



## DISEÑO Y SIMULACION DE UN CONTROLADOR DIFUSO

Gabriela Cerezo Leal y Eduardo Gómez Ramírez

Universidad de Sheffield, Reino Unido y Centro de Investigación, Universidad La Salle

### RESUMEN

Desde que surgió, hace más de 20 años, la Teoría de Conjuntos Difusos ha evolucionado notablemente, se ha desarrollado como una colección de conceptos y técnicas que permiten trabajar con fenómenos complejos que no permiten ser analizados por los métodos tradicionales como la Lógica Bivalente o la Teoría de Probabilidades. Actualmente, ha trascendido más allá de lo que es el desarrollo de la teoría y se han encontrado un sinnúmero de aplicaciones, utilizándose principalmente en el control de procesos industriales. A pesar de ser una teoría nueva, la Lógica Difusa tiene aplicaciones actualmente en diversos campos como la inteligencia artificial, computación, robótica, ingeniería de control, toma de decisiones, sistemas expertos, lógica, investigación de operaciones, sociología, mercadotecnia, entre otras. Es en Japón donde más se ha aplicado la Teoría de la Lógica Difusa y se han explotado notablemente sus ventajas y flexibilidad en los diversos campos.

Este trabajo, pretende mostrar la facilidad y versatilidad de la Lógica Difusa para implantar sistemas de control para procesos industriales. Se diseñó un controlador para un sistema hidráulico de segundo orden, ya que este proceso se encuentra, con distinto grado de complejidad, en la mayoría de las plantas industriales.

### ABSTRACT

When appeared, more than 20 years ago, the theory of fuzzy sets has remarkable evolutionated, this theory has develop as a collection of concepts and techniques that allows to work with complex phenomena, that it's not easy to be analyzed by the traditional methodology as the binary logic or probability theory. Now has a trascendental development more than the development of the theory and we found an unlimited number of applications with a main use in the control of industrial process. Although it's a new theory, the Fuzzy Logic (FL) has application in different fields, as artificial intelligence, computation, robotics, control engineering, take decisions, expert systems, logics, sociology, marketing, among others. Japan is the country where FL has found remarkable advantages and flexibility in several fields. The current study shows the easyness and versatility of the FL to implant a control system for industrial process. We designed a controller for a 2nd order hydraulic system because we could find this one in most of the industrial plants.

### INTRODUCCIÓN

La Lógica Difusa se fundamenta en lo que se conoce como Teoría de Conjuntos Difusos [1], que como su nombre lo indica se basa en conceptos en los que todo tiene un grado de pertenencia. Los números sobre los cuales se apliquen estos conceptos, dejarán de pertenecer a la lógica clásica ó bivalente, y tomarán valores que estarán en un rango de 0 a 1. Estos números pueden representar cualquier



concepto que se produzca en el razonamiento humano, desde un concepto bivalente como sí o no, hasta un concepto ambiguo como muy, mucho, no tanto, un poco, etc.

En las plantas modernas, se ha utilizado el control por medio de computadoras [2,3], la planta se modela y se calculan los parámetros de control necesarios para controlar dicho proceso. Los modelos de las plantas son en realidad aproximaciones del proceso real y en muchos casos el esfuerzo requerido para desarrollar el modelo matemático se convierte una tarea muy difícil y por consiguiente consume mucho tiempo de procesamiento.

Las estrategias de control han evolucionado notablemente a partir del controlador PID tradicional [4], sin embargo, en algunos casos la estrategia puede ser buena pero si el modelo del proceso no es el adecuado, el control del proceso no tendrá resultados óptimos. Gracias a las grandes ventajas y flexibilidad con las que cuenta la Lógica Difusa para expresar conceptos y acciones ambiguas [5], surge el Control Difuso (FLC)<sup>1</sup> como una buena opción para la solución de dichos problemas. [6-9]

En este trabajo se presenta la descripción del diseño de un controlador difuso y su implementación para el control de una planta de segundo orden. El artículo está estructurado de la siguiente forma: primero se analizan algunos conceptos básicos sobre lógica difusa [10-12], luego se analizará cuál es la metodología para diseñar un control difuso y su comparación con control clásico (PID)<sup>2</sup>, por último se presentarán los resultados y las conclusiones.

## CONCEPTOS GENERALES DE LÓGICA DIFUSA

### Número Difuso

Se dice que un número  $N$  es difuso si  $N$  es un conjunto normalizado y convexo que pertenezca a los números reales, tal que:

- Exista exactamente un elemento  $x_0 \in \mathfrak{R}$  con un grado de pertenencia  $\mu_N(x_0) = 1$ . Donde  $x_0$  se conoce como valor medio de  $N$  y,
- Que la función de pertenencia  $\mu_N(x)$  sea continua por partes. En la figura 1 se muestran las funciones de pertenencia para los números difusos 3 y 7.

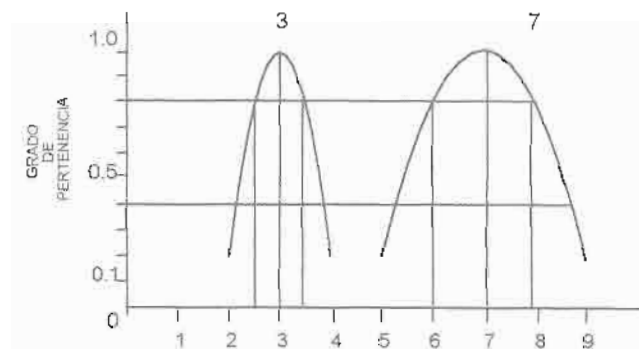


Fig. 1 Números Difusos 3 y 7

<sup>1</sup>Fuzzy Logic Control

<sup>2</sup> Proportional Integral Derivative Controller

## Variables Lingüísticas

Las variables lingüísticas son aquellas cuyos valores no son números sino palabras u oraciones en un lenguaje natural o cotidiano, por ejemplo un adjetivo.

Si se considera la variable lingüística EDAD, se puede definir como se muestra en la figura 2

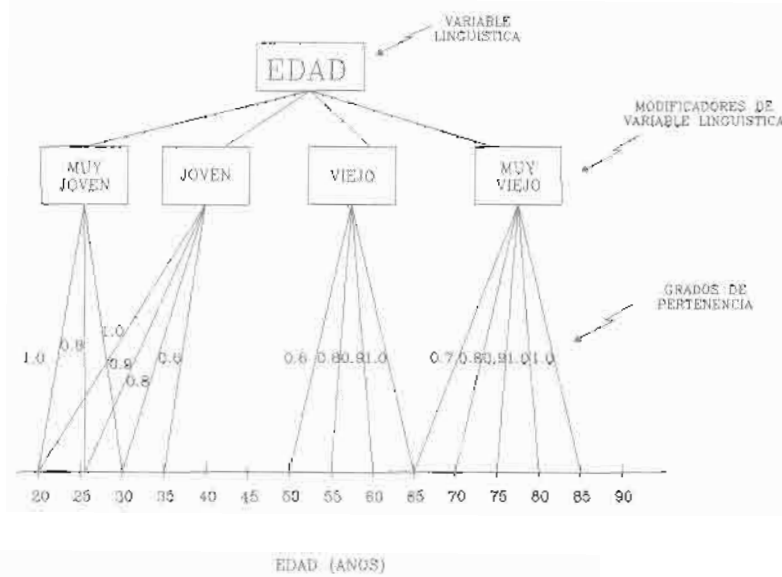


Fig. 2. Variable Lingüística EDAD

## Funciones de Pertenencia

Las funciones de pertenencia  $\mu(x)$  son funciones en  $x$  que definen el Conjunto Difuso que representa a la variable lingüística. Estas funciones determinan el grado de pertenencia de un elemento al conjunto difuso, por lo que se representan:

$$\mu_A(x) = f(x) \text{ y representa el grado en que } x \in A$$

Las funciones de pertenencia pueden estar definidas de distintas maneras, las más comunes y más sencillas de procesar son aquellas definidas con números difusos del tipo triangular o bien trapezoidal. Las únicas condiciones que deben cumplir son:

- Que su rango esté normalizado de  $[0,1]$  y,
- Que entre más cumpla el elemento del conjunto las características que definen la variable lingüística, más cercano sea su grado de pertenencia a 1.

Un ejemplo de función de pertenencia es el que se muestra en la siguiente figura:

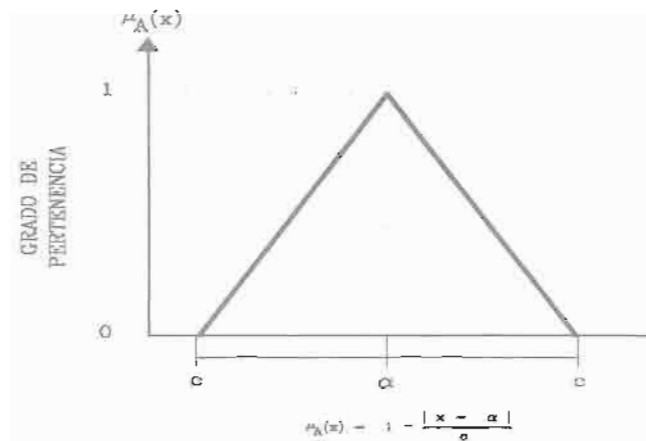


Fig. 3 Funciones de Pertenencia, definida por números difusos triangulares.

### Reglas Si ... Entonces ... en Lógica Difusa

|               |  |
|---------------|--|
| Antecedente : | Este jitomate está un poco rojo                |
| Consecuente : | Si un jitomate está rojo, entonces está maduro |
| Conclusión :  | Este jitomate está un poco maduro.             |

Se considera el consecuente del ejemplo utilizado anteriormente;

Consecuente : Si el jitomate está rojo , está maduro

Los conceptos "jitomate está rojo" y "está maduro", se pueden expresar como Conjuntos Difusos, sin embargo, como tales, representan conceptos independientes. Es la cláusula Si... entonces... la que los relaciona en un solo concepto. Esta cláusula está determinada por la relación difusa que dará como resultado el Conjunto Difuso deseado.

Con esto se puede decir, que todas las acciones que desempeña el ser humano en su vida cotidiana, se pueden expresar como un conjunto de reglas Si... entonces.....

### Fuzificación y Defuzificación

Se conoce como proceso de "fuzificación", al hecho de aplicar la Lógica Difusa al conjunto de reglas Si...entonces... que determinan una acción y posteriormente relacionar todas estas reglas por medio de una suma lógica. Este proceso de fuzificación siempre, va de las premisas o condiciones a la conclusión y, posteriormente pasa por la suma lógica. Hasta aquí se obtiene un resultado que será un número difuso. Para convertir este número difuso a un número ordinario (que puede ser un valor normalizado), según la salida deseada del proceso, es necesario "defuzificarlo" del inglés "defuzzify", que comúnmente se entendería como quitarle lo difuso al resultado. [13]

En la figura 4, se muestra esquemáticamente un proceso de inferencia por medio de los procesos de fuzificación y defuzificación.

Como se puede ver las reglas son independientes unas de otras y por lo tanto se pueden procesar de

manera paralela, hasta el momento en el que se relacionan por medio de la suma lógica.[14]

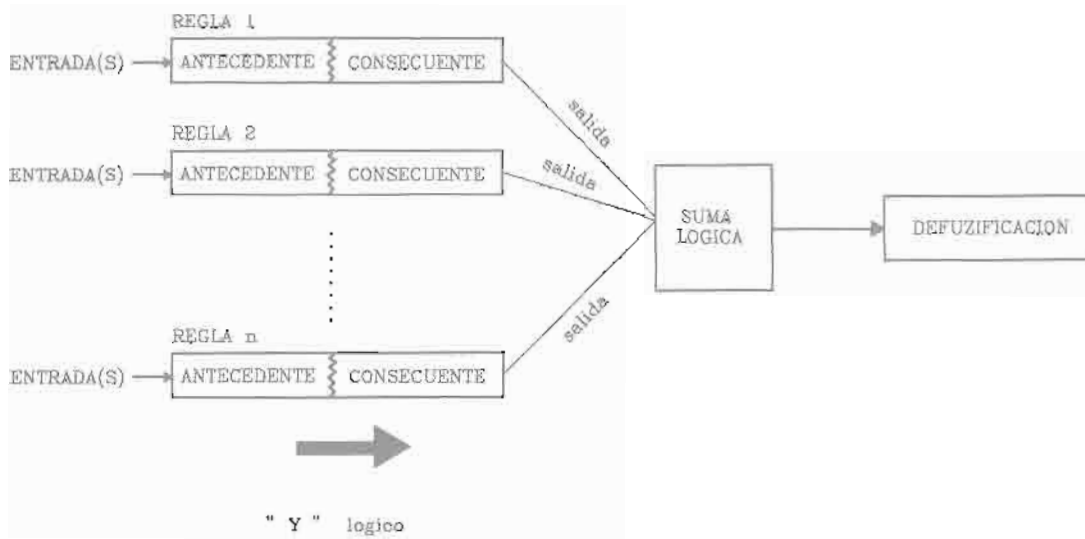


Fig. 4 Proceso de Inferencia Difuso

## CONTROL DIFUSO

Los controladores Difusos son distintos a los controladores clásicos, ya que no necesitan de un modelo o algoritmo matemático que determine cómo las salidas dependen de la entrada para alcanzar el punto de ajuste deseado.

Los Controladores Difusos, representan el comportamiento ambiguo de un sistema o proceso mediante un conjunto de reglas *Si... Entonces...* que llevarán a una conclusión Difusa la cual, se tendrá que defuzificar.

El diagrama básico de un proceso controlado mediante Controlador Difuso es el que se muestra en la figura 5.

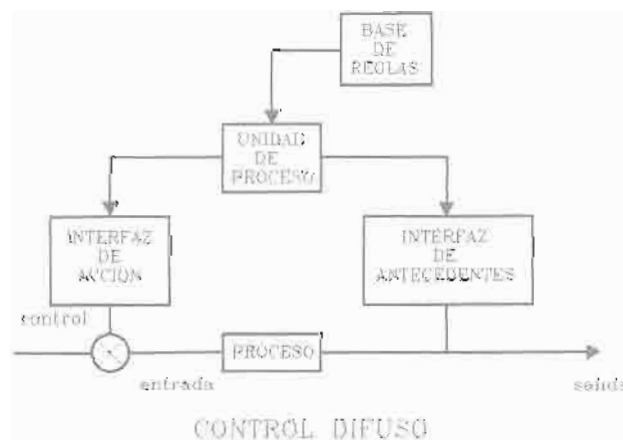


Fig. 5 Diagrama de Bloques Sistema de Control Difuso

La estrategia de control de un Controlador Difuso reside en el conjunto de reglas que determinarán el comportamiento tanto del controlador como del sistema, estas reglas están basadas en la base de conocimientos de un operador experto del proceso. En la siguiente figura se presenta el diagrama de



bloques de un Controlador Difuso.

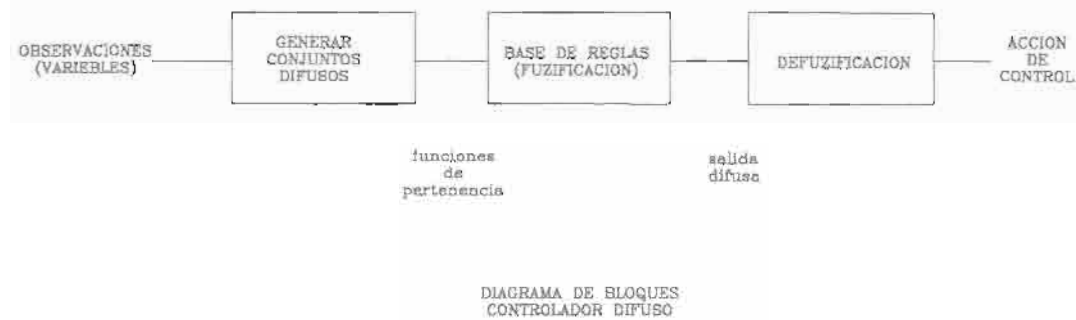


Fig. 6. Controlador Difuso

Del diagrama de bloques anterior, se tiene que el algoritmo de un controlador difuso puede expresarse como sigue:

1. Definir las variables de entrada y de control, así como los estados intermedios que se deben observar y controlar.
2. Definir los conjuntos difusos que expresarán las observaciones y acciones del proceso, es decir, determinar las variables lingüísticas y funciones de pertenencia.
3. Diseñar la base de reglas, que determinará cuáles reglas se activarán bajo qué condiciones
4. Diseñar la unidad de procesamiento difuso, ésta proporcionará la salida difusa.
5. Determinar el método para quitarle lo difuso a la salida, es decir, defuzificar la acción de control correspondiente.

El siguiente cuadro comparativo, muestra las principales diferencias entre el algoritmo para un Controlador Clásico y un Controlador Difuso.

En un controlador PiD convencional, lo que se modela es el sistema o proceso a controlar, mientras que en un Controlador Difuso la parte esencial son las acciones de control dadas por el operador experto.

En el primer caso, el sistema se modela por un conjunto de ecuaciones diferenciales, lo cual no siempre es fácil o incluso posible; y la solución de las ecuaciones diferenciales indican al PID como ajustar sus parámetros para un comportamiento determinado. En un Controlador Difuso, estos parámetros ya están dados en la base de reglas generada por el operador experto.

| PID  | CONTROLADOR DIFUSO  |
|--|---|
| <p><b>Modelado Matemático</b></p> <p>Es necesario conocer el modelo del sistema o cuando menos una muy buena aproximación del mismo. En este caso en particular, por la sencillez del sistema, si se conoce bien el modelo</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>ENTRADA: <math>F(s)</math>      SALIDA: <math>N(s)</math></p> | <p><b>Conocimiento del Sistema</b></p> <p>Requiere el operador experto, mas no es indispensable. En este caso no se contó con uno, por lo que sólo se necesitó conocer un poco el comportamiento del sistema y se recurrió a la modificación tanto de las funciones de pertenencia como de las reglas del proceso</p> |

|   |   |    |    |    |    |    |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |
|---|---|----|----|----|----|----|----|----|---------|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|---|---|----|----|----|----|---|----|---|----|----|---|----|----|----|----|---|----|----|----|----|---|---|----|----|----|
| <p><b>Algoritmo de Control PID Discreto</b></p> $u(kT) = k_p e(kT) + k_i e[(k-1)T] + k_d e[(k-2)T] + u[(k-1)T]$   | <p><b>Base de reglas</b></p> <p>Construir Matriz Difusa</p> <p style="text-align: center;">ERROR</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td> <td>E</td> <td>GN</td> <td>PN</td> <td>Z</td> <td>PP</td> <td>GP</td> </tr> <tr> <td rowspan="6" style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">CAMEROR</td> <td>E</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>GN</td> <td>AM</td> <td>AM</td> <td>AM</td> <td>M</td> <td>M</td> </tr> <tr> <td>PN</td> <td>AM</td> <td>AP</td> <td>AP</td> <td>M</td> <td>DP</td> </tr> <tr> <td>Z</td> <td>AM</td> <td>AP</td> <td>M</td> <td>DP</td> <td>DM</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>AP</td> <td>M</td> <td>DP</td> <td>DP</td> <td>DM</td> </tr> <tr> <td>GP</td> <td>M</td> <td>M</td> <td>DM</td> <td>DM</td> <td>DM</td> </tr> </table> |    | E  | GN | PN | Z  | PP | GP | CAMEROR | E | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | GN | AM | AM | AM | M | M | PN | AM | AP | AP | M | DP | Z | AM | AP | M | DP | DM | PP | AP | M | DP | DP | DM | GP | M | M | DM | DM | DM |
|   | E   | GN | PN | Z  | PP | GP |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |
| CAMEROR   | E   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |
|   | GN  | AM | AM | AM | M  | M  |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |
|   | PN  | AM | AP | AP | M  | DP |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |
|   | Z   | AM | AP | M  | DP | DM |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |
|   | PP  | AP | M  | DP | DP | DM |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |
|   | GP  | M  | M  | DM | DM | DM |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |
| <p><b>Operaciones Necesarias</b></p> <p>Conocer los parámetros de sintonización, es decir las constantes <math>k_p</math>, <math>k_d</math> y <math>k_i</math>, lo cual se hace por métodos como el de Ziegler-Nichols, es muy importante sintonizar óptimamente el controlador, si no, los resultados no serán los deseados. Para ello, es necesario obtener la respuesta en lazo abierto del sistema.</p> <p>Calcula el error <math>e</math>, a partir del nivel en TQ2.</p> <p>Aplica algoritmo de control PID discreto, para ello requiere las constantes de sintonización y conocer el tiempo de muestreo.</p> <p>Determina la acción de control</p> | <p><b>Operaciones Necesarias</b></p> <p>No se requiere ningún cálculo previo, ni modelo del sistema, ni parámetros, ni hacer ninguna modificación manual al sistema. Tampoco se requiere conocer ninguna respuesta del sistema en lazo abierto o antes de controlarlo. En este caso se obtuvo la respuesta sin controlador por fines comparativos.</p> <p>Lee el nivel en TQ2 y calcula error <math>e</math> y <math>e'</math> a partir de la medición anterior.</p> <p>Activa base de reglas. Calcula distribución de la salida y obtiene su centroide difuso.</p> <p>Defuzifica y obtiene acción de control.</p>  |    |    |    |    |    |    |    |         |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |   |    |    |    |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |

**¿Cuándo usar un Controlador Difuso?**

A pesar de las ventajas, arriba mencionadas, no siempre el diseñar un Controlador Difuso es la mejor solución al problema de control [15].

Se recomienda el uso de un Controlador Difuso, cuando las variables de control son continuas, cuando no existe el modelo matemático del sistema o bien, existe pero es difícil de programar o es muy complejo para ser evaluado en tiempo real; cuando se trabaja en ambientes con ruido, o bien se requiere implantar un procesador o sensor poco costoso. Pero, lo más importante, se recomienda cuando se cuenta con el conocimiento de un operador experto, quien pueda determinar tanto las reglas como los Conjuntos Difusos que representen las características plenas de cada variable. [16]



## DISEÑO DEL CONTROLADOR POR MEDIO DE LÓGICA DIFUSA

El Controlador Difuso que se diseñará en esta sección, es para controlar un sistema hidráulico de segundo orden, como el que se muestra en la fig. 6. [17,18]

### Planteamiento del Problema

Se desea controlar el flujo de entrada  $F$ , para alcanzar y/o mantener el nivel de líquido deseado en el tanque TQ2.

Este nivel deseado se indicará como un Punto de Ajuste al controlador, el cual estará en un rango del 0% al 100%, dependiendo del nivel en el tanque TQ2.

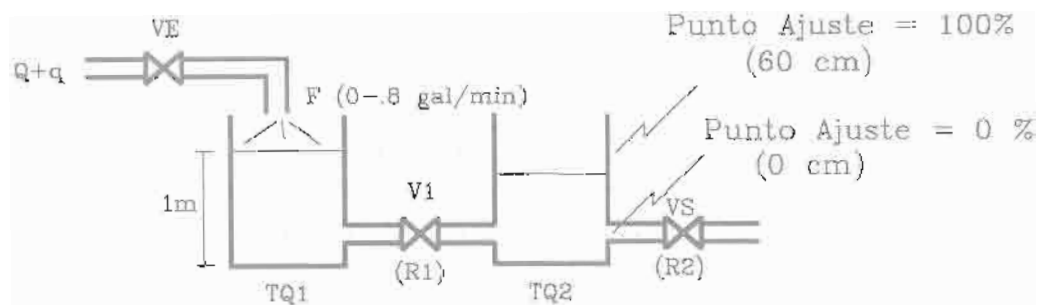


Fig. 6 Sistema a Controlar

### Definición de los Conjuntos Difusos

#### Variables Lingüísticas

Se definen 5 variables lingüísticas para cada una de las variables del proceso. Las variables lingüísticas para el error ( $E$ ) y el cambio en el error ( $E'$ ) son las mismas, sólo que con rangos distintos y obviamente descripciones o representaciones distintas.

#### ERROR $E$

|    | Variable Lingüística | Descripción                     |
|----|----------------------|---------------------------------|
| GN | Grande Negativo      | Na está muy por debajo de Nd    |
| PN | Pequeño Negativo     | Na está un poco abajo de Nd     |
| Z  | Cero                 | Na es igual o casi igual que Nd |
| PP | Pequeño Positivo     | Na está un poco arriba de Nd    |
| GP | Grande Positivo      | Na está muy por arriba de Nd    |

#### CAMBIO DE ERROR $E'$

|    | Variable Lingüística | Descripción                       |
|----|----------------------|-----------------------------------|
| GN | Grande Negativo      | El tanque se vacía rápidamente    |
| PN | Pequeño Negativo     | El tanque se vacía moderadamente  |
| Z  | Cero                 | El tanque no se llena ni se vacía |
| PP | Pequeño Positivo     | El tanque se llena moderadamente  |
| GP | Grande Positivo      | El tanque se llena rápidamente    |



FLUJO F (proporcional a la apertura de la válvula)

| Variable           | Descripción   |
|--------------------|---|
| <b>Lingüística</b> |   |
| DM                 | Disminuir Mucho<br>Se requiere cerrar mucho la válvula  |
| DP                 | Disminuir Poco<br>Se requiere cerrar un poco la válvula |
| M                  | Mantener<br>Mantener apertura de válvula                |
| AP                 | Aumentar Poco<br>Se requiere abrir un poco la válvula   |
| AM                 | Aumentar Mucho<br>Se requiere abrir mucho la válvula    |

### Funciones de Pertencia

Se definen las Funciones de Pertencia del tipo triangular, traslapadas con un traslape menor al 25%; cumplen el requisito de que entre más satisfaga una entrada x, las condiciones que definen una función de pertencia, su grado de pertencia será más cercano a 1.

Son 5 los conjuntos difusos que se forman y cuentan con los rangos que se muestran en las figuras 7,8, y 9, las cuales presentan las funciones de pertencia para el ERROR, CAMBIO DEL ERROR y FLUJO, respectivamente.

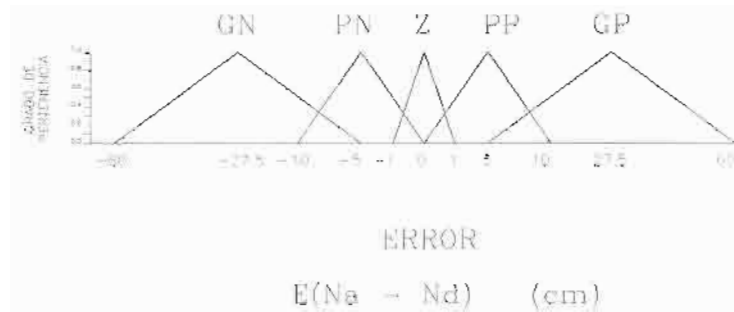


Fig. 7 Funciones de Pertencia ERROR

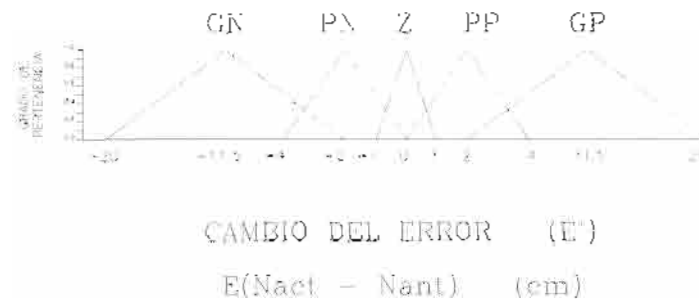


Fig. 8. Funciones de Pertencia Cambio de Error

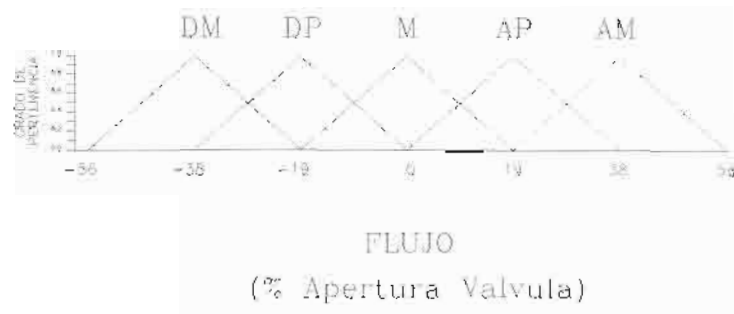


Fig. 9 Funciones de Pertenencia FLUJO

### Diseño de la Base de Reglas

Por la forma en cómo se definieron las variables lingüísticas y las funciones que las definen, se cuenta con un total de  $5 \times 5 = 25$  reglas, de las cuales no todas son igual de importantes.

Para este caso se ha considerado necesario el definir las 25 reglas ya que los rangos en los que se le permitirá responder al controlador, incluye los casos más críticos en los que puede estar el sistema, como ya se ha mencionado, éstos son, cuando el tanque esté vacío y se requiera un punto de ajuste del 100% o viceversa. Para poder responder bajo estas circunstancias críticas, es necesario definir todas las reglas.

|          |    | ERROR |    |    |    |    |
|----------|----|-------|----|----|----|----|
|          |    | E     | GN | PN | Z  | PP |
| CAMERIOR | E  | 1     | 2  | 3  | 4  | 5  |
|          | GN | AM    | AM | AM | M  | M  |
|          | PN | AM    | AP | AP | M  | DP |
|          | Z  | AM    | AP | M  | DP | DM |
|          | PP | AP    | M  | DP | DP | DM |
| GP       | M  | M     | DM | DM | DM |    |

Fig. 10. Matriz Difusa para el control del Sistema hidráulico

La *matriz Difusa* que se muestra en la figura 10, incluye las 25 reglas que determinan totalmente la respuesta del controlador para cualquier condición de entradas. Las reglas que están sombreadas, son aquellas más importantes, o bien, las que se utilizan con mayor frecuencia, dado que una vez que el sistema ha respondido a los casos críticos (reglas de los extremos) su respuesta estará dentro de las 11 reglas consideradas más importantes.

## Procesamiento Difuso y Obtención de la Acción de Control

Como se muestra en la sección anterior, las premisas o condiciones de las reglas, están unidas por un "Y" lógico, es decir, para que una regla se active, se tienen que cumplir ambas condiciones; a su vez, las 25 reglas se relacionan entre si por medio de un "O" lógico, esto es, que se puede activar una u otra regla o bien, otras reglas.

Recordando un poco, se calculan previamente los centroides de las funciones de pertenencia definidas para el Flujo, dado que las funciones consideradas son simétricas, el cálculo del centroide se reduce al producto punto entre el vector formado por los cinco centroides y el vector formado por los cinco grados de pertenencia, entre este mismo vector, como se muestra a continuación :

$$C = [C\_DM \ C\_DP \ C\_M \ C\_AP \ C\_AM]$$

Donde :

C = vector de centroides  
 C\_DM = centroide de la función de pertenencia DM  
 C\_DP = centroide de la función de pertenencia DP  
 C\_M = centroide de la función de pertenencia M  
 C\_AP = centroide de la función de pertenencia AP  
 C\_AM = centroide de la función de pertenencia AM

y el vector formado por los grados de pertenencia de los consecuentes activados por las reglas,

$$GP = [GP\_DM \ GP\_DP \ GP\_M \ GP\_AP \ GP\_AM]$$

donde:

GP = vector formado por los grados de pertenencia activados para cada una de las 5 funciones de salida  
 GP\_DM = Grado de pertenencia de DM (Disminuye Mucho)  
 GP\_DP = Grado de pertenencia de DP (Disminuye Poco)  
 GP\_M = Grado de pertenencia de M (Mantener flujo)  
 GP\_AP = Grado de pertenencia de AP (Aumentar Poco)  
 GP\_AM = Grado de pertenencia de AM (Aumentar Mucho)

de modo que el centroide difuso está dado por :

$$cd = \frac{C\_DM * GP\_DM + C\_DP * GP\_DP + C\_M * GP\_M + C\_AP * GP\_AP + C\_AM * GP\_AM}{GP\_DM + GP\_DP + GP\_M + GP\_AP + GP\_AM}$$

donde **cd** = centroide difuso.

En la figura 11 se esquematiza este centroide difuso para una entrada determinada x.

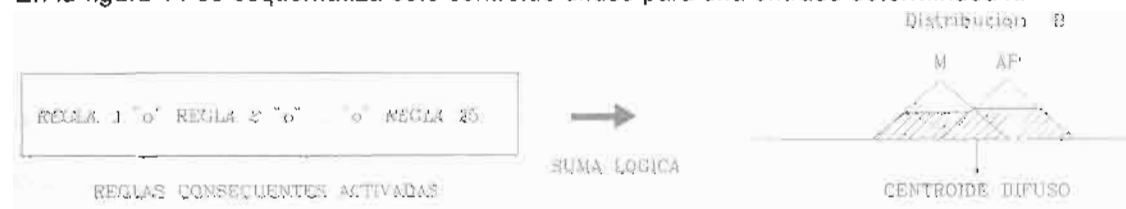


Fig. 11 Centroide Difuso



Como ya se explicó, este valor es único y considera toda la distribución de la salida  $F$ , el valor **centroide difuso** es un número no difuso y es el que determina la acción de control  $u$  que será la variable manipulada que entra al sistema, produciendo una salida y la cual se retroalimentará y se tendrá otra entrada  $x$  para el controlador; este proceso se debe repetir hasta que la salida y sea igual a la entrada deseada, en este caso, hasta que el sistema se estabilice en el nivel determinado por el punto de ajuste deseado.

## RESULTADOS

Tanto el modelo dinámico del sistema hidráulico como el controlador difuso fueron programados en Matlab [19,20]. Se analizan 2 casos como ejemplo:

**Caso 1:** El nivel en el tanque TQ2 es de 60 cm y se requiere un punto de ajuste del 0%, es decir, vaciar el tanque por completo y mantenerlo así. La figura 12 muestra estas respuestas; la 12.a. presenta la respuesta con Controlador Difuso, se observa que las reglas que actúan en las primeras 4 o 5 iteraciones son las de los extremos de la Matriz Difusa y luego, las reglas centrales estabilizan al sistema logrando esto en 10 iteraciones.



Fig. 12.a. Controlador Difuso (Punto de ajuste 0%, nivel actual 60 cm)

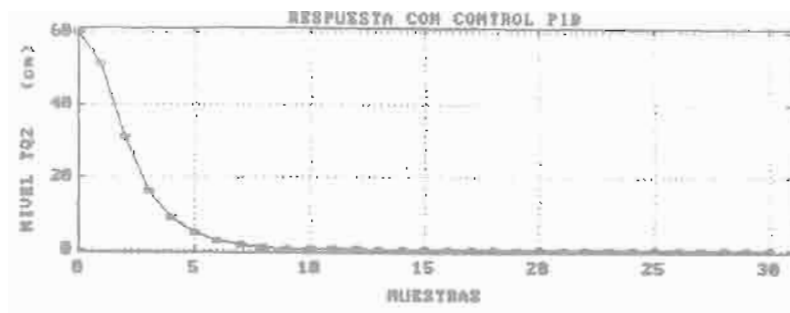


Fig. 12.b. Controlador PID

Fig. 12. Respuestas con punto de ajuste del 0% y nivel actual 60 cm

La gráfica 12.b muestra la respuesta del PID ante las mismas condiciones de entrada; se ve que responde bastante bien, pero un poco más lento que el controlador Difuso, ya que éste alcanza el valor deseado por primera vez en 6 iteraciones y el PID en 10. Al igual que en el caso anterior y en todos los casos, esto sucedió para unas constantes específicas. También se observa, que el nivel no llega hasta los 0 cm, sino que se queda un poco arriba (0.2 cm) y sigue bajando lentamente a lo largo del tiempo. Si se cambia la constante proporcional, no llega a cero sino hasta después de un gran número de iteraciones.

**Caso 2:** Para el caso en el cual los puntos de ajuste sean valores intermedios de puntos que desean aumentar el nivel en el tanque TQ2; como primer resultado se presenta el obtenido para un punto de ajuste del 6% y un nivel actual de 0 cm., éste con la finalidad de ver si los controladores responden adecuadamente para cambios pequeños; los resultados se presentan en las figuras 13a y 13b.



Fig. 13.a. Respuesta con Controlador Difuso



Fig. 13.b. Respuesta con controlador PID

Fig. 13. Respuestas ante un punto de ajuste del 6% y un nivel actual de 0cm

Como se puede observar, el controlador Difuso se estabiliza en el valor deseado en aproximadamente 5 iteraciones, mientras que el controlador PID lo logra en casi 10 iteraciones, esto indica que la respuesta del controlador Difuso para los cambios pequeños es mucho mejor que la del PID.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo ha tenido como objetivo el diseñar un controlador por medio de la Lógica Difusa, se diseñó el Controlador Difuso para un sistema hidráulico porque se considera que éste es uno de los procesos que más comúnmente se encuentran en la industria. Se dió una introducción a Lógica Difusa como un método alternativo de control.

Con este trabajo se ha intentado dar una visión general de los conceptos que comprenden a la Lógica Difusa, desgraciadamente, no se cubren en su totalidad los alcances de esta teoría, los cuales van mucho más allá de los expuestos en este trabajo. La teoría, como se ha desarrollado a lo largo de estas secciones ha sido en su forma más simple, con el objeto de conocer su funcionamiento y factibilidad de aplicación en el control de procesos. [21-24]

El campo de aplicaciones de la Lógica Difusa es cada día más amplio, y si no se aplica para el control de procesos, se puede aplicar en cualquier proceso en el que intervenga de manera directa acciones dadas por el pensamiento humano.



## REFERENCIAS

1. Zadeh, Lofti A.; *Fuzzy Sets and Applications: Selected Papers*, John Wiley and Sons Inc., USA, 1987.
2. Johnson, Curtis; *Process Control Instrumentation Technology*, Regents/Prentice Hall, Inc., USA, 1993.
3. Kinney, Thomas; *Tuning Process Controllers*, Chemical Engineering Magazine, USA, Septiembre, 1983.
4. Gordon, Lewis; *Basic Concepts, Terminology and Techniques for Process Control*, Chemical Engineering Magazine, USA, Mayo, 1983.
5. Tanaka, Masato; *Fuzzy Data Smoothing*, Individual Paper Preprint from the ISA ' 92 International Conference and Exhibition, USA, Octubre, 1992.
6. Zimmermann, H.J.; *Fuzzy set Theory*, Kluwer Academic Publishers, USA, 1991.
7. Hohfeld, Markus; Schurmann, Bernd; *The Roles of Neural Networks and Fuzzy Logic in Process Optimization*, Siemens Review, Alemania, Septiembre, 1993.
8. Pedrycz, Witold; *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, John Wiley and Sons Inc., USA, 1989.
9. Yamatake, Li-Zheng, *Human Operation Emulation Technique Using Fuzzy Control*, Individual Paper Preprint from the ISA ' 92 International Conference and Exhibition, USA, Octubre 1992.
10. Self, Kevin; *Designing with Fuzzy Logic*, IEEE Spectrum, USA, Noviembre, 1990.
11. Terano, Toshiro; Asai, Kiyoji; Sugeno, Michio; *Fuzzy Systems Theory and Its Applications*, Academic Press Inc., USA, 1992.
12. Viot, Greg; *Fuzzy Logic in C*, Dr. Dobb's Journal, USA, February , 1993.
13. Kosko, Bart; *Neural Networks and Fuzzy Systems*, Prentice Hall Inc., USA, 1992.
14. Omron Electronics, Inc; *Fuzzy Logic a 21st Century Technology*, Technical Information, USA, 1991.
15. Schwarts, Daniel; Klir, George; *Fuzzy Logic Flowers in Japan*, IEEE Spectrum, USA, Julio, 1992.
16. Cox, Earl; *Fuzzy Fundamentals*, IEEE Spectrum, USA, Octubre, 1992.
17. Aranda, Guillermo; *Prácticas para el Laboratorio de Control*, Manual , ULSA, México, 1993.
18. Rosciano, Antonio, *Diseño e Implementación del Laboratorio de Control con un Sistema Hidráulico*, Tesis Profesional, ULSA, México, 1983.
19. Etter, D.M.; *Engineering Problem Solving with Matlab*, Prentice Hall Inc.. USA, 1993.
20. The Matlab Curriculum Series; *The Student Edition of Matlab for MS-DOS Personal Computers*, The Math Works Inc., USA, 1992.
21. Spinrad, Mark; *Self-Organizing Fuzzy Control*, Individual Paper Preprint from the ISA ' 92 International Conference and Exhibition, USA, Octubre, 1992.
22. Yokogawa Electric Corporation, *EF-302 Fuzzy Control Function Operation Manual*, Japón, Diciembre, 1992..
23. Yokogawa Electric Corporation, *Introduction to Fuzzy Control*, Technical Information, Japón, Marzo, 1992.
24. Youngblood, Rick; *Fuzzy Logic Control of Industrial Processes*, Individual Paper Preprint from the ISA ' 91 International Conference and Exhibition, USA, Octubre, 1991.