en términos de entrada/salida; acto seguido se procede a un ciclo de modelado y simulación, y así sucesivamente hasta obtener el resultado deseado. Cabe aclarar que el proceso descrito anteriormente puede apoyarse en herramientas computacionales especializadas.

Es importante destacar que la definición de las etiquetas lingüísticas afectará mucho al procesamiento que efectúe el modelo, por lo cual la colección de conjuntos difusos debe elegirse cuidadosamente. Pueden definirse varios modelos difusos dependiendo de la *Granularidad o Densidad* de los conjuntos difusos definidos.

Entiéndase por *granularidad* la propiedad de los conjuntos difusos en cuanto a la diferencia que exista entre los grados de pertenencia de los elementos comprendidos en él. Para entender mejor este concepto veamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo 6.1: considérese el conjunto difuso discreto A , definido por los números entre 5 y 8, ahora bien para este conjunto daremos dos definiciones de sus elementos A_1 , y A_2

Para A_1 consideraremos sólo los números enteros entre 5 y 8.

$$A_1 = 0.1/3 + 0.5/4 + 1/5 + 1/6 + 1/7 + 1/8 + 0.5/9 + 0.1/10$$

Y para A_2 consideraremos distintos números entre 5 y 8.

$$A_2 = 0.1/3 + 3.5/0.2 + 0.5/4 + 0.7/4.5 + 1/5 + 1/6 + 1/7 + 1/8 + 8.5/0.7 + 0.5/9 + 9.5/0.2 + 0.1/10$$

De estos dos conjuntos diremos que A_2 , posee una granularidad más fina, debido a que entre dos elementos consecutivos existe menor diferencia entre sus respectivos grados de pertenencia.

Para los sistemas difusos, el método de diseño se efectúa de acuerdo con el siguiente ciclo:

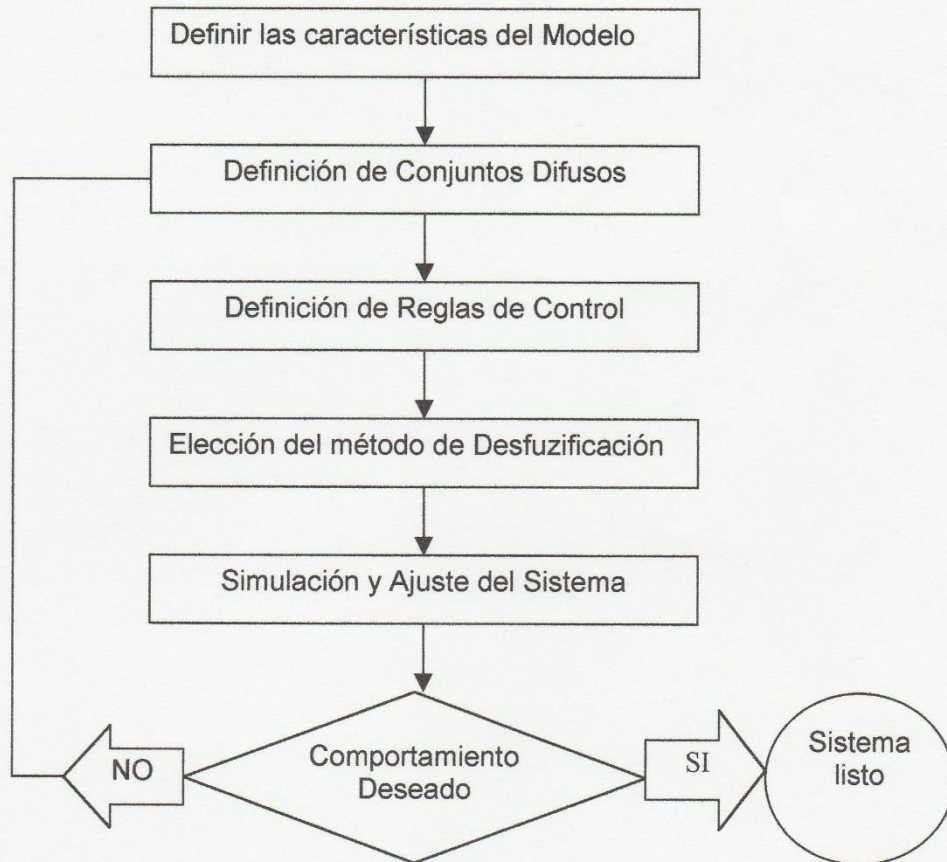


Fig. 6.1. - Ciclo de la metodología de Diseño

A continuación se dará una descripción de las etapas mostradas en el diagrama anterior.

6.1. - Definición de Características del Modelo.

En esta etapa se definen las características funcionales y operacionales del modelo, aquí la tarea del diseñador consiste en definir (aunque se carezca de un modelo matemático del sistema):

- Los datos de entrada al sistema.
- Las transformaciones básicas que se aplicarán a los datos.
- Los datos de salida del sistema.

También se debe definir donde exactamente va a ser ubicado físicamente el sistema difuso en la arquitectura total del sistema, lo anterior con la finalidad de proporcionar una clara visión de la forma en que los datos estarán fluyendo hacia y desde el sistema difuso, además de que se proporciona una gran ayuda al diseñador para la estimación de los números y rangos de las entradas y salidas difusas requeridas.

6.2. - Definición de los Conjuntos Difusos (Fuzificación).

El Fuzificador establece una relación entre puntos de entrada no difusos al sistema, y sus correspondientes conjuntos difusos en el universo de discurso, (las variables procedentes del exterior serán, en general, valores no difusos, y habrá que fuzificarlos previamente)

Para el proceso de definición de los conjuntos difusos en sistemas de control, primero se identifican y nombran las variables de entrada y de salida y se establecen sus rangos, por ejemplo:

Entrada: Temperatura [110, 330]°C, Presión [100,2300] Pa

Salida: Acción de válvula [-600, +600] mm/s

Como segundo punto, cada variable es descompuesta en un grupo de términos difusos. Cada término representa un conjunto difuso en el universo de discurso de la variable.

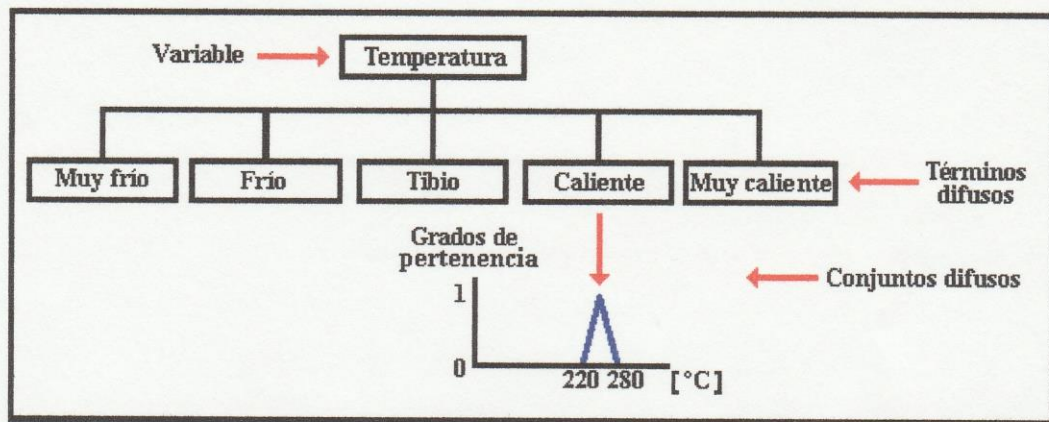


Fig. 6.2. - Descomposición de una variable en sus términos difusos.

Para la definición de los conjuntos difusos se recomienda tener en cuenta los siguientes puntos:

- El número de términos difusos (conjuntos) asociados a cada variable debe ser, generalmente un número impar entre 5 y 9.
- Para producir una acción de control suave, cada conjunto debe traslaparse un poco sobre los conjuntos vecinos. El traslapamiento debe ser entre 10% y 50% del espacio ocupado por el conjunto vecino. La suma de las pertenencias de los puntos verticales del traslapamiento siempre debe ser igual o menor a 1.

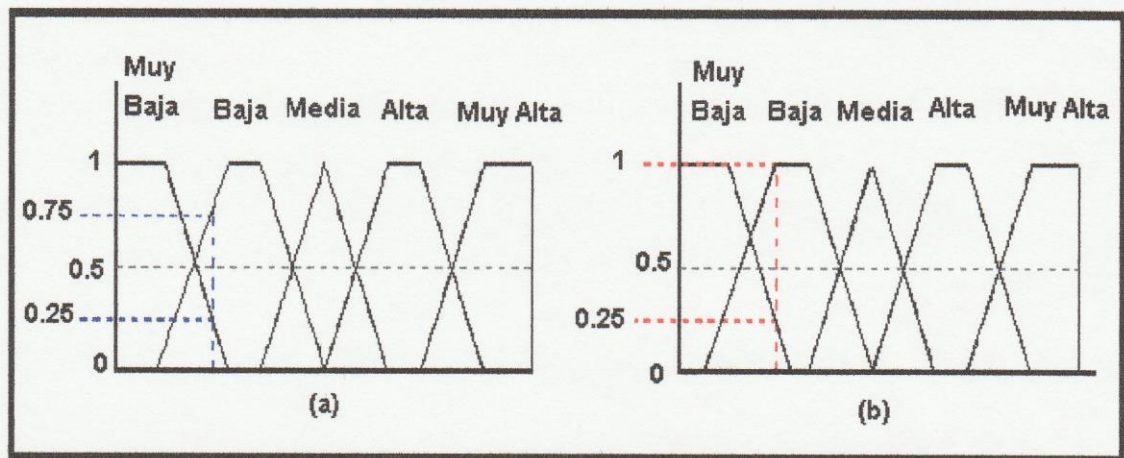


Fig. 6.3. - Traslape de las particiones de los conjuntos difusos.

- (a). Partición difusa traslapada correctamente.
- (b). Partición difusa traslapada incorrectamente.

- La densidad de los conjuntos difusos debe ser mayor alrededor del punto óptimo de control del sistema y menor conforme aumenta la distancia a ese punto.

De acuerdo con las recomendaciones anteriores, un ejemplo de conjuntos de entrada y salida es:

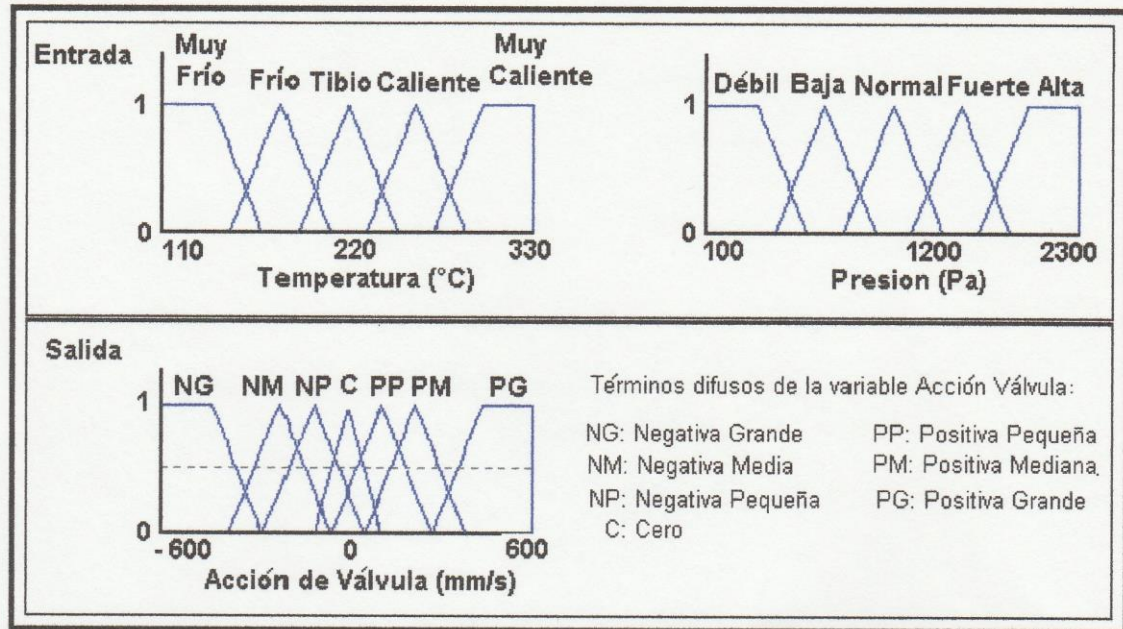


Fig. 6.4. - Ejemplo de conjuntos para entrada y salida

6.3. - Número de Reglas.

El número de reglas que requiere un controlador difuso se halla multiplicando el número de términos difusos de las variables de entrada. De esta manera las reglas cubrirán todas las posibles combinaciones provenientes de las distintas entrada.

Como ejemplo, para un sistema con dos variables de entrada cada una con 5 términos difusos existen $5 * 5 = 25$ combinaciones de entrada y por lo tanto 25 reglas de control.

6.4. - Orden de las Reglas.

Las reglas de control difusas son declarativas y no secuenciales, lo que significa que el orden en que se expresan no es importante.

Como una medida preventiva para el mantenimiento del controlador es recomendable agrupar las reglas de acuerdo a las variables de sus premisas:

SI Temperatura Es Fría Y Presión Es Alta ENTONCES Acción de válvula Es Positiva pequeña.

SI Temperatura Es Fría Y Presión Es Media ENTONCES Acción de válvula Es Positiva normal.

SI Temperatura Es Fría Y Presión Es Baja ENTONCES Acción de válvula Es Positiva grande.

SI Temperatura Es Media Y Presión Es Alta ENTONCES Acción de válvula Es No operar.

SI Temperatura Es Media Y Presión Es Media ENTONCES Acción de válvula Es No operar.

SI Temperatura Es Media Y Presión Es Baja ENTONCES Acción de válvula Es Positiva.

6.5. - Diseño de una Base de Reglas.

Para diseñar una base de reglas se utiliza una matriz que cubre todas las posibles combinaciones de las entradas.

Para un sistema con dos entradas se asigna una entrada a cada eje de la matriz y existirán tantas divisiones en cada eje como términos difusos tengan la variable que le corresponde:

En cada celda de la matriz se escribe la acción de control que sugeriría la regla que tendría esa combinación de entradas como premisa. De la matriz se pueden derivar todas las reglas que formarían una base completa.

Sí el sistema cuenta con tres entradas se utiliza una matriz por cada término lingüístico de la tercera variable.

		Presión				
		MB	B	M	A	MA
Temperatura	MF	PG	PG	P	P	NO
	F	PG	PG	P	NO	N
	T	P	P	NO	N	N
	C	P	NO	N	NG	NG
	MC	NO	N	N	NG	NG

Si Temperatura es T Y Presión es MB
ENTONCES Acción de válvula es P

Temperatura	Presión
MF - Muy fría	MB - Muy baja
F - Fría	B - Baja
T - Tibia	A - Alta
C - Caliente	M - Media
MC - Muy caliente	MA - Muy alta

Acción de válvula
PG - Positiva grande
P - Positiva
NO - No operar
N - Negativa
NG - Negativa grande

Fig. 6.5. - Ejemplo de diseño de una base de reglas(FAM).

En algunos casos es posible utilizar menos reglas pero no es recomendable hacerlo, puesto que las reglas representan conocimiento, si alguna es eliminada, se remueve conocimiento del sistema, conocimiento que puede volverse importante si el sistema es modificado después.

6.6. –Decodificado de la salida: Desdifusificación.

Elección del Método de Desdifusificación.

En esta etapa se produce la acción de control no difusa, que es representada por la función de pertenencia de la acción de control. Existen varios métodos para llevar a cabo estrategias de desdifusificación, pero los más utilizados son los que se señalan a continuación:

6.6.1. – Métodos de Desfuzificación

- MÉTODO DE DESDIFUSIFICACIÓN DE TSUKAMOTO.

Sí empleamos una función de pertenencia monótona, entonces la acción de control puede calcularse mediante:

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

donde n es el número de reglas cuyo valor de la función de pertenencia es mayor que cero (W_i), y X_i es la suma de la acción de control recomendada por la regla i .

- MÉTODO DEL CENTRO DE ÁREA (COA).

Este método es sensible al resultado de todas las reglas al momento de hacer la desfusificación, lo que produce una salida de control más suave.

Asumimos que se produce una acción de control con una función de membresía dada por μ_c . El método de centro del área calcula el centro de gravedad de la distribución para la acción de control. Asumiendo un universo de discurso discreto:

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^q z_j \mu_c(z_j)}{\sum_{j=1}^q \mu_c(z_j)}$$

donde q es el número de niveles de cuantización de salida, Z_j es la suma de las salidas de control en el nivel de cuantización j y $\mu_c(Z_j)$ representa los valores de la función de membresía en μ_c . En otras palabras, este método asigna el centro del área de la salida difusa final al valor desfusificado. El centro de área también es llamado centro de gravedad o centroide.

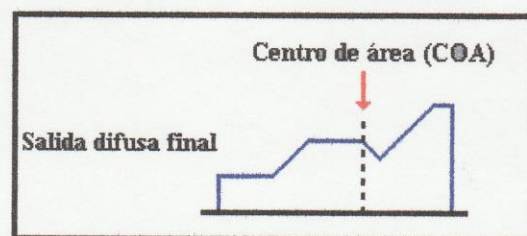


Fig. 6.6. - Método de desfusificación de Centro de Área(COA).

- MÉTODO DE LA MEDIA DEL MÁXIMO (MOM).

Aquí el valor para llevar a cabo la acción de control se obtiene tomando el promedio de los valores de membresía máximos, es decir, este método genera como valor desdifusificado la media de todos los valores que alcanzan el mismo máximo en la salida difusa final.

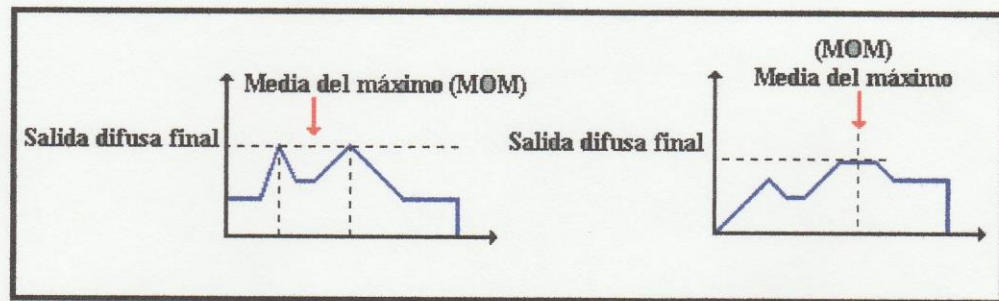


Fig. 6.7. - Método de desdifusificación de Media del Máximo (MOM).

Para un universo discreto, se calcula:

$$Z^* = \sum_{j=1}^l \frac{z_j}{l}$$

donde l es el número de valores cuantizados z cuya función de membresía es máximo.

- MÉTODO DEL CRITERIO DEL MÁXIMO.

Este método considera únicamente la acción de control sugerida por la regla cuya conclusión fue evaluada con el valor de verdad más alto. El punto de desfusificación encontrado por este método es el que se encuentra donde la salida difusa final alcanza su valor máximo por primera vez, en el sentido de los valores crecientes del eje horizontal.

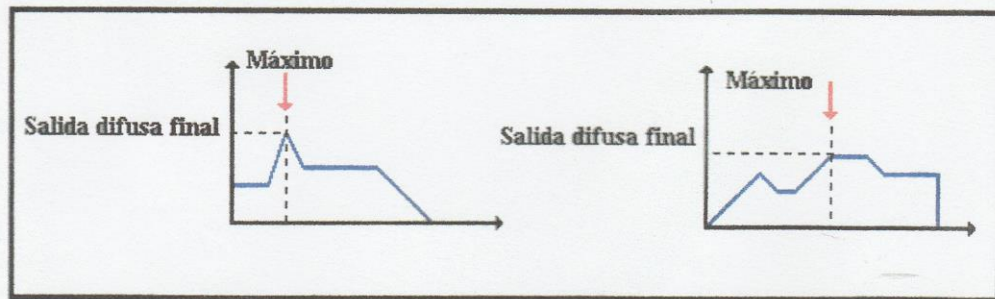


Fig. 6.8. - Método de desfusificación de Criterio del Máximo.

6.7. –Simulación y Ajuste del Sistema.

Cuando el modelo difuso ha sido construido, el proceso de simulación y desarrollo del prototipo comienza. En lo que se refiere a la simulación, ésta puede realizarse en varios paquetes computacionales disponibles en el mercado. Generalmente estos paquetes incluyen herramientas para evaluar el modelo difuso y aislar problemas en los conjuntos difusos o en la base de reglas.

Cuando los resultados de la simulación o las pruebas no son satisfactorias, se realizan ajustes en las descripciones de los conjuntos difusos o en las acciones de control sugeridas por las reglas, hasta afinar el desempeño del control.

El modelo es comparado con casos similares conocidos para validar los resultados y terminar el desarrollo del control.

7. - APLICACIONES

La teoría de los conjuntos difusos ha sido aplicada en una amplia gama de áreas, esto dada la facilidad que tiene de representar conocimientos, la biología, la medicina, ecología, y donde ha tenido mayor desarrollo, o ha alcanzado importantes logros, es en el campo tecnológico de la ingeniería en sistemas de control. Se ha empleado también en la solución de problemas sociológicos, psicológicos, políticos, administrativos, económicos, epidemiológicos y de otras disciplinas. Existen paquetes como el Fuzzy Decisión Maker, que ayudan a las personas a tomar decisiones de todo tipo, como por ejemplo solucionar un problema familiar.

Es en países de Oriente donde ha tenido una mejor acogida, ejemplo de esto es Japón, donde fue empleada en el sistema de control de arranque y frenado del metro de la ciudad de Sendai. En la actualidad se encuentran aplicaciones en diversos productos de uso domésticos. En Occidente la acogida fue menos positiva. Razón de esto puede ser, probablemente con la cultura, en Oriente aceptan que el mundo no es blanco o negro, verdad o mentira, en cambio en la cultura Occidental todo es A o B, mientras que en lógica difusa todo es cosa de grados.

En general la lógica difusa es aplicable en todo campo donde sea difícil o casi imposible crear un modelo, en sistemas controlados por expertos humanos, en sistemas donde se tienen entradas y salidas que son continuas y complejas, en sistemas que utilizan observaciones humanas como entradas o reglas básicas, y en cualquier sistema en el cual se trabaje con conceptos vagos o imprecisos.

Actualmente, muchos productos de uso corriente (cámaras fotográficas y de video, lavadoras, aparatos de aire acondicionado, refrigeradores, alarmas, electrodomésticos, etc.), así como una gran variedad de controladores industriales, dispositivos médicos, sistemas de seguridad en

reactores nucleares, robots y otros sistemas relativamente complejos, están basados en la lógica difusa.

A continuación se presentaran algunos casos en distintas áreas donde la lógica difusa se ha empleado para dar solución a diversos problemas.

- **Aplicaciones en Medicina**

Diagnóstico médico utilizando lógica difusa:

E. Sánchez escribió un trabajo llamado "Medical diagnosis and composite fuzzy relations" en donde formalizaba el proceso de diagnóstico médico y lo interpretaba como una composición de relaciones difusas.

Para una patología dada, vamos a denotar **S** el conjunto de síntomas, **D** al conjunto de diagnósticos y **P** al conjunto de pacientes. Vamos a llamar "conocimiento médico" a la relación difusa, generalmente denotada por **R: S→D** que expresa asociaciones entre síntomas y diagnósticos o un grupo de diagnósticos.

Sea **A** un subconjunto difuso de **S**, es decir los síntomas del paciente actual. **R** una relación difusa de **S** en **D**, entonces el cómputo de la composición *sup-min* sobre **B** es igual a **R◦A** y define el estado del paciente en términos del diagnóstico como un subconjunto difuso **B** de **D**, caracterizado por la siguiente función de pertenencia:

$$\mu_B(d) = \sup_{s \in S} \{ \min[\mu_A(s), \mu_R(s,d)] \} \quad d \in D$$

También es utilizada en acupuntura, en análisis de ritmo cardíaco o de la arterioestenosis coronaria.

- **Aplicación en la Evaluación Agro - ecológica de tierras**

En términos generales, los sistemas tradicionales cualitativos de evaluación de tierras siguen un enfoque booleano o basado en reglas. Sin embargo, existe un convencimiento creciente de la incapacidad de este enfoque para analizar la naturaleza inexacta o difusa de muchos de los aspectos de los recursos terrestres.

El uso de esta metodología en la evaluación de tierras es de particular importancia ya que es posible minimizar el efecto de cualquier característica de tierras cuando alcance un valor inmediatamente exterior a su rango establecido. De esta forma, la rígida lógica booleana en la aptitud de tierras, tal y como determinada por las características seleccionadas, es remplazada por funciones difusas de pertenencia. En los casos a evaluar que corresponden claramente a las clases definidas se les asigna un valor de pertenencia (MF) igual a 1, mientras que en aquellos que no entran en dichas clases se les asigna un valor de pertenencia entre 0.0 y 1.0, dependiendo del grado de cercanía a la clase definida. De acuerdo con ello, la lógica booleana admite sólo dos posibilidades de pertenencia: completa (MF = 1) o nula (MF=0).

Las características de tierras facilitadas en clases se convierten así en grados de pertenencia dependiendo de los valores de las características. La valoración global de la aptitud de las unidades de tierras se basa entonces en un factor de ponderación de las características relevantes de tierras. La función conjunta de pertenencia (JMF) proporciona una suma ponderada para las diferentes características de tierras (A, B, ...Z) de la siguiente forma.

$$JMF_x = a_A MFA + a_B MFB + \dots + a_Z MFZ \quad (4)$$

donde

$$a_A + a_B + \dots + a_Z = 1 \quad (5)$$

La calibración de estas ponderaciones (aA , aB ... aZ) resulta de vital importancia y se suele obtener en base al conocimiento experto local, a datos experimentales o calculados mediante anteriores métodos de evaluación de tierras, etc.

En resumen, la utilización de la estricta álgebra booleana: verdadero o falso, al igual que un modelo rígido y exacto se muestra a menudo inapropiada para la evaluación de tierras debido a la naturaleza continua de la variabilidad de los suelos, a las dudas asociadas a la descripción del fenómeno en sí, a la imprecisión de las mediciones que ello conlleva, o a la incapacidad de formular adecuadamente las cuestiones. De todos modos, la evaluación de tierras que emplean los modelos de lógica difusa también está sujeta a las limitaciones de los datos y del conocimiento de partida al igual que el resto de los métodos.

- ***Aplicación en la traducción de variables auditivas a visuales.***

En la obra "ID-FUSIONES", realizada por Rodrigo F, Cádiz con Luz María Cury, se utilizó un modelo difuso para realizar la traducción de variables auditivas a visuales. Un modelo de este tipo recibe como parámetros las variables auditivas frecuencia, amplitud, duración y espectro y entrega como salida las variables visuales de color, forma, tamaño y movimiento. Para cada una de las ocho variables el sistema establece relaciones de pertenencia a distintas categorías. Por ejemplo, una frecuencia determinada puede ser considerada por el modelo como "muy baja", "baja", "mediana", "alta" o "muy alta" dependiendo de la situación. Las relaciones

entre las distintas variables se regulan mediante reglas de decisión difusas, que gobiernan el comportamiento de todo el modelo.

Una regla de decisión de este tipo podría ser por ejemplo, la siguiente:
"Si la frecuencia es muy baja entonces el color es muy bajo, la forma es medianamente compleja, el tamaño es grande y el movimiento es mediano"

Este modelo resultó ser muy eficaz y útil para la conversión entre variables auditivas y visuales.

- ***Aplicación en Cámaras de Video***

Dentro de esta área, se reconocen cuatro aplicaciones basadas en lógica difusa, enfoque automático, exposición automática, balance automático del objetivo, y sistema de estabilización de imagen. La técnica de autofocus utiliza medidas aproximadas de precisión de reglas difusas en el control de la velocidad de un motor, mejorando la calidad del enfoque, y reduciendo el tiempo de enfocamiento. Un total de 13 reglas simple a *"Sí la precisión es alta y su diferencial es bajo, entonces la velocidad del motor es lenta"*, da como resultado la disminución del tiempo de captura, ahorro de energía, y disminución del desgaste y deterioro del motor.

- ***Aplicación en el Sistemas de Trenes de Sendai, Japón.***

Es la aplicación más celebrada dentro de las diversas utilidades dadas a la lógica difusa. El controlador de operaciones del tren subterráneo automático de Sendai captó la atención de todos los ingenieros de control de todo el mundo. Se desafió la creencia común que el enfoque basado en la lógica difusa no podía ser utilizada en una situación de seguridad controlada.

El equipo Hitachi diseñó, desarrolló, y comparó controladores convencionales PID y controladores difusos, 300000 pruebas de simulación, del mismo que en 3000 recorridos de tren sin conductor con un hardware real. La estrategia usada con operadores de trenes con experiencia fue implementada en reglas difusas, que ejecutó en un "control difuso predictivo". El control de velocidad durante el viaje, control de frenado cercanos a las zonas de estaciones, y cambio de control fueron determinados por reglas difusas que procesaron medidas provenientes de un sensor y consideraron factores tales como comodidad y seguridad para los pasajeros.

Este sistema está en uso desde 1986 Este controlador redujo el tiempo de detención, aumentó la comodidad, y disminuyó el consumo de potencia en un 10%. Basado en el éxito de esta experiencia, Hitachi recibió una licencia para implementar un controlador similar para el sistema de trenes subterráneos de Tokyo.

- ***Aplicación en Horno de Cemento***

Las técnicas difusas fueron para implementar un sistema experto, llamado Linkman, para el ciclo de cemento azul y SIRA en Dinamarca. El sistema incorpora la experiencia de operadores, facilitando la producción de cemento desde 1982, siendo la primera gran aplicación industrial de sistemas difusos. Un mezclador, con diversos ingredientes de cemento, tritura con más eficiencia con un controlador más suave.

Las técnicas convencionales fueron abandonadas por la falta de un modelo matemático del mezclador de cemento.

La lista de aplicaciones que se le ha dado a la lógica difusa hasta el momento no ha tenido freno, de los ejemplos citados, también se pueden nombrar los televisores SONY que ajustan el brillo, contraste, tinte, en forma automática; la empresa NISSAN la incorporó en sus vehículos con transmisión automática; MITSUBISHI la aplica en el control de ascensores. En los Estados Unidos la compañía OTIS también esta desarrollando aplicaciones en esta industria.

En el campo de la ingeniería civil, en América Latina, la lógica difusa está siendo utilizada en el control de cierre de compuertas en presas (Chile), control de tráfico (Puerto Rico), control de secado de hojas de tabaco (Cuba), control de balanceo en puentes grúa, control de líquidos en contenedores, y se espera que su aplicación se generalice de manera notable en los próximos años.

7.1. – Utilización de la Lógica Difusa en combinación con otras tecnologías - Sistemas Híbridos.

Últimamente se han destacado varias formas de sistemas híbridos que combinan lógica difusa con redes neuronales y algoritmos genéticos, y la utilización en sistemas de control donde se emplean conjuntamente control difuso con control convencional.

- ***Sistemas Neuronales – Difusos (Neuro-Fuzzy Systems)***

Hay muchos trabajos de investigación y desarrollo industrial que vinculan redes neuronales y la lógica difusa. Usando estas dos técnicas en forma complementaria se logran mejores resultados dado que cada una aporta su mejor característica creando así una nueva forma de resolver problemas.

Se utiliza a las redes neuronales en los sistemas híbridos, para determinar las funciones de pertenencia, o para validar la base de conocimiento. Las redes neuronales funcionan muy bien en los casos en donde no se conocen las reglas del problema. Cuando estas reglas se conocen y son vagas, no hay que dudar en utilizar lógica difusa.

Es muy difícil conocer cuantos conjuntos difusos necesitará el sistema difuso que se desarrolla, o cuál va a ser la forma de sus funciones de pertenencia, o cómo se interpretarán los conectivos lógicos. Las primeras dos preguntas las responden las redes neuronales. Los sistemas difusos no tienen capacidad de aprendizaje, problema que se solucionó con los sistemas híbridos que mencionamos.

- **Algoritmos Genéticos Difusos**

Las aplicaciones sobre algoritmos genéticos combinados con control difuso han sido investigadas no sólo en el terreno académico, sino también en el ámbito comercial. Los algoritmos genéticos son buenos para ajustar las funciones de pertenencia del sistema, encontrando soluciones adecuadas acorde a la función de evolución.

- **Sistemas de control Difuso - PID**

Los sistemas PID para control son usados en la solución problemas convencionales, generalmente problemas lineales. La sigla PID representa Proporcional – Integral - Diferencial.

Para ciertas aplicaciones, los sistemas Difusos y PID son empleados juntos como un controlador híbrido. El controlador PID puede ser usado para aproximar y generar una respuesta rápida, mientras tanto el controlador difuso ajusta la respuesta para ganar rendimiento.

8. - Historia De Los Sistemas De Control Difuso

El Ingeniero Británico Ebrahim Mamdani fue el primero en usar lógica difusa en un Sistema de Control práctico, y esto sucedió casi por accidente. En los inicios de los 70s fue desarrollado un sistema de control para un equipo de ingenieros, usando la experiencia de un operador humano. Este original plan llevó a la creación de un Sistema basado en la teoría de decisión Bayesiana; un método de definición de probabilidades en situaciones inciertas que considera eventos reales, para modificar predicciones acerca de futuros resultados.

El operador humano ajustaba la válvula y el calor de la caldera como se requería para mantener la velocidad y presión de la caldera. Mamdani incorporó la experiencia de él, en un algoritmo inteligente (fórmulas matemáticas) que aprendió a controlar la máquina. Mamdani pronto descubrió, que el algoritmo ejecutaba el proceso pobremente en comparación con el operador humano. Un mejor método, podría ser, crear una descripción abstracta del comportamiento de la máquina.

Mamdani decidió usar entonces el método de la inteligencia artificial, combinando la experiencia humana con una serie de reglas lógicas por medio del uso del conocimiento. Mientras ellos estuvieron escribiendo reglas tradicionales usando el lenguaje de computación LISP, investigaron nuevas técnicas desarrolladas por Lotfi Zadeh en el uso de reglas difusas en algoritmos para análisis y toma de decisiones en Sistemas Complejos. Mamdani inmediatamente decidió intentar y producir un controlador difuso basado en una combinación de lingüística y variables matemáticas.

A finales de los años setenta, dos ingenieros Daneses, Lauritz Peer y Jens Jurgen, desarrollaron el primer Sistema de control difuso comercial para un horno de cemento; también crearon uno para un horno de frutas en Suecia, y muchos otros.

En conclusión, algunos de los Sistemas donde las técnicas difusas son necesarias, o benéficas son:

- Sistemas complejos, donde es muy difícil o imposible crear un modelo.
- Sistemas controlados por expertos humanos.
- Sistemas con complejas y continuas entradas y salidas.
- Sistemas que usan observaciones humanas como entradas o como reglas básicas.
- Sistemas que son naturalmente vagos como las ciencias sociales o relativas al comportamiento, la conducta y el proceder.

9. - Diseño de un Controlador Difuso

Diseñar un controlador significa esencialmente escribir las reglas de control, determinando los antecedentes y los consecuentes. Para determinar los antecedentes hay que:

- 1º Seleccionar la información de entrada que se va a incluir en los antecedentes.
- 2º Fijar las particiones difusas.
- 3º Fijar los parámetros de las funciones de pertenencia.

En lo que concierne a los consecuentes, como la salida de control (entrada del proceso a controlar) está determinada por el propio proceso, lo único que hay que hacer es fijar los parámetros de las funciones de pertenencias. Así pues, el verdadero problema en el diseño de controladores difusos, es determinar los antecedentes. Hay tres métodos: conocimiento de los expertos, modelos de operador y modelos difusos de procesos.

En los últimos tiempos se han desarrollado en forma prominente tecnologías relacionadas con funciones y características humanas, ya sean del campo psicológico (como la inteligencia artificial) o del campo de los procesos biológicos (como las redes neuronales, los algoritmos genéticos y la programación evolutiva). Estas tecnologías denominadas "Tecnologías inteligentes" pretenden representar el conocimiento en forma entendible para los humanos y al mismo tiempo manejable por la computadora.

Como elemento de desarrollo de las técnicas anteriormente citadas se encuentra la lógica difusa que en un primer nivel puede decirse que es un lenguaje que permite trasladar sentencias sofisticadas del lenguaje natural a un formalismo matemático.

El conocimiento se adquiere y se manipula de una manera de inferencia y deductiva, por medio del razonamiento simbólico, es decir, la capacidad para manipular signos que sitúan a algo generalmente en una estructura o red de hechos.

A este conjunto de hechos inciertos, que se requieren para la solución de un problema, se le ha dado el nombre de conjuntos difusos y a sus reglas lógica difusa.

10. – Tipos de Controladores

La arquitectura de un controlador difuso, depende de la aplicación en la cual se va a utilizar. Se puede efectuar una clasificación genérica de las arquitecturas posibles de los controladores basados en lógica difusa, para lo cual se consideraran tres grandes grupos.

1. Controladores difusos directos sin optimización.
2. Controladores difusos directos con optimización.
3. Controladores difusos híbridos.

A continuación se dará una breve descripción de cada uno de ellos:

1. Controladores difusos directos sin optimización.

Posee una estructura donde un primer bloque realiza un preprocesado de las variables de entrada para proporcionar las entradas al controlador difuso. En el caso más simple, este preprocesado puede consistir en un escalado de las magnitudes de las variables que se miden.

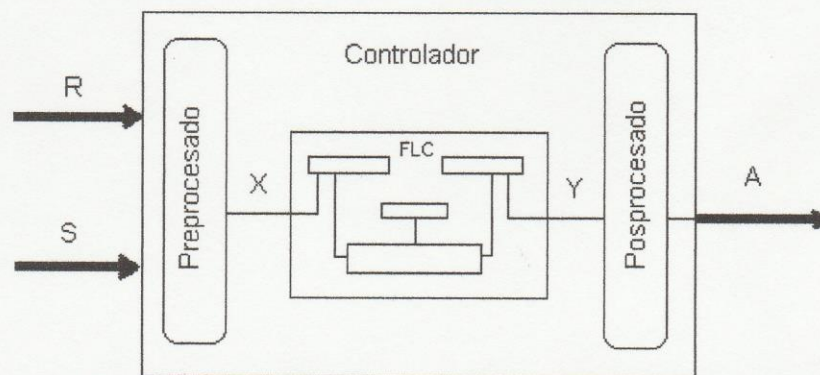


Figura N° 10.1: Estructura controladores difusos directos sin optimización

Este tipo de controlador permite realizar control de sistemas utilizando una descripción lingüística de las reglas de control. Estas reglas se obtienen del conocimiento que disponen los expertos sobre el control del sistema, o bien, por procedimientos heurísticos, siendo esta solución en muchos casos suficiente para obtener un buen control del sistema. Cuando se precisa una solución más eficiente, o no se dispone de este conocimiento previo, se han de utilizar los controladores difusos con optimización.

2. Controladores difusos directos con optimización

Estos controladores parten de la estructura de los controladores difusos sin optimización, añadiendo elementos que permiten ajustar sus parámetros internos con el fin de mejorar su eficiencia. Su estructura corresponde a la mostrada en la figura 2.

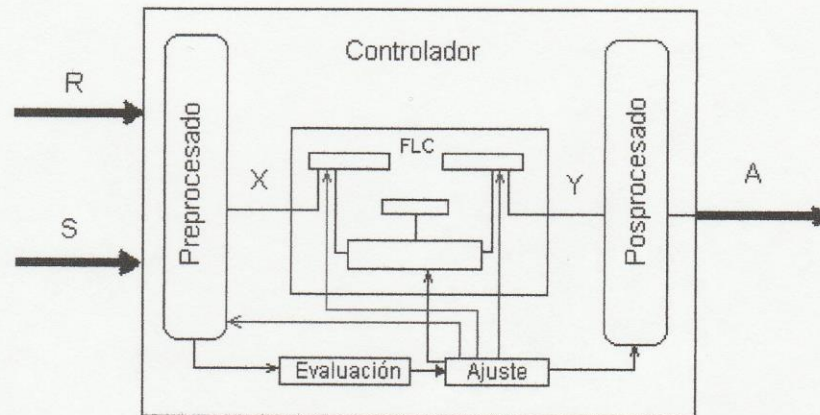


Figura N° 10.2: Estructura controladores difusos directos con optimización

Un primer elemento realiza la evaluación del funcionamiento del controlador para permitir al bloque siguiente decidir sobre las modificaciones a realizar. El bloque de evaluación puede calcular la sobreoscilación del sistema en torno al punto de trabajo, o el tiempo que tarda en estabilizarse el sistema tras una variación del mismo. Estos parámetros son utilizados por el bloque de ajuste para realizar las modificaciones necesarias en el FLC (Fuzzy Logic Controllers).

3. Controladores difusos híbridos.

Se le denominan a aquellos sistemas de control formados por dos controladores interconectados, de los cuales uno es un controlador convencional (ej. PID), y el otro es uno difuso. El primero se encarga básicamente del control, garantizando un comportamiento estable, mientras que el controlador difuso actúa en paralelo, introduciendo el componente heurístico en el proceso. Este segundo controlador, también puede emplearse para el ajuste de los parámetros del controlador convencional, usualmente, sus acciones se orientan a la mejora de ciertas características, como reducción de oscilaciones, mejoras del tiempo de establecimiento, etc.

Estas estrategias han sido utilizadas en la industria, por su similitud con los controladores clásicos, siendo esta una buena forma de relacionar al operario con tecnología que emplea lógica difusa.

Un ejemplo de su utilización es el regulador de temperatura E4AF de OMRON, regulador PID con un regulador difuso que funciona en paralelo.

Hay que mencionar que los controles difusos también se implementan en combinación con redes neuronales y con sistemas expertos.

11. - Ventajas Y Desventajas De Un Sistema De Control Difuso

Como ventajas se pueden mencionar una variedad de virtudes en contraposición a una pequeña cantidad de desventajas, como se muestra a continuación.

Ventajas:

- Pueden ser evaluadas mayor cantidad de variables.
- Variables lingüísticas, no numéricas, son usadas simulando la vía del conocimiento humano.
- Este relaciona entradas y salidas, sin tener que entender todas las variables, permitiendo que el sistema pueda ser más confiable y estable que uno con un sistema de control convencional.
- Simplifica asignación de soluciones previas a problemas sin resolver.
- Es posible obtener prototipos, rápidamente, ya que no requiere conocer todas las variables acerca del Sistema antes de empezar a trabajar.
- El desarrollo de éstos es más económico que el de sistemas convencionales, porque son más fáciles de designar.
- Simplifican la adquisición y representación del conocimiento.
- Unas pocas reglas abarcan gran cantidad de complejidades.

Como única desventaja notable se menciona la siguiente:

- Por medio de ellos es cómodo designar rápidamente un prototipo de sistemas convencionales. Los Sistemas difusos requieren mayor simulación y una excelente depuración y prueba antes de que sean operacionales

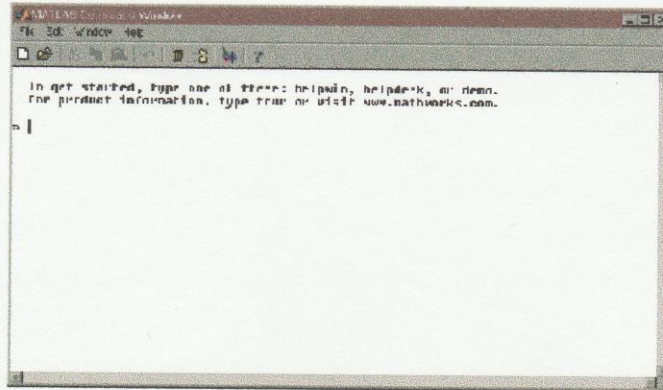
De acuerdo a lo expresado anteriormente, las ventajas que se indican para un sistema que utiliza controladores difusos supera con creces la desventaja que se le adjudica, la que se justifica si pensamos en la calidad del control que se obtiene con un dispositivo de estas características.

12. - Ambientes de Simulación

Debido el aumento de complejidad que cada vez presentan los distintos procesos, ha llevado a la necesidad de recurrir a herramientas de simulación cada vez más potentes en los recursos que estas presentan. Esto ha producido a su vez un continuo aumento de herramientas y utilidades implicadas en el desarrollo de sistemas, ha hecho más necesario entornos que integren y faciliten la tarea del programador individual, así como la integración del trabajo de los equipos de desarrollo

Como herramientas para la investigación en el desarrollo de sistemas de control y procesamiento de señal, se han utilizado frecuentemente *entornos de base matemática* que faciliten la evaluación de diversas técnicas, haciendo uso de paquetes matemáticos diversos incluidos en estos sistemas matemáticos de propósito general. Dentro de este tipo de entorno tenemos a MATLAB(*MATrix LABoratory*), es probablemente el entorno de desarrollo matemático más extendido para aplicaciones de control y procesamiento de señal, de mucha utilidad para la simulación del control de sistemas.

Matlab (www.mathworks.com), se utiliza habitualmente en entornos de ingeniería para analizar y desarrollar prototipos de algoritmos o computaciones numéricas, utilizando una formulación matricial que se adapta bien tanto a la teoría de control automático clásico, como al procesamiento digital de señales. Posee una amplia librería de funciones matemáticas, operaciones aritméticas, operadores lógicos y relacionales, funciones para el análisis de datos, funciones especiales para matrices, cálculo polinomial y análisis de sistemas no lineales, entre otras muchas herramientas que posee.



FiguraN°12.1: Ventana inicial de MATLAB

Como complemento a Matlab se dispone de SIMULINK, un entorno gráfico orientado a la simulación de sistemas dinámicos no lineales, tanto en el campo continuo como discreto. Los sistemas se describen como bloques que se interconectan, organizados jerárquicamente. Para el análisis de sistemas se puede utilizar diversos algoritmos de resolución de ecuaciones diferenciales. También permite la extracción de modelos lineales entorno a un punto de operación del sistema no lineal, y posee herramientas para la determinación de puntos de equilibrio. Se pueden incluir el sistema desarrollado en aplicaciones realizadas en C o C++ mediante diversos compiladores, e incluso se dispone de un *toolbox* para adquisición de datos del mundo real.

Las herramientas de MATLAB *fuzzy logic toolbox* permiten diseñar sistemas basados en lógica difusa con potentes técnicas de entrenamiento, así como su integración en sistemas de control complejo simulables en Simulink.

Otro entorno matemático disponible es **Mathematica**, (Wolfram Research, www.wolfram.com). Es probablemente uno de los software de tipo matemático más extendido, siendo empleado por investigadores, ingenieros y estudiantes de ingeniería y ciencias. Cubre no sólo áreas científicas y matemáticas, sino que también se emplea en áreas tecnológicas y empresariales.

El entorno Mathematica está dividido en dos partes: el núcleo (*kernel*), que realiza los cálculos, y un panel frontal (*front end*) que se ocupa de la interacción con el usuario. Este entorno puede ser usado para realizar cálculos numéricos y simbólicos, visualizar funciones, modelar y analizar datos, representar conocimientos, y generar documentos interactivos y a través de MathLink puede interactuar con otros programas.

Existe otro entorno matemático que es más reciente que los mencionados anteriormente, el MathCAD (MathSoft, www.mathsoft.com). Este estilo de interfaz gráfica de usuario es propio de los procesadores de textos actuales, y supone que no hay diferencias entre la presentación del documento en pantalla y lo que se obtiene en una copia impresa, esto es extensible a ecuaciones, gráficos y demás objetos que forman un documento, a diferencia de otros entornos matemáticos las ecuaciones se introducen tal y como se escriben normalmente.

Es una herramienta adecuada para el análisis de datos y sistemas, pudiéndose emplear en la formulación e investigación de algoritmos de control de sistemas y para su modelado.

Otro ambiente de trabajo son los entornos de lógica difusa, orientados a la simulación específica de lógica difusa.

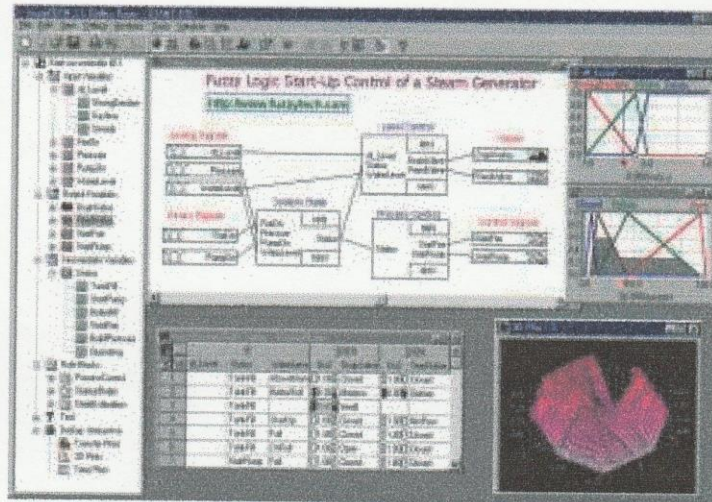


Figura N°12.2: pantalla de trabajo de FuzzyTech

FuzzyTECH (INFORM GmbH, www.fuzzytech.com), es uno de los más difundidos y más completos para el desarrollo de sistemas basados en lógica difusa.

Este entorno permite, entre otras cosas, la edición gráfica de las variables lingüísticas para cada una de las variables del sistema, con una precisión seleccionable según el tipo de implementación final seleccionado (8 ó 16 bits). Se puede utilizar gran variedad de funciones de inclusión, además de las de tipo S, Z, Lambda y Pi. Posee también un editor gráfico de reglas, con un formato similar al de una hoja de cálculo. Se pueden asociar a las reglas diversos métodos de inferencia estándar. Admite variables de entrada y de salida por modulo, y permite el empleo de diversos tipo de desfuzificadores.

UNFUZZY, es un entorno que brinda un ambiente de trabajo adecuado para el diseño, simulación e implementación de sistemas difusos. Creado en la Universidad Nacional de Colombia, ofrece un entorno gráfico

jerarquizado, dando amplia opciones en la definición de las variables lingüísticas, las funciones de pertenencia, difusores para las entradas al sistema, etc.

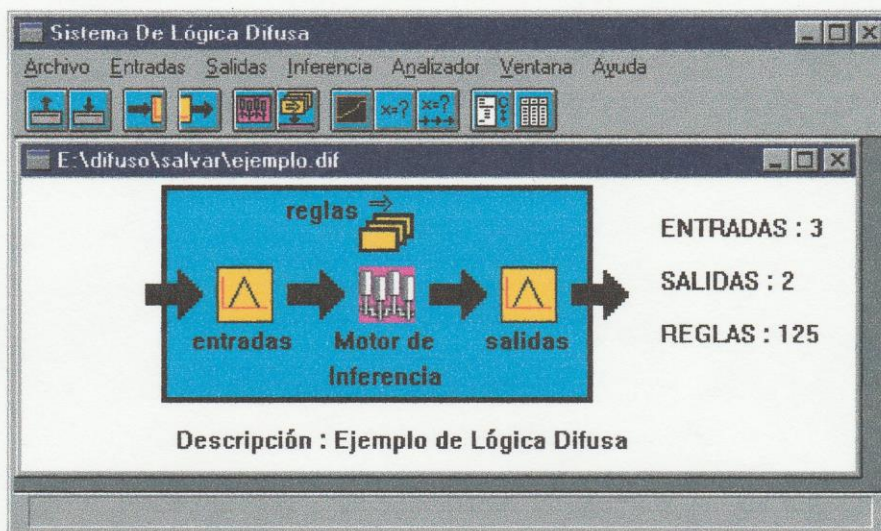


Figura N°12.3: Ventana UNFUZZY y Ventana de trabajo

Posee una estructura rígida en lo que se refiere al esquema que utiliza en la definición de las variables de entrada y salida, reglas difusas y de inferencia, como se muestra en la figura, no dejando la posibilidad de efectuar realimentación al sistema modelado.

Existen otros entornos, de los cuales se entregan sus referencia en Internet.

- FIDE, (Apronix-Motorola. www.aptronix.com)
- TILShell(Togai Infralogic, www.ortech-engr.com)
- Cubicalc(HyperLogic, www.hyperlogic.com)

13. - Implementación

La implementación que se realizarán como parte final de este proyecto corresponde a la creación de modelos de control difuso utilizando programas de simulación.

En cuanto a los programas a utilizar se presentarán dos ejemplos demostrativos. El primero corresponde a un diseño realizado en un entorno de lógica difusa como lo es FuzzyTech. Además se mostrará un ejemplo creado en un entorno de tipo matemático como es el caso de Matlab.

El ejemplo desarrollado en Matlab corresponde a un sistema con dos entradas (temperatura y presión), y una salida (posición de válvula). Para cada una de las variables lingüísticas, tanto de entrada como de salida, se definieron cinco términos difusos, y se utilizaron funciones de pertenencia triangular.

Una forma de crear un modelo difuso, es a través de FIS (Fuzzy Inference System), con el cual se tiene acceso a cinco ventanas donde se van introduciendo los datos necesarios para la creación del sistema.

Para iniciar el trabajo en las ventanas de edición FIS, en la pantalla de inicio de Matlab (figura N°12.1), se escribe el comando "*fuzzy*", seguido a esto, se oprime *enter*, de esta forma se accede a la ventana mostrada en la figura N°6, y de donde se puede acceder a las demás ventanas.

1. *Editor FIS*: en él se introduce la información general sobre el sistema de inferencia difuso (N° entradas, N° salidas, tipo de defusificador, función de pertenencia, variables lingüísticas, etc.)

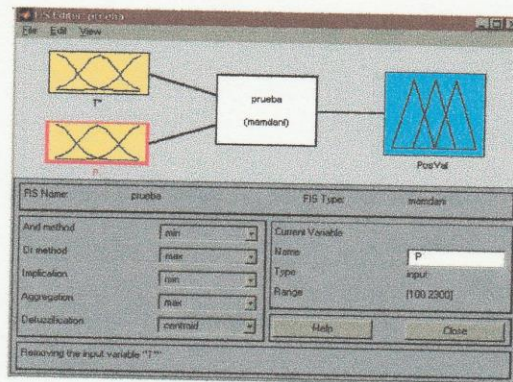


Figura N° 13.1: Editor FIS

2. *Editor de Función de Pertenencia*: en él se muestra la función de pertenencia asociada a cada variable de entrada y salida. En este campo se informa sobre los términos difusos de cada variable, los rangos que comprenden, etc.

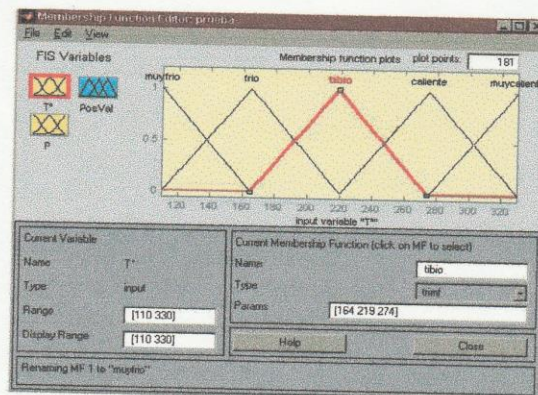


Figura N° 13.2: Editor de Función de Pertenencia

3. *Editor de Reglas*: en esta ventana se crean las reglas que relacionan las entradas con la salida y que regirán el sistema.

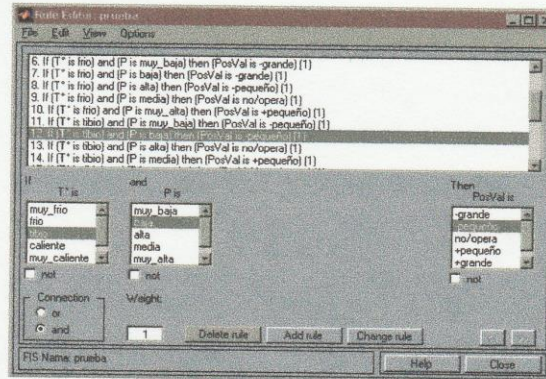


Figura N° 13.3: Editor de Reglas Difusas

4. *Visor de Reglas*: aquí se puede ver el comportamiento del sistema completo. Permite el estudio de la conducta de las reglas específicas y el efecto producido al variar los valores de entrada.

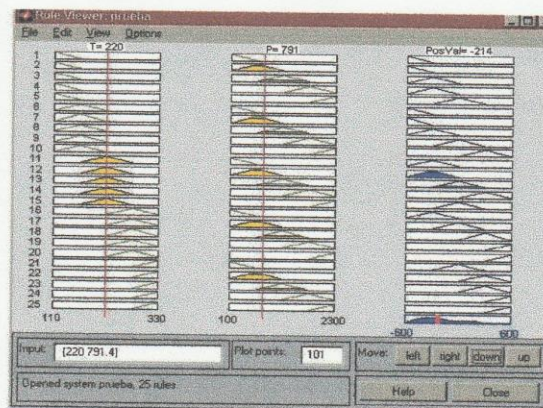


Figura N° 13.4: Visor de Reglas

5. *Visor de Superficie*: muestra la salida del sistema en una superficie tridimensional, permitiendo rotar la figura en distintos ángulos.

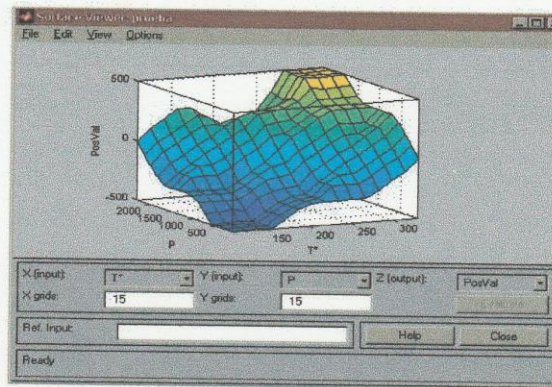


Figura N° 13.5: Visor de Superficie

Las dos ventanas mostradas en último lugar (Visor de reglas y visor de superficie), son ventanas de sólo lectura, en ellas se ve el comportamiento del sistema creado a través de las tres primeras ventanas.

Una vez creado un control difuso a través del editor FIS, la información almacenada, se puede trabajar en Simulink, para esto se lee en Matlab el archivo creado con la extensión *. FIS. Una vez leído el archivo, en Simulink a un bloque Fuzzy, se le da el nombre de la variable con la cual leímos el archivo, y de esa forma todos los datos del archivo con extensión *. Fis, corresponden a nuestro bloque creado en Simulink.

En la figura a continuación se muestran las tres ventanas que se utilizan, en la operación indicada anteriormente.

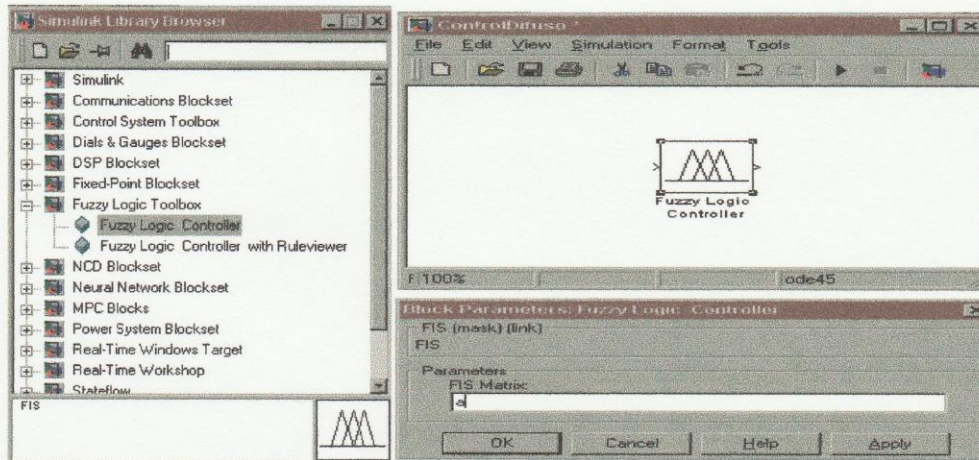


Figura N°13.6: Ventanas de creación de un bloque difuso

En la figura que sigue a continuación, se muestra un ejemplo de un sistema difuso.

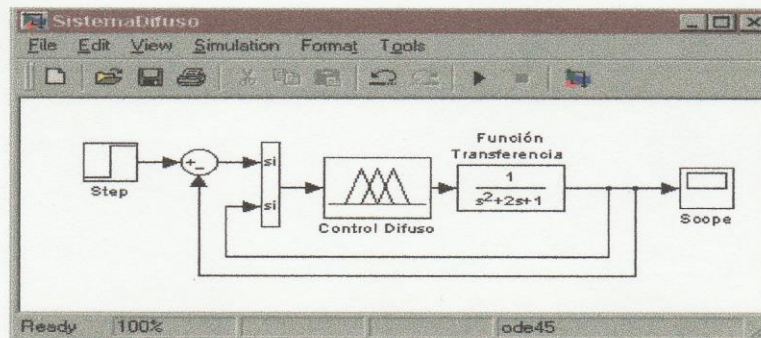


Figura N° 13.7: Sistema difuso

Matlab representa una herramienta de trabajo de gran utilidad, y que ofrece una amplia gama de posibilidades para la creación de sistemas de inferencia difusa, esto unido a simulink, donde el diseño de sistemas por bloques funcionales, es una forma fácil de modelación de procesos.

El ejemplo presentado en FuzzyTech, corresponde a una simulación de un a grúa de transporte, típicamente las encontradas en los puertos de carga y descarga de containers.

A continuación se entregan los puntos sobre su implementación:

1. – La razón para usar la lógica difusa en el control de una grúa, como se muestra en el ejemplo, son variadas:
 - a. Existen diferentes aplicaciones mundiales, pero el trabajo de un control de una grúa puede entenderse fácilmente.
 - b. Aunque controlar una grúa todavía es un problema “simple”, las técnicas de la ingeniería convencionales tienen dificultades, que deriva en la falta de una solución satisfactoria. En este aspecto la lógica difusa entrega una solución buena y rápida.
 - c. Han habido muchas aplicaciones exitosas de sistemas de mando de grúa basado en lógica difusa a lo largo del mundo.

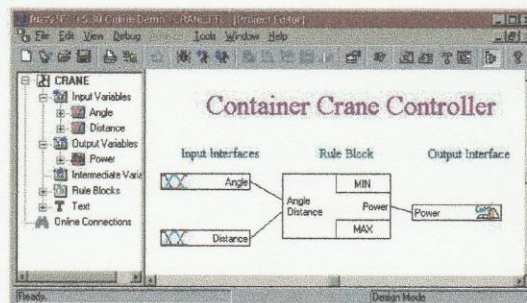


Figura N° 13.8: Editor de proyectos

2. - El Estudio del caso de Mando de Grúa de containers

Se usan grúas de container cargar y descargar las naves en la mayoría de los puertos. Ellos recogen los de containers con cables flexibles montados en la cabeza de la grúa. Los movimientos de cabeza de la grúa son de forma horizontal. Cuando un container se recoge el desplazamiento de la grúa provoca que el container empiece a oscilar, la oscilación no es un problema durante el transporte, pues un container oscilante no puede soltarse.

Hay dos maneras triviales de resolver este problema. Una manera es posicionar la cabeza de la grúa exactamente encima de la posición designada y esperar por la oscilación disminuya a un nivel aceptable. Otra estrategia es recoger el container y moverlo lentamente para prevenir cualquier oscilación. También como alternativa, es construir la grúa con cables adicionales que arreglan a la posición del container durante el funcionamiento. Muy pocas grúas hacen uso de este método debido al costo muy alto de la solución. Estas soluciones implican una demora en el procedimiento, una nave tiene que ser cargada y descargada en un tiempo mínimo por las razones del costo.

Por estas razones, más grúas de containers emplean todavía a los operadores humanos para controlar la velocidad del motor. El operador debe compensar simultáneamente la oscilación y debe asegurarse que la posición designada se alcance rápidamente. Esta tarea no es fácil, pero un operador experimentado es capaz de lograr resultados buenos.

3. - Alternativas de modelos de control

Ingenieros han intentado automatizar este control usando:

- Control PID Convencionales.
- Control basado en el Modelo matemático.
- Control lógica difusa.

El mando de PID convencional no tuvo éxito porque la tarea del mando es inherentemente no lineal. Por ejemplo, la minimización de la oscilación sólo es importante cuando el container está cerca de la plataforma de descarga. Se ha intentado derivar a un modelo matemático de la grúa y usarlo en el control. Para lo cual se formula una ecuación de diferencial de quinto grado para describir la conducta mecánica que no funcionó por las razones siguientes:

- El peso del container es desconocido.
- La conducta del motor de la grúa no era tan lineal como lo supuesto en el modelo.
- Factores como, la fricción en el movimiento de la cabeza de la grúa y la elasticidad de sus cables.
- Las perturbaciones, como las ráfagas del viento, no podrían ser incluidas en la modelo.

El controlador con lógica difusa, usa una estrategia de control lingüística que es basada en la experiencia humana, en lugar de en un modelo matemático.

4. - Llevando a cabo una Estrategia del Mando Lingüística

Utilizando la experiencia acumulada por un operador, se diseña la estrategia para implementar un conjunto de reglas que interpreten el accionar del operador.

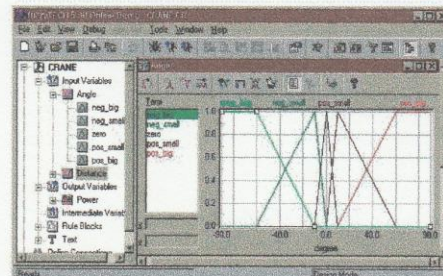
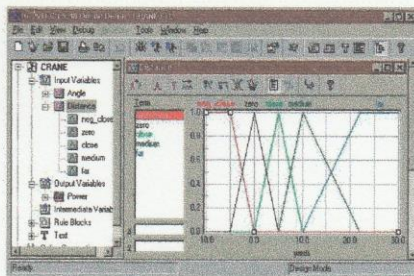
Los sensores para la posición de la cabeza de la grúa (distancia) y el ángulo de la oscilación del container(ángulo) se emplea para automatizar el mando de esta grúa.

Usando estas entradas para describir la condición actual de la grúa, y las cinco reglas de la experiencia del operador, pueden traducirse a un "si - entonces":

- 1) Si el ángulo = cero Y la distancia = lejos ENTONCES Power = pos_medium
- 2a) Si el ángulo = neg_small Y la distancia = lejos ENTONCES Power = pos_high
- 2b) Si el ángulo = neg_big Y la distancia = medio ENTONCES Power = pos_medium
- 3) Si el ángulo = pos_small Y Distancia = cierre Power ENTONCES = neg_medium
- 4) Si el ángulo = el neg_small Y Distancia = cierre Power ENTONCES = pos_medium
- 5) Si el ángulo = cero Y Distancia = cero Power ENTONCES = cero

Note, que la regla 2 se ha traducido en dos reglas para insertar el si - entonces. Las reglas Si - Entonces siempre describen la reacción a una cierta situación como:

SI <la situación> ENTONCES <la acción>



FiguraN°13.9:a)Reglas de variable distancia

b) Reglas de variable ángulo

En el caso de la grúa de containers, cada situación se identifica por dos condiciones. La primera condición describe el valor de Distancia, el segundo el valor de Ángulo. Las condiciones se combinan por Y, representando el hecho que ambas condiciones tienen que ser válidas para la situación respectiva.

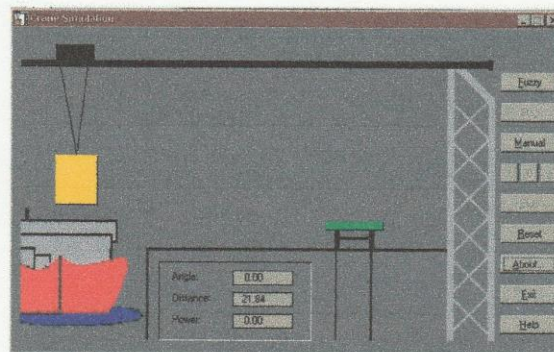


Figura N°13.10: Simulación de Grúa

La lógica difusa permite al uso de experiencia y los resultados experimentales entregan soluciones más eficaces. No reemplaza o compite con las técnicas de control convencionales, la lógica difusa extiende, la manera automatizada que se usan las técnicas del mando en las aplicaciones prácticas, agregando las capacidades del mando de supervisión. El estudio del caso simple de una grúa de containers demuestra que la lógica difusa puede entregar una solución transparente y simple para un problema que es más difícil de resolver usando las técnicas de la ingeniería convencionales.

14. – Implementación difusa en PLC

Los controladores lógicos programables son equipos comunes en plataformas de automatización industrial y control de procesos, usan interfaces estándares para sensores y actuadores. La mayoría de los PLC usan lenguaje de programación especializado, como lógica Ladder, una manera semigráfica para algoritmos de control.

Algunos PLC no poseen como característica, un lenguaje de programación de alto nivel tal como C, para estos equipos se puede usar un Pre-compilador de lógica difusa que genere el sistema en código C, e implementarlo en los PLC. En la mayoría de las aplicaciones de control en lazo cerrado en industrias automatizadas, no obstante se pueden realizar modificaciones “en la marcha” sin detener el sistema significativamente, haciendo expedito el desarrollo.

No todos los PLC se apoyan en programación en C. Pequeños PLC sólo utilizan diagramas Ladder, lista de instrucciones, texto estructurado, diagrama de bloques de funciones, o tablas de funciones secuenciales, conforme a la norma internacional IEC 1131, para éste tipo de PLC existen bloque de funciones de lógica difusa.

Para desarrollar un sistema usando este tipo de bloques, no es necesario generar ningún código. Primero se diseña una estructura básica de lógica difusa en un PC, usando un programa de entorno de Lógica difusa, luego se enlaza PC con el PLC y se descarga el sistema de lógica difusa como bloque de parámetros al bloque de función de lógica difusa. Este modo permite visualización y modificaciones en línea. La ventaja de usar bloques de lógica difusa sobre la implementación de código C, es que no es necesario la generación de código, ni la compilación.

15. - Referencia

Biblioteca de módulos IEC: parte FUZZY

Este documento es una guía que ayuda en la configuración de las funciones y los módulos de función.

En esta biblioteca se encuentran diferentes tipos de bloques que operan con lógica difusa, definidos de acuerdo a la función que realizan. Estos bloques se encuentran bajo la norma IEC 61131-3 referida a Autómatas programables – Parte 3, que corresponde a los lenguajes de programación.

En este documento se explica detalladamente que es el control difuso, como establecer tareas de control y regulación, además se proporcionan funciones y bloque de función elemental. Algunos de estos bloques realizan funciones de Fusificación, proceso de Inferencia, Defusificación.

Sobre cada bloque se entrega información que corresponde a una descripción de la función, datos sobre su representación, símbolo, fórmula, y la descripción de parámetros de bloque, donde se indican

- Parámetro ($IN_1, IN_2, \dots, IN_n, OUT$)
- Tipos de datos (sí corresponde a un número Real o Entero(INT))
- Significado (sí corresponde a un valor de entrada o a un valor de salida)

CONCLUSIONES

En el contenido de este proyecto se entregan las bases para tener un conocimiento de la teoría de la lógica difusa, revisando su origen, el cual según el propio autor, no esperaba abarcar campos de la ingeniería, "No, yo esperaba que la lógica difusa se aplicara en lingüística, en sociología... campos ajenos a la ingeniería. Me llevé una sorpresa enorme cuando vi, a finales de los ochenta, que la mayoría de las aplicaciones eran en ingeniería de consumo: cámaras, lavadoras, televisores, grabadoras, ascensores... Hoy éstas son las principales aplicaciones, aunque a menudo no se dicen en la etiqueta del producto" Lofti Zadeh.

Si bien el concepto de "difuso" puede hacer pensar que nos enfrentamos a una lógica "poco entendible", basta sólo con comenzar a leer sobre el tema para darse cuenta que el lenguaje empleado, en esta lógica, es el que cotidianamente usamos.

La lógica difusa tiene poco andar, si consideramos que su gran utilización se inició en la década de los 80. En este tiempo transcurrido, ha alcanzado un gran desarrollo, debido a su capacidad de resolver problemas relacionados con la incertidumbre de la información o del conocimiento de los expertos. Su similitud con expresiones empleadas y entendibles por el ser humano abre un abanico de posibilidades, proporcionando un método formal para la expresión del conocimiento. Estas cualidades le aseguran un amplio campo de aplicaciones y un alto interés para su utilización industrial presente y futura.

Los controladores basados en la lógica difusa es una tecnología emergente, siendo Japón el país donde ha tenido mayor acogida. En el contexto nacional existen ejemplos de su utilización siendo posible hace unos años atrás, encontrar estudios o prototipos de futuras implementaciones.

La lógica difusa permite el uso de la experiencia y por medio de los resultados experimentales entregar las soluciones más eficaces a un determinado problema, esto permite que el diseñador no requiera conocer todos los detalles del proceso, lo que colabora a la creación de sistemas más exactos y estables

Los métodos convencionales son buenos para problemas simples, mientras que los sistemas difusos son adecuados para problemas complejos o aplicaciones que requieren pensamiento intuitivo, esto debido a que trabaja con un lenguaje más cercano al que cotidianamente usamos, que los modelos matemáticos.

Los sistemas de control difuso permiten ser utilizados en procesos donde se cuentan con una o más entradas y/o salidas, lo cual se permite intervencionalizar las variables que actúan en el proceso.

A pesar de todo lo ventajoso que resulta ser un sistema de control difuso, este igual presenta alguna desventaja, siendo por ejemplo, que si bien un controlador difuso posee un diseño fácil y rápido para ser llevados a prototipos, se requiere mayor tiempo en la simulación y depuración antes de pasar a cumplir la función para la cual fue construido.

La lógica difusa no reemplaza o compite con las técnicas de control convencionales. Esta extiende la manera automatizada que se usan las técnicas control en aplicaciones prácticas, agregando en cambio las capacidades del control de supervisión. El estudio del caso simple de una grúa del recipiente, mostrado en el capítulo correspondiente a la implementación, demuestra que la lógica difusa puede entregar una solución transparente y simple para un problema que resulta más difícil resolver usando las técnicas de ingeniería convencionales.

La implementación que se realizó permitió trabajar y conocer ambientes de simulación, como es el caso de fuzzytech. Hay que mencionar que en este entorno de lógica difusa por ser una versión demostrativa tiene algunas limitantes. Por ejemplo, permite la creación de procesos con base de funcionamiento en lógica difusa, pero no da la opción de que éstos sean guardados. Si se puede decir que el diseño de sistemas no resulta difícil, siendo un programa bastante didáctico y que facilita el desarrollo de modelos de diversa complejidad.

En lo que respecta a la aplicación de un sistema, realizada en un ambiente matemático como es el caso de Matlab, se puede decir que este entorno resulta bastante amigable una vez conocido la forma en que se diseñan sistemas de inferencia difusos, los que posteriormente se pueden llevar a Simulink, y trabajarlos como un bloque. Hay que mencionar que es bastante clarificador la forma en que se muestra el valor de salida a través del visor de reglas, el cual indica, de acuerdo a las variaciones de las variables de entrada, como se ve afectado el valor defusificado (valor concreto) que obtenemos a la salida del sistema.

Propuesta a futuro

Con las herramientas entregadas en este proyecto, queda planteada la inquietud de seguir desarrollando el tema, ya en un contexto más práctico que teórico, pudiendo, por ejemplo, trabajarse en la implementación con algún procesador de sistemas donde esté involucrada la lógica difusa.

ANEXO

En el presente anexo se entrega un documento realizado en UAM-Azcapotzalco, Departamento de Electrónica, México D.F., y que refiere a un estudio comparativo entre control PID y Difuso.

Hay que considerar, que si los resultados de las pruebas realizadas en ambos tipo de control, encontró mejor rendimiento en el control difuso, el control PID utilizado en dichas pruebas y de acuerdo con el diagrama del circuito electrónico, se ve que este es bastante sencillo y no permite la posibilidad de que se le efectúen ajustes a sus parámetros, lo que sin una información mas detallada hace pensar en la calidad del control PID utilizado en esta experiencia.



ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE CONTROL PID Y DIFUSO

A. Ferreyra, R. Fuentes¹
UAM-Azcapotzalco, Depto de Electrónica:
Av. San Pablo 180, Col Reynosa Tamaulipas,
Deleg. Azcapotzalco C.P. 02200, México D.F. Tel. 57 23 59 46.
Email: fra@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

En el presente trabajo, se muestran como el rendimiento de un control PID puede ser igualado y excedido por un control P difuso en aplicaciones que requieren una muy alta precisión y estabilidad. Un control PID normal y uno P difuso son implementados para controlar temperatura en aplicaciones que requieren bastante precisión; este tiene la capacidad de ajustar variaciones de hasta de 0.1 °C. Se realiza una comparación profunda entre estos dos tipos de control y se establecen las ventajas y desventajas de cada uno de ellos en esta aplicación.

ABSTRACT

In this work it is shown that a fuzzy logic controller can equaled and exceed to standard PID controller performance, for applications that require very high precision and stability. Standard PID and a P fuzzy logic controller are implemented and compared for high precision temperature control applications (less than 0.1°C). Analysis detailed analysis of the results are presented, also advantaged and disadvantages are discussed for each design.

1. INTRODUCCION

El uso de técnicas de control clásico como es el control PID de ganancia fija, en algunos casos resulta ser una buena alternativa para controlar sistemas dinámicos; ya que proporcionan tiempos de respuesta rápidos, sin embargo entre mayor es la precisión requerida en el sistema el ajuste de este tipo de control es más difícil ya que son bastante sensibles a las señales de ruido y en ocasiones introducen oscilaciones cuando se presentan retardos en el sistema. Cuando la dinámica de los sistemas o procesos a controlar es no lineal, el control tiene que tener la capacidad de compensar esta no-linealidad y aunque el control PID asume relaciones lineales, este no tiene la capacidad para responder a esto. Esta no-linealidad difícilmente puede ser caracterizada por una ecuación por lo que en la mayoría de los casos es tratada de manera subjetiva por el operador del proceso. Esta subjetividad tiene implicaciones profundas para poder modelar este tipo de sistemas a través de la lógica difusa.

La implementación de controladores PID en hardware basados en lógica difusa es motivada por su habilidad para capturar estrategias cualitativas de control y su capacidad de implementar un comportamiento de control altamente flexible. Con estos podemos lograr que nuestros sistemas puedan ajustarse a condiciones cambiantes que son muchas veces imposibles de predecir, tales como los cambios ambientales o las condiciones de desgaste en sus componentes físicos, por citar algunos ejemplos[1].

2. MODELADO DIFUSO

Los componentes de los sistemas convencionales y difusos son bastante similares, difieren principalmente en que el sistema difuso contiene dos etapas más, la "Fusificación" y la "Defusificación" (Figura 1).

En un sistema difuso, el valor de entrada real (proveniente de sensores) es convertido a un valor difuso vía el proceso de **Fusificación**, este valor es enseguida introducido al proceso lógico difuso comúnmente llamado **Mecanismo de inferencia**, en donde es continuamente evaluado en un conjunto de reglas --en donde esta depositado el conocimiento del experto--; este proceso genera un valor de salida difuso, el cual es transformado a un valor de salida real

¹ Centro de Instrumentos-UNAM, Apdo. Postal 70-186, Coyoacán, 04510, México D.F.
Tel. (52) 56 22 86 08 (ext 109). Fax (52) 56 22 86 53. Email: fuentesr@aleph.cinstrum.unam.mx

a través del proceso de **Defusificación**. El valor de salida real es con frecuencia utilizado para ajustar el funcionamiento de un actuador que en realidad es el encargado de ajustar el estado estable del sistema físico. El cambio producido en el sistema es capturado por los sensores y el proceso entero inicia nuevamente.

En contraste, un control PID está basado en un modelo matemático riguroso de algún proceso lineal (Figura 1). Estos modelos desarrollan, por medio de la localización de las raíces o algún otro método, un conjunto de ecuaciones que describen el equilibrio del estado estable de la superficie de control, con coeficientes que son asignados a los aspectos proporcional, integral, y derivativo del sistema. Un control PID lee un valor preciso del sensor, aplica el modelo matemático, y produce una salida específica desde el algoritmo matemático.

Mientras el modelo PID puede parecer el más simple y por lo tanto, la representación más económica, lo contrario es frecuentemente más cierto. Los controles difusos son en realidad más fáciles de implementar, más simples para describir y verificar, y pueden ser mantenidos y extendidos con mayor exactitud y en menos tiempo.

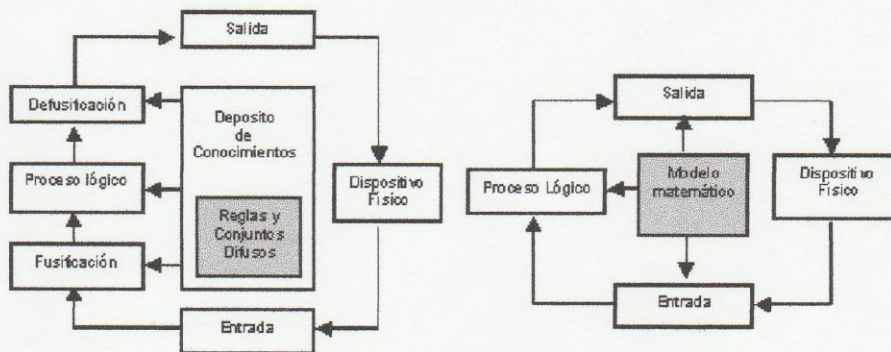


Figura 1. En un sistema difuso típico, la entrada es leída de una fuente externa y fusificada antes de ser procesada por la lógica difusa. La salida del proceso lógico es defusificada antes de ser mandada al dispositivo físico bajo control. Un sistema de control convencional (derecha) tiene una estructura muy similar, pero sin los elementos difusos.

3. CONTROL DE TEMPERATURA

3.1 Descripción de la aplicación². La aplicación del control de temperatura consiste en mantener un bloque de cobre a temperatura constante. El control regula la potencia del radiador de calor de acuerdo a la temperatura de referencia. En esta aplicación se explotan las características de disipación que tienen los transistores de potencia para emplearlos como radiadores de calor.

3.2 Recursos de hardware. Para realizar el control de temperatura se utilizaron los siguientes recursos:

- a) Un bloque de cobre (13.59 cm de largo, 3.81 cm de ancho y 2.34 cm de altura).
- b) Un transistor de potencia para calentar el bloque (TIP36).
- c) Un sensor de temperatura (LM35).
- d) Tarjeta de adquisición A/D de 12 bits.
- e) Un control PID estándar implementado con amplificadores operacionales.
- f) Un control P difuso implementado en un microcontrolador PIC.

² Cabe aclarar que en esta aplicación nos referiremos a la diferencia de temperaturas, nunca a la temperatura absoluta

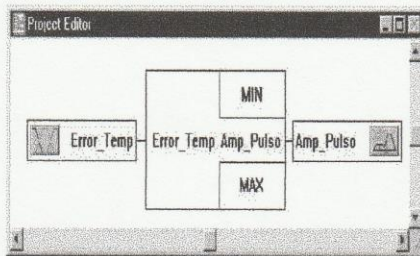


Figura 4. Sistema de control

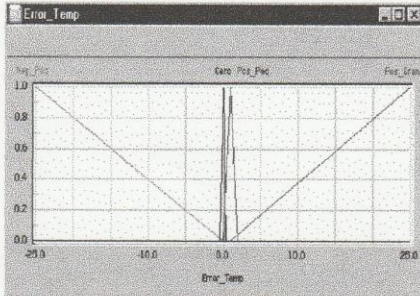


Figura 5. Variable de entrada

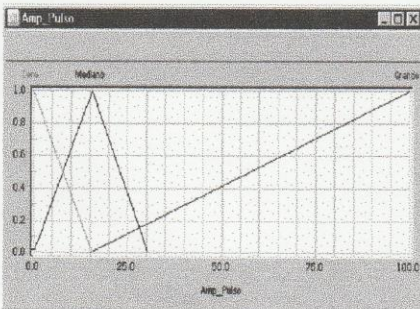


Figura 6. Variable de salida

Matrix	IF	THEN	
Utilities	Error_Temp	DoS	Amp_Pulso
1	Neg_Peq	1.00	Cero
2	cero	1.00	Cero
3	Pos_Peq	1.00	Mediano
4	Pos_Gran	1.00	Grande
5			

Figura 7. Algoritmo del sistema

■ El conjunto de términos para la variable lingüística Error_Temp son:

Tabla 1

Valor	Valor mínimo	Valor Típico	Valor máximo
Neg_Peq	-25	-25	0
Cero	-0.05	0	0.05
Pos_Peq	0	1	2
Pos_Gran	1	25	25

■ El conjunto de términos para la variable lingüística Amp_Pulso son:

Tabla 2

Valor	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo
Cero	0	0	15
Mediano	0.5	15	30
Grande	15	100	100

Todos estos términos son representados por formas lineales (triángulos) llamados Funciones de Membrecia (Figuras 5 y 6).

3.4.2 Algoritmo del sistema. Una vez que se tiene definidas las variables lingüísticas podemos describir las reglas del sistema (Figura 7). Estas reglas son la parte principal del control difuso y contienen toda la información ingenieril necesaria para controlar el sistema. El control de temperatura se realizó con solo 4 reglas de las 12 posibles.

3.5 Parámetros utilizados en los controles.

Los controles PID y difuso de temperatura fueron probados a diferentes temperaturas de referencia para caracterizar su tiempo de respuesta, sobretiro, precisión y estabilidad. Para cada una de las pruebas, el bloque de cobre fue enfriado con un ventilador hasta una temperatura aproximada a la temperatura ambiente esto con el fin de reducir el tiempo de espera entre una prueba y otra, por lo que la temperatura inicial del bloque en cada experimento esta muy cerca de un cierto valor y las pequeñas diferencias fueron debidas a la propia inercias térmica. En cada una de las pruebas la T_{BLOQUE} es medida en tiempo real, promediada (200 muestras) y registrada en el disco duro.

4. RESULTADOS.

En la tabla 3 se muestran los resultados para el control de temperatura tanto PID como Difuso, en donde se puede observar que:

- El control difuso presenta tiempos de respuesta mucho menores que el control PID. Esto es quizás la ventaja más importante de este control ya que ocasiona que la temperatura del bloque se estabilice más rápido que con el control PID (Figura 8).
- Ambos controles presentan valores muy pequeños de error en estado estable, sin embargo como se muestra en la tabla 3, el control difuso tiene un error más pequeño en la mayoría de los casos. Esto asegura que las variaciones de la temperatura del bloque en estado estable sean mínimas y alcancen una variación menor al ± 0.05 °C (Figura 9).
- El control PID presentan una precisión bastante buena, sin embargo el control difuso presenta una precisión mayor en la mayoría de los casos, esto como reflejo directo del menor error en estado estable que presenta este control (Figura 9).
- El control Difuso responde mejor a las perturbaciones que el control PID (Figura 10).
- La ventaja principal que presenta el control PID sobre el difuso, se ve reflejada en el sobretiro nulo que presenta este en su respuesta, lo que asegura que nunca se exceda la referencia. Sin embargo, el control difuso presenta pequeños sobretiros que desaparecen rápidamente sin alterar para nada el tiempo de estabilidad del control.

Referencia (°C)	Tiempo de respuesta (Minutos)		Sobretiro		Error en estado estable (°C)		Precisión (%)	
	PID	DIFUSO	PID	DIFUSO	PID	DIFUSO	PID	DIFUSO
30	14.475	1.980	0	0.0938	0.0276	0.0136	0.0921	0.0453
35	15.602	3.786	0	0.1022	0.0310	0.0167	0.0887	0.0477
40	15.750	7.637	0	0.1243	0.0281	0.0371	0.0703	0.0927
45	17.432	7.896	0	0.1063	0.0491	0.0354	0.1092	0.0787
50	18.599	10.320	0	0.0690	0.0287	0.0366	0.0574	0.0733
55	18.692	12.436	0	0.0789	0.0290	0.0400	0.0528	0.0728
60	19.423	14.844	0	0.0883	0.0716	0.0423	0.1198	0.0704
		4	4			4		4

Tabla 3.- Resultados de las pruebas realizadas al control de temperatura PID y Difuso para un tiempo de muestreo de 30 minutos. El símbolo (4) indica cual control es mejor en cada una de las características de la respuesta.

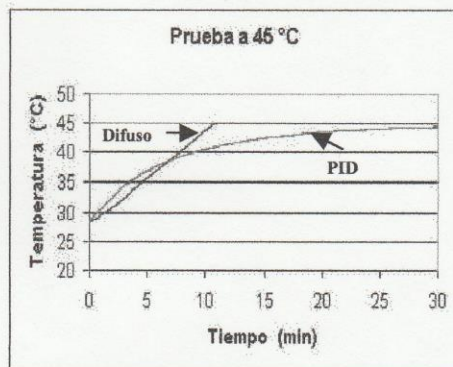


Figura 8. Tiempos de respuesta

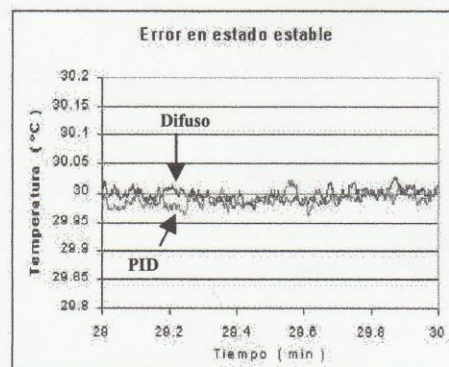


Figura 9. Comportamiento del error en estado estable para el control PID y el difuso.

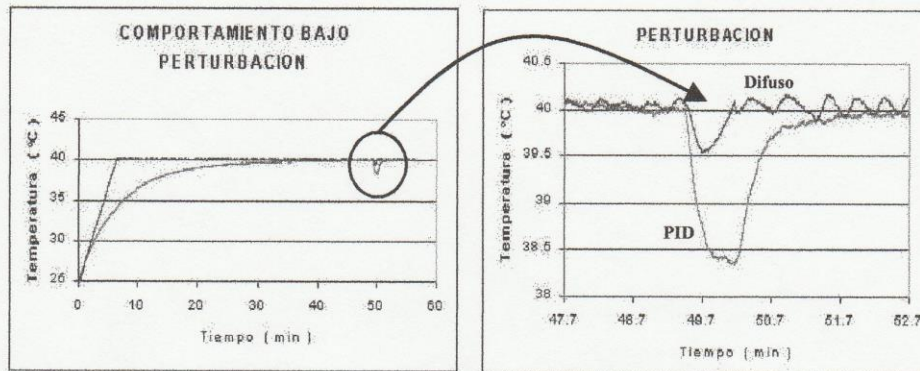


Figura 10. El control difuso presenta mejor respuesta a las perturbaciones. En el control difuso, si la perturbación es fuerte la temperatura cae pero se estabiliza en un valor que está aun en el rango admisible de error (cae apenas en 0.5 °C); mientras que el PID cae tres veces más. Cuando la perturbación desaparece, el control difuso estabiliza de manera más rápida la temperatura del bloque; mientras que el control PID necesita de al menos 5 minutos más para estabilizar la temperatura.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se realizó una comparación que demuestra que un control Proporcional implementado en lógica difusa excede por mucho el rendimiento de un control PID estándar, resultados que dan la confianza suficiente para utilizar con mayor frecuencia --en aplicaciones de tiempo real y en hardware-- este tipo de control. El rendimiento del control P difuso puede ser mejorado aun más si se agregan al control las etapas integral y derivativa, sin embargo estas deben de ser utilizadas dependiendo del tipo de aplicación y la precisión requerida ya que estas complican por mucho el ajuste del control, lo que marca un serio compromiso.

En cuanto al control PID se puede decir que presenta una buena precisión cuando es bien ajustado. Debido a su sencillez y facilidad de implementación, sigue siendo una buena alternativa en aplicaciones donde no sea tan crítico el tiempo de respuesta; en aplicaciones de una precisión mayor, tiene problemas tanto con el tiempo de respuesta como con la estabilidad.

6. REFERENCIAS

- [1] Ferreyra A., Fuentes R., "CONTROL DIFUSO UNA ALTERNATIVA PARA APLICACIONES DE ALTA PRECISION", SOMI XIII Congreso de Instrumentación, pp 239-244, Octubre 1998, Ensenada B.C.N., México.
2. Li-Xin Wang, "ADAPTIVE FUZZY SYSTEMS AND CONTROL", Prentice Hall., 1994.
3. Hung T. Nguyen, "FUZZY SYSTEMS", Kluwer Academic Publishers., 1998.
4. Ronald R. Yager "ESSENTIALS OF FUZZY MODELING AND CONTROL", John Wiley, 1994.
5. M. Mizumoto., "REALIZATION OF PID CONTROLS BY FUZZY CONTROLS METHODS", I.E.E.E. Int. Conference on fuzzy systems, pp 709-715, March 1992, San Diego, California.

FUENTES DE INFORMACION

- Redes Neuronales y Sistemas Borrosos
B. Martín del Brío, A. Sanz Molina
Editorial Alfaomega / RA – MA 2001
- Applied Fuzzy System T. Terano, K. Asai, M. Sugeno
- Fuzzy Logic and NeuroFuzzy Applications Explained
Constantin von Altrock
- Lógica Difusa
<http://www6.gratisweb.com/elind/fuzzylogic.htm>
- Elementos de Lógica Difusa
<http://delta.cs.cinvestav.mx/~gmorales/ldif/ldifl.html>
- Modelación Difusa
Universidad de las Américas Puebla, México
- Fuzzy Logic Toolbox, para el uso de MATLAB
- Archivo de ayuda Container Crane Controller, Fuzzytech
- Estudio comparativo entre control PID y control Difuso
UAM- Azcapotzalco, Depto. de Electrónica, México
- Biblioteca de módulos IEC, Parte: Fuzzy, <http://www.modicon.com/>

Fe De Erratas

Página 36 Dice: Como se vio en el punto 1.1.....

Debe decir: Como se vio en el punto 5.1.....

