



APLICACIONES INDUSTRIALES, DOMÉSTICAS Y OTROS  
CAMPOS DE LA LÓGICA DIFUSA

Ortiz Turizo, Jorge Alberto

Vanegas Casadiego, Enrique  
Director

Universidad Tecnológica de Bolívar  
Ingeniería Electrónica  
Cartagena de Indias  
2006

## 1. INTRODUCCION

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 por 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.

En 1960, Lotfi Zadeh inventó la lógica difusa guiado por el principio de que las matemáticas pueden ser usadas para encadenar el lenguaje con la inteligencia humana.

Es ideal para el modelado y el control de sistemas no lineales debido a sus características de ambigüedad, (en contraste con los si/no o verdadero / falso de la lógica tradicional) que permiten considerar grados en las características consideradas en los problemas de Ingeniería, incluso cuando no se disponga de modelos matemáticos rigurosos.

Su aplicación en el área de control nace del fundamento de que los operadores humanos son capaces de efectuar en muchos casos un control mas efectivo que los controladores automáticos tradicionales, porque están capacitados para tomar decisiones correctas con base a información lingüística imprecisa. Los sistemas de lógica difusa reúnen el conocimiento de humanos expertos en un área específica. De esta forma los datos son recopilados y representados de una manera mas precisa como un conjunto de reglas formuladas según sentencias condicionantes con la utilización de expresiones lingüísticas.

## **1.1 RESEÑA HISTORICA Y ESTADO DEL ARTE**

Desde la época de los grandes filósofos griegos se ha venido cuestionando la efectividad de la dicotomía cierto-falso y posteriores pensadores también han formulado sus conceptos hasta cuando Zadeh habla de los conjuntos difusos y moldea luego la teoría de la lógica difusa.

En el 380 a.C., Aristóteles propone la existencia de grados de verdad o falsedad.

En el siglo XVIII, en Inglaterra el filósofo David Hume habla de la lógica del sentido común (razonamiento basado en la experiencia que la gente comúnmente adquiere de sus vivencias por el mundo). El filósofo norteamericano Charles Sander Pierce, fue el primero en considerar la vaguedad en vez de la dicotomía cierto-falso, como una forma de enmarcar cómo el mundo y las personas funcionan.

También en este siglo es inventada la teoría original de los conjuntos clásicos de unos y ceros por el matemático alemán Georg Kantor.

En 1920 el filósofo polaco Jan Lukasiewicz propone la primera lógica de vaguedad. Desarrolló conjuntos con posibles valores de pertenecía 0,  $\frac{1}{2}$  y 1 (lógica trivaluada). Posteriormente los extendió hacia un número infinito de valores entre 0 y 1 (lógica multivaluada).

En 1962 Lotfi Zadeh cuestiona la efectividad de las matemáticas tradicionales, las cuales resultaban intolerantes ante la imprecisión y ante verdades parciales.

En 1964 aparece por primera vez la noción de conjuntos difusos en un memorando debido al mismo Zadeh en la Universidad de California en Berkeley. Dicho memorando es publicado un año más tarde bajo el título: "**Fuzzy Sets**" (Conjuntos difusos)

En 1965, la revista "**Information and Control**" publica, "**Fuzzy Sets**".

En 1971, Zadeh publica el artículo, "**Quantitative Fuzzy Semantics**", en donde Introduce los elementos formales que acabarían componiendo el cuerpo de la Doctrina de la lógica difusa y sus aplicaciones tal como se conocen en la actualidad.

En 1974, el Británico Ebrahim Mandani, demuestra la aplicabilidad de la lógica difusa en el campo del control. Desarrolla el primer sistema de control difuso para la regulación de un motor de vapor.

A finales de los 70s, Los ingenieros daneses Lauritz Peter Holmbland y Jens-Jurgen Ostergaard desarrollan el primer sistema de control difuso comercial, destinado a una planta de cemento, también crearon uno para un horno de frutas en Suecia, y muchos otros.

En 1986, Yamakawa, publica el artículo, "Fuzzy **Controller hardware system**". Desarrolla controladores **Fuzzy** en circuitos integrados.

En 1987, se inaugura en Japón el subterráneo de Sendai, uno de los más espectaculares sistemas de control difuso creados por el hombre. Desde entonces el controlador inteligente ha mantenido los trenes rodando eficientemente. En el mismo año en Japón aparece el "**FUZZY BOOM**", donde se comercializan multitud de productos basados en la lógica difusa.

En 1987, A partir de 1990 se comienza a implementar en los controles de inyección electrónica de carburante y en los sistemas de control de guiado automático de coches, haciendo los controles complejos más eficientes y fáciles de utilizar.

Las lavadoras "Difusas" o "**Fuzzy**" tienen más de 400 ciclos preprogramados; a pesar de su complejidad tecnológica resultan más fáciles de operar que las lavadoras tradicionales. El usuario solo pone en marcha la lavadora, el resto queda en manos del control difuso. Él evalúa automáticamente el material, el volumen, la suciedad de la ropa, elige el ciclo óptimo de lavado, así como el caudal de agua que ha de emplear.

En acondicionadores de aire, la lógica difusa ahorra energía dado que comienza a enfriar con mayor potencia solo cuando un sensor detecta la presencia de personas en la habitación, permaneciendo hasta entonces en una situación prácticamente de **"stand-by"**.

Se ha empleado en los controles de cámaras de foto y vídeo, e incluso en sistema de gestión financiera, en tratamientos de depuración de agua en control de robots, en detección y control de averías.

En las actividades domésticas cotidianas se inventó un sistema de ventilación que utiliza control difuso para conmutar un ventilador según los conocimientos de cantidad de polvo, olores, temperatura y humedad ambiente.

El baño difuso, por ejemplo tiene un controlador que mantiene el agua a la temperatura ideal para el usuario, "ni muy caliente, ni muy fría". Si en un principio el agua esta templada, añade el agua caliente en menor proporción que si estuviese fría, evitando elevar demasiado la temperatura del agua.

Entre Otros Sistemas se encuentran: El Televisor SONY, que automáticamente ajusta contraste, brillo, y tonalidades de color.

En la tecnología automotriz, los carros NISSAN, poseen transmisión automática y frenos antibloqueo.

Las Industrias Mitsubishi, tienen designado un sistema de control difuso para elevadores, mejorando la eficiencia en el procedimiento manual que siempre se presenta cuando grandes grupos esperan para tomar el elevador al tiempo.

En los EE.UU., la compañía de elevadores OTIS, está desarrollando sus propios productos para horarios en elevadores según las demandas de variaciones de tiempos.

De igual forma se emplea para una gran variedad de controladores industriales, dispositivos médicos, sistemas de seguridad en reactores nucleares, robots y otros sistemas relativamente complejos.

Dada la facilidad de la lógica difusa para representar el conocimiento, se ha empleado también en la solución de problemas sociológicos, psicológicos, políticos, administrativos, económicos, epidemiológicos y de otras disciplinas. Existen paquetes como el **Fuzzy Decision Maker**, que ayudan a las personas a tomar decisiones de todo tipo, como por ejemplo solucionar un problema familiar.

## **1.2 IMPACTO EN COLOMBIA**

Debido a las necesidades actuales por parte de consumidores, que cada día demandan bienes y servicios más inteligentes, más versátiles, prácticos y eficientes, que a su vez sean capaces de tomar decisiones rutinarias por nosotros y a la premura de tiempo disponible para efectuar otro tipo de actividades, se puede prever que las Naciones y particularmente las Industrias o empresas que deseen ser competitivos, deben

empezar a adoptar técnicas modernas de este tipo (tecnologías inteligentes) en el desarrollo de sus productos, de tal manera que aquellas que no lo hagan, estarán destinadas a perder mercado y competencia.

En Colombia varias universidades han generado importantes aportes al desarrollo de la ciencia y la tecnología tomando como herramienta los conceptos y principios de la lógica difusa en su tarea de investigación. Como ejemplo de lo anterior podemos citar a la universidad de los Andes la cual ha desarrollado el arranque de un reactor anaerobio piloto usando lógica difusa para el tratamiento de aguas residuales como alternativa de control del pH.

Por su parte la universidad nacional de Colombia también se ha dado a conocer en este campo con un sistema de lógica difusa como herramienta para la bioindicación de la calidad del agua con macro invertebrados acuáticos en la sabana de Bogotá. La facultad de ingeniería de la misma universidad ha desarrollado un sistema de lógica difusa para determinar la geometría óptima de la herramienta de corte en operaciones de maquinado.

De la misma forma otras universidades importantes del país actualmente se encuentran desarrollando trabajos investigativos con lógica difusa como la universidad del Valle así como empresas importantes del país como Incauca que emplea un trapiche con tecnología **Fuzzy**.

## 1.3 MARCO TEORICO

**1.3.1 ¿Qué es la lógica difusa?** Metodología que proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta, en general la LD imita como una persona toma decisiones basada en información con las características mencionadas.

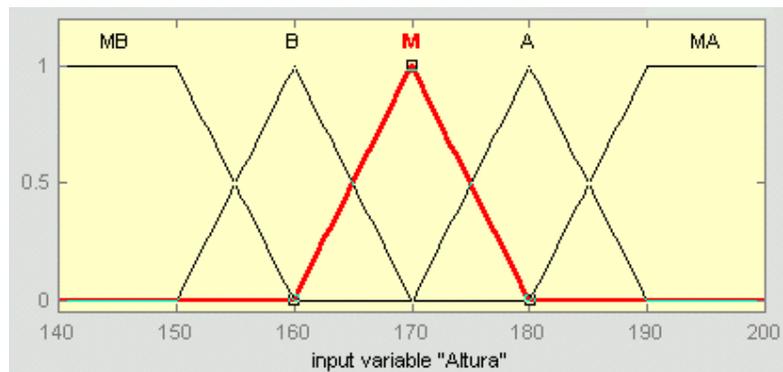
**1.3.2 Conjuntos difusos.** El concepto clave para entender como trabaja la lógica difusa es el de conjunto difuso, se puede definir un conjunto difuso de la siguiente manera: teniendo un posible rango de valores al cual llamaremos U, por ejemplo  $U = \mathbb{R}^n$ , donde  $\mathbb{R}^n$  es un espacio de n dimensiones, a U se le denominará Universo de discurso. En U se tendrá un conjunto difuso de valores llamado F el cual se caracteriza por una función de pertenencia  $\mu_f$  tal que  $\mu_f: U \rightarrow [0, 1]$ , donde  $\mu_f(u)$  representa el grado de pertenencia de un u que pertenece a U en el conjunto difuso F.

Supóngase que se desea representar con conjuntos difusos la variable altura de una persona, en este caso el universo de discurso será el rango de posibles valores de la altura que tenga una persona adulta, se escogerá un rango entre 140 cm y 200 cm, valores por fuera de este rango son posibles pero escasos. El universo de discurso =  $[140, 200]$ , para denominar los conjuntos difusos se suele trabajar con etiquetas lingüísticas similares a las que se usan de manera coloquial, en la vida diaria se dice que una persona es Muy Baja (MB), Baja (B), Mediana (M), Alta (Alta) y Muy Alta (MA).

Etiqueta Rango [Min, Max]

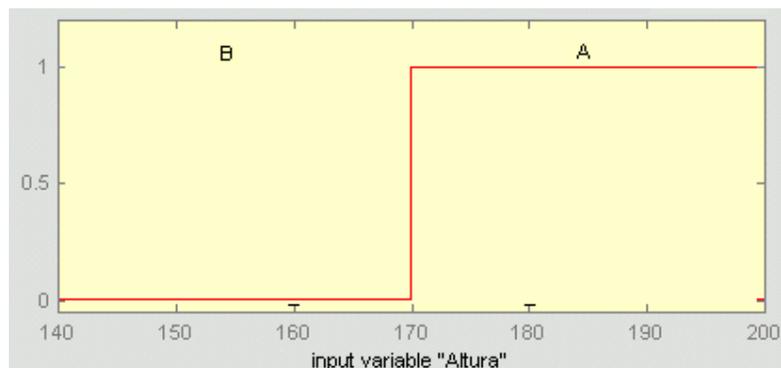
MB [140,160] B [160,170] M [170,180] A [180,190] MA [190,200]

Figura 1. Conjuntos difusos para la altura de una persona.



Si en el ejemplo anterior se desea trabajar con conjuntos clásicos (crisp) se tienen dos opciones o alguien Alto (A) o Bajo (B). Se supondrá que alguien es Alto si mide mas de 170cm en caso contrario es bajo.

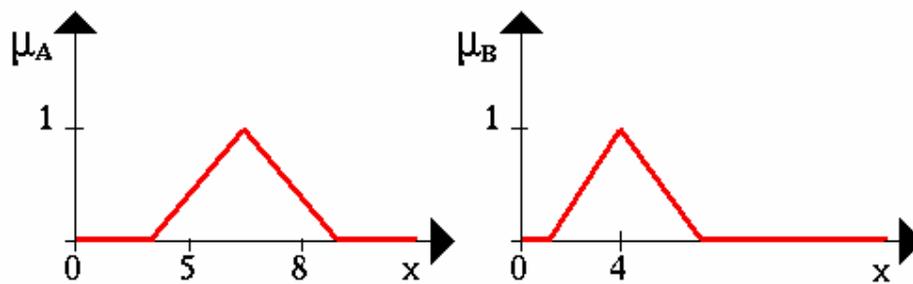
Figura 2. Conjuntos **crisps** para la altura de una persona.



**1.3.3 Operaciones entre conjuntos difusos.** De manera similar como entre conjuntos clásicos se realizan operaciones entre ellos, en conjuntos difusos se puede hacer lo mismo, pero debido a la naturaleza diferente de ellos la formulación de estas operaciones es algo especial.

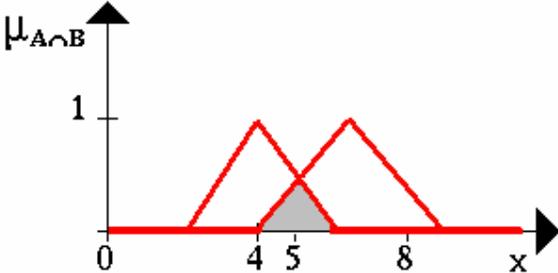
En la figura 3, se muestran dos conjuntos difusos los cuales se emplean para definir las operaciones fundamentales que entre ellos se pueden realizar.

Figura 3. Conjuntos difusos entre los que se definirán las operaciones



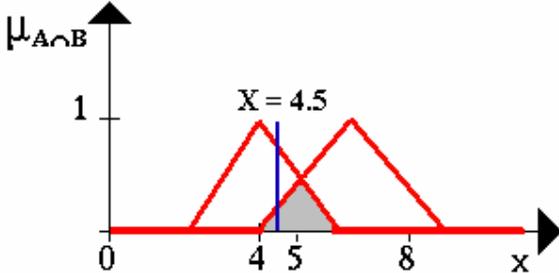
**Intersección.** La idea intuitiva de intersección heredada de los conjuntos clásicos expresa que el conjunto intersección de dos conjuntos A y B, se define como los elementos que están en el conjunto A Y en el conjunto B; de esta manera la intersección entre conjuntos se puede entender como el una operación tipo **AND** entre los mismos.

Figura 4. Intersección entre dos conjuntos difusos



De manera similar a como se define el nivel de pertenencia a un conjunto difuso, se puede encontrar el nivel de pertenencia del valor  $x=4.5$ .

Figura 5. Valor de pertenencia para  $x=4.5$  a la intersección de A y B



Gráficamente se observa que el valor  $x=4.5$  tiene un nivel de pertenencia de 0.8 respecto al conjunto A y de 0.2 respecto al conjunto B, y el valor de pertenencia de  $x=4.5$  a la intersección (zona sombreada) se desea expresar como una operación entre estos valores, se observa que de estos dos valores, el que "toca" la zona sombreada es el de 0.2 por lo que de manera intuitiva se puede afirmar que el valor de pertenencia del valor dado a la intersección de los conjuntos A y B es el **valor mínimo** de los valores de pertenencia de  $x=4.5$  valor a los conjuntos de manera individual.

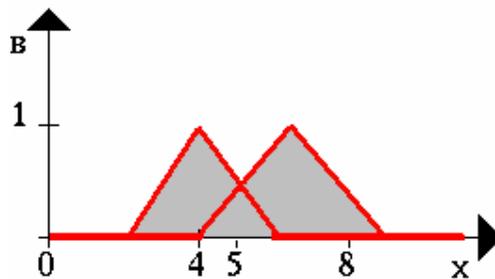
De manera matemática lo anterior se puede expresar:

$$C = A \cap B \quad \forall x \in U$$
$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

**Unión.** La idea intuitiva de unión heredada de los conjuntos clásicos expresa que el conjunto unión de dos conjuntos A y B, se define como los elementos que están en el conjunto A o que están en el conjunto B. de esta manera la unión entre conjuntos se puede entender como el una operación tipo **OR** entre los mismos.

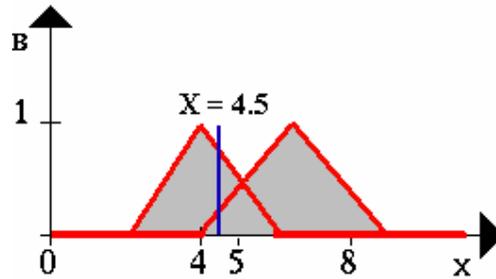
Siguiendo esta idea, se podría graficar la unión de los conjuntos difusos mostrados en la figura 3.

Figura 6. Unión entre dos conjuntos difusos.



De manera similar a como se define el nivel de pertenencia a un conjunto difuso, se puede encontrar el nivel de pertenencia del valor  $x = 4.5$  a la unión de los dos conjuntos difusos mostrados en la fig.6

Figura 7. Valor de pertenencia para  $x=4.5$  a la unión de A y B.



Gráficamente si el valor  $x=4.5$  tiene un nivel de pertenencia de 0.8 respecto al conjunto A y de 0.2 respecto al conjunto B, y el valor de pertenencia de  $x= 4.5$  a la unión (zona sombreada) se desea expresar como una operación entre estos valores se observa que de estos dos valores, el que "toca" la zona sombreada es el de 0.8 por lo que de manera intuitiva se puede afirmar que el valor de pertenencia del valor dado a la unión de los conjuntos A y B es el **valor máximo** de los valores de pertenencia de  $x =4.5$  a los conjuntos de manera individual, de manera matemática lo anterior se puede expresar así:

$$C = A \cup B \quad \forall x \in U$$

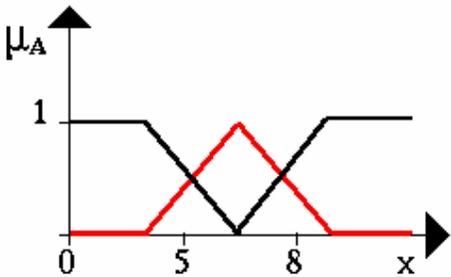
$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

**Complemento.** El complemento es el conjunto de los elementos que le falta a otro conjunto para igualarse al conjunto universo, según la lógica clásica.

De la misma manera en conjuntos difusos se habla del complemento como el conjunto formado por los valores de pertenencia que le permitirían al conjunto obtener el valor máximo de pertenencia posible, siendo 1 el valor máximo de pertenencia que un

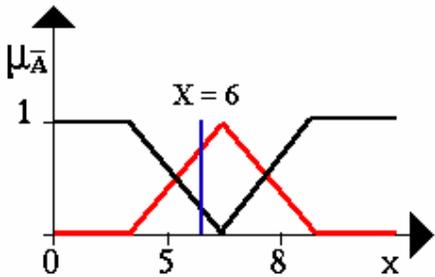
conjunto difuso puede suministrar, este conjunto se podría formar restándole a 1 los valores de pertenencia del conjunto difuso al que se desea encontrar el complemento. Gráficamente esto se visualiza así:

Figura 8. Complemento de un conjunto difuso



En la gráfica anterior el conjunto complemento se ha dibujado con trazo negro. De manera similar a como se define el nivel de pertenencia a un conjunto difuso, se puede encontrar el nivel de pertenencia del valor  $x = 6$  al complemento del conjunto difuso A.

Figura 9. Valor de pertenencia para  $x=6$  al complemento de A



En  $x=6$  se observa que el valor de pertenencia al conjunto A es de 0.8, si se piensa en el complemento como lo que le falta a este valor para alcanzar el máximo valor posible que es 1 se tendría que el nivel de pertenencia de  $x=6$  al complemento es de 0.2, en la

gráfica se puede verificar esta conclusión. Matemáticamente esta operación se expresa así:

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

**1.3.4 Control difuso.** El control por lógica difusa (CLD) puede desempeñar las mismas funciones que realiza el control lineal. La LD puede controlar simples lasos de realimentación, lasos interactivos o procesos multivariables.

El control por lógica difusa puede proporcionar un mejor desempeño, variabilidad de procesos mas pequeños o mejor robustez.. La diferencia viene de los cálculos basados en lógica difusa. Al aplicar cálculos basados en lógica difusa es posible diseñar un controlador no lineal, sin un conocimiento detallado de la no-linealidad de los puntos de operación.

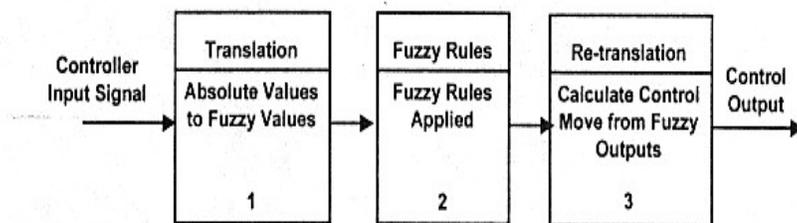
. Tabla 1. Principales diferencias entre el control difuso y el clásico.

	<b>CONJUNTOS</b>	<b>PERTENENCIA</b>	<b>VALORES LOGICOS</b>	<b>OPERACIONES</b>
<b>LOGICA CLASICA.</b>	Conjuntos crisp.	In ambiguos	“Verdad”, “Falso” o 1,0	Dos valores lógicos
<b>LOGICA DIFUSA.</b>	Conjuntos Difusos	Varios grados de pertenencia definidos por la función de pertenencia	Cualquier valor en el rango (0,1) definido por la función de pertenencia	Multi-valores lógicos

**Construyendo un controlador difuso.** Un controlador difuso típico desempeña tres funciones básicas. (ver figura 10).

1. Convertir valores de entrada en valores difusos o *fuzzificación*.
2. Aplicar Multi-valores Lógicos *reglas de inferencia* para desarrollar la acción control.
3. Re-convertir los valores difusos en señales continuas, o *defuzzificación*.

Figura 10. Diagrama de un controlador difuso típico.



**Fuzzificación.** Los conjuntos difusos y las funciones de pertenencia se emplean para convertir los valores de entrada de un controlador en valores difusos.

Se decide primero como se quiere cuantificar lógicamente las entradas de control, al definir los conjuntos difusos. Los conjuntos difusos típicos para señales de entrada son: Negativo Grande, Negativo Medio, Negativo Pequeño, Pequeño, Cero, Positivo Pequeño y Positivo Grande. Para diseños más simples los conjuntos difusos son Positivo y Negativo o Bajo y Alto.

El siguiente paso es definir las funciones de pertenencia para cada conjunto difuso, para establecer fronteras para el conjunto. Las funciones de pertenencia se definen

analíticamente. Ejemplos de funciones de pertenencia simples para conjuntos difusos Bajo y Alto se dan por las formulas (x) y (y) y se presentan gráficamente en la figura 11. El nivel se usa como entrada de control. Antes de aplicar fuzzificación, la entrada de control se normaliza en el rango 0-1.

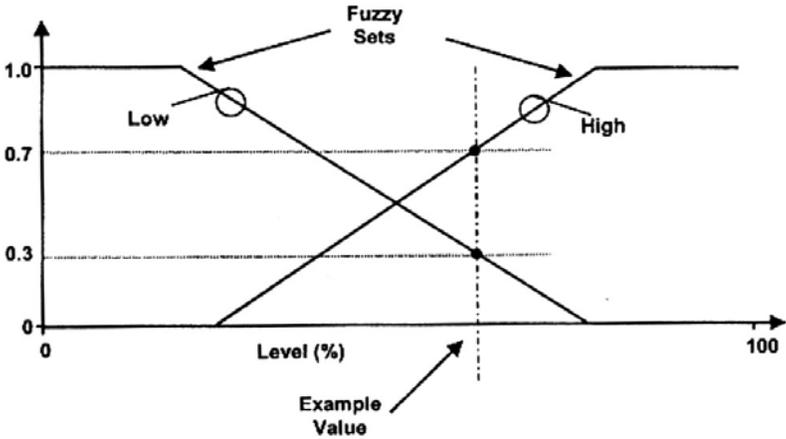
$$M(\text{Alto}) = 1.0 * \text{Nivel} \quad 0 \leq \text{Nivel} \leq 1. \quad (x)$$

$$M(\text{Bajo}) = 1.0 - 1.0 * \text{Nivel} \quad 0 \leq \text{Nivel} \leq 1. \quad (y)$$

La formula (x) define la función de pertenencia para un conjunto difuso Alto, y la formula (y) para un conjunto difuso Bajo. Un nivel igual al 70 % o 0.7 genera un grado de pertenencia de 0.7 para la función de pertenencia Alto y 0.3 para la función de pertenencia Bajo. Esto se puede expresar como:

$$M(\text{Bajo}) = 0.3; \quad M(\text{Alto}) = 0.7$$

Figura 11. Funciones de pertenencia para conjuntos difusos Alto y Bajo.



En lugar de exigir una pertenencia completa en un estado o el otro, la lógica difusa permite al nivel de un tanque, por ejemplo, ser en cierto modo alto (grado de pertenencia = 0.7) y en cierto modo bajo (grado de pertenencia = 0.3) al tiempo.

Las funciones de pertenencia son de varios tipos: lineal, como en el ejemplo de arriba; parabólico; exponencial; o de distribución normal. Las funciones de pertenencia lineales son las que con mas frecuencia se emplean debido a su simplicidad y satisfactoria flexibilidad en la mayoría de las aplicaciones.

**Reglas de inferencia difusa.** Al desarrollar reglas de inferencia difusa, comprender el comportamiento del proceso es de vital importancia. Usar el conocimiento del proceso, las entradas y salidas de fuzzificación y aplicar el razonamiento **IF-THEN** ( SI-ENTONCES) conduce a las reglas de inferencia de control.

Finalmente al aplicar las operaciones de lógica difusa desarrolla la respuesta del controlador.

Considérese un ejemplo para desarrollar un controlador difuso para controlar el nivel en un tanque mediante una válvula de control de salida, midiendo el flujo de entrada y el nivel del tanque, como se muestra en la figura 12.

En este ejemplo, las funciones de pertenencia que describen el nivel del tanque, la entrada de flujo al tanque y la válvula de salida podrían ser definidas como se muestra en la figura 13.

Figura 12. Nivel de tanque controlado por un controlador difuso.

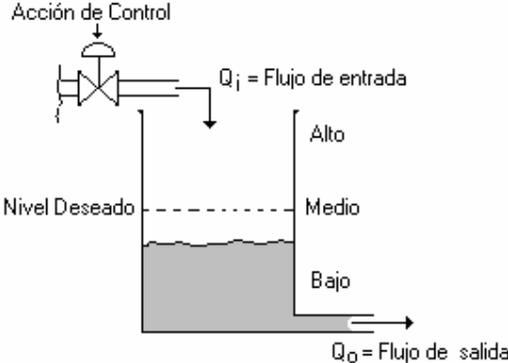


Figura 13. Funciones de pertenencia para el nivel de un tanque.

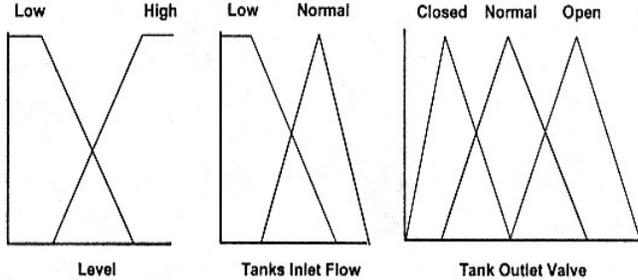
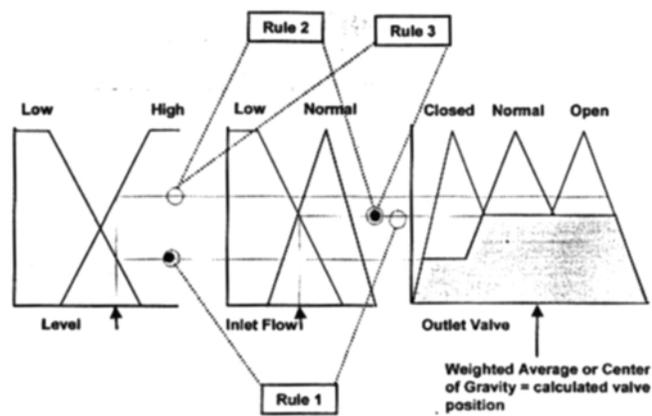


Tabla 2. Reglas de inferencia difusa para control del nivel de un tanque.

NUMERO	REGLA
REGLA 1.	Si el nivel es Bajo Y la entrada de flujo es Normal ENTONCES haga que la válvula de salida se cierre.
REGLA 2.	Si el nivel es Alto Y la entrada de flujo es Normal ENTONCES haga que la válvula de salida se abra.
REGLA 3.	Si el nivel es Alto Y la entrada de flujo es Baja ENTONCES haga que la válvula de salida este en posición Normal.

Después de aplicar el grado de pertenencia para tanto el nivel como para la entrada de flujo a las reglas difusas para la válvula de salida del tanque, como se muestra en la figura 14. los valores de salida se fuzzifican, esto es, los valores para las funciones de pertenencia Cerrado, Normal, Abierto. Flujo Normal en este ejemplo es un flujo que no es demasiado Bajo.

Figura 14. Operación de un controlador difuso



Como se puede notar de la figura 14, al aplicar la función Y a los valores de pertenencia de entrada, el valor de la función de pertenencia de salida es un mínimo de dos valores de pertenencia de entrada. El valor de la función de pertenencia Válvula Cerrada, por ejemplo, es igual al valor de la función de pertenencia Nivel Bajo, que es mas pequeño que el valor Flujo Normal. Esto se sigue de la regla de inferencia 1:  
 $M(\text{Válvula Cerrada}) = \min.(M(\text{Nivel Bajo}), M(\text{Flujo Normal})) = M(\text{Nivel Bajo}).$

**Defuzzificación.** La defuzzificación convierte los valores de lógica difusa en valores de salida de control real. El método mas común de defuzzificación es calcular el centro promediado de todas las funciones de pertenencia de salidas activadas.

Con referencia a la figura 14 el centro promediado de las funciones de pertenencia Cerrado, Normal, y Abierto determina la posición de la válvula de salida.

Aplicar el procedimiento para el desarrollo en tres pasos a un controlador difuso, hace posible construir un controlador significativamente mas complejo, incluyendo un controlador interactivo multivariable. El mas alto desempeño de control esperado, sin embargo, requerirá del ajuste de las funciones de pertenencia y entrada / salida. Existen herramientas de lógica difusa disponibles que simplifican el esfuerzo, tales como **Matlab**® herramienta de lógica difusa.

## 2. APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA INDUSTRIA

### 2.1 APLICACIONES EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

La complejidad creciente que han alcanzado los *Sistemas Eléctricos de Potencia*, debido al aumento de las interconexiones, al uso de nuevas tecnologías y a la necesidad de operar el sistema económicamente, ha llegado a crear herramientas que permitan operar el sistema con un grado elevado de seguridad y en condiciones muy cercanas a los límites de estabilidad.

La utilización de controles suplementarios en la excitatriz de los generadores ha sido un medio efectivo para extender los límites de estabilidad y mejorar la operación de Sistemas eléctricos de potencia.

En las últimas dos décadas se han desarrollado diversos métodos para sintonizar estabilizadores en el sistema eléctrico de potencia (ESP); basados tanto en diseños secuenciales como coordinados. El método favorecido por la industria consiste en la Sintonización Secuencial de compensadores de adelanto o atraso de fase<sup>1</sup>. Por el contrario, las técnicas conocidas de sintonización coordinada de estabilizadores para sistemas multimáquinas, evaluadas positivamente en numerosas investigaciones, han tenido un impacto práctico muy reducido.

---

<sup>1</sup> Chow y Sánchez – Gasca, 1989

Una importante razón para ello es la carencia de modelos suficientes precisos. La presencia de perturbaciones, el desconocimiento en los parámetros del sistema, las dinámicas no modeladas o no consideradas, la aleatoriedad de las condiciones de Operación, la variabilidad de la topología, etc., dificultan la utilización de técnicas que requieren de un conocimiento preciso del modelo del sistema.

Para dar solución a gran parte de estos inconvenientes, la Pontificia Universidad Católica de Chile ha propuesto el diseño de un estabilizador utilizando tanto *lógica difusa*, como las teorías de control óptimo en  $H^{\infty}$  y control proyectivo subóptimo.

Para cada condición de Operación en el sistema de potencia, y utilizando el correspondiente modelo linealizado, se diseña una ley de control local de referencia utilizando la solución en el espacio estado al problema de control robusto en  $H^{\infty}$ ; la sintonía de los parámetros de cada estabilizador convencional se realiza reteniendo parte de la auto estructura de referencia en cada unidad generadora, mediante la técnica de control proyectivo.

Las salidas de los diferentes estabilizadores locales se ponderan por grado de validez determinadas aplicando el concepto de función de pertenencia de un conjunto difuso. El objetivo de control es reducir la energía de las señales reguladas producto de perturbaciones exógenas e incrementar la estabilidad a perturbaciones pequeñas en un amplio rango de condiciones de operación. Los resultados obtenidos mediante simulación de un sistema de dos generadores conectados a una barra infinita

reflejan que el estabilizador propuesto incrementa la robustez de un estabilizador de estructura convencional.

## **2.2 LOGICA DIFUSA APLICADA PARA LA DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE DETERIORO EN LAS LINEAS ELECTRICAS**

El mantenimiento por diagnóstico de las redes de subtransmisión y distribución (niveles de voltaje desde 4 kv. hasta 33 kv.) necesita de la valoración objetiva del nivel de deterioro de las mismas, partiendo de la información cualitativa e imprecisa recogida mediante el celaje (Inspección visual de la línea).

Para ello la herramienta idónea es la *Lógica difusa* o borrosa (**Fuzzy logic**) con la ayuda de la cual se desarrolló el método de la determinación del índice del deterioro de la línea. Dicho método permite cualificar la información y determinar analíticamente la posibilidad de que la red o uno de sus elementos necesiten mantenimiento en un periodo de tiempo determinado, utiliza el esquema de Inferencia Monótona Directa con un cuerpo de doce reglas de implicación, correspondientes a los elementos básicos de la línea, definidas por la unión nacional eléctrica de Cuba.

## **2.3 APLICACIÓN DE LA LOGICA DIFUSA PARA LA MODELACION DEL DETERIORO EN TUBERIAS**

Muchos factores pueden contribuir a la falla estructural de tuberías metálicas, siendo la corrosión uno de los factores más importantes. El método conocido como 10-P **(10**

**point scoring**) es el más empleado generalmente para predecir el potencial de corrosividad del suelo, que se basa en las propiedades de los suelos. Para una muestra de suelo dado, cada una de las propiedades del suelo se evalúa para determinar en que grado contribuyen en la corrosividad del suelo. El método 10-P emplea lógica binaria para clasificar el suelo, tanto como corrosivo o no corrosivo.

El principal objetivo de esta aplicación es desarrollar un *Sistema* experto de *lógica difusa* capaz de establecer un criterio (tal como la rata de corrosión o la rata de roturas) para predecir el deterioro en las tuberías metálicas de las cañerías empleando las propiedades de los suelos. El sistema experto propuesto incluye un modelo difuso que consiste de una serie de reglas **IF-THEN** (SI-ENTONCES) para determinar el potencial de corrosividad (**CoP**) basado en las propiedades del suelo. El modelo difuso contiene la información o datos de las variables lingüísticas (**database**) caracterizando varias propiedades de los suelos, y una base de reglas que construye relaciones entre aquellas propiedades y el potencial de corrosividad. Por consiguiente, el sistema experto usa un modelo de regresión lineal para unir el potencial de corrosividad a la rata de deterioro de las tuberías metálicas.

## **2.4 LOGICA DIFUSA APLICADA AL CONTROL DE UN SERVO SISTEMA NEUMATICO**

En Barcelona, España, se emplea el conocimiento en lógica difusa para controlar un servo sistema neumático, (**Servo drive**), el cual consiste en una gran válvula de choque de 2 metros, activado por una válvula proporcional de flujo. El objetivo es lograr

un excelente control del activador a pesar de tener grandes cámaras, lo cual tiene una gran influencia en las respuestas del sistema, debido a la compresibilidad del aire. Para el estudio experimental, se ha construido un banco de prueba y se emplea un censor magneto y restrictivo de desplazamiento para cerrar el lazo. Antes de comenzar el control del sistema y saber como reacciona el Servo drive neumático se ha estudiado la interacción del actuador y el sistema de válvulas mediante la técnica **Bond Graph**.

Al comienzo, se aplico control PID en **Servo drives** neumáticos, después de ver sus muchos problemas, se empezó a aplicar un algoritmo de control de estado. El algoritmo de control de lazo de estado alcanza un buen resultado, sin embargo en casos en los que los parámetros de un sistema cambian se hace necesario reafirmar las ganancias variables de estado (posición, velocidad y aceleración), sobre todo en este caso particular es donde el razonamiento con Lógica Difusa se puede emplear.

## **2.5 LOGICA DIFUSA APLICADA EN DIBUJO INDUSTRIAL**

La Universidad Nacional de Colombia ha implementado un sistema de lógica difusa para determinar la geometría óptima de la herramienta de corte en operaciones de maquinado.

Para estimar de forma automática la geometría adecuada de la herramienta de corte en una operación de torneado; Se propone una metodología que utiliza *Sistema de lógica difusa (SLDs)*, cuyas entradas son la energía específica de destrucción de la

herramienta de corte, las salidas del sistema son los ángulos de desprendimiento ( $\gamma_n$ ), de incidencia ( $\alpha_n$ ) y de inclinación del filo principal ( $\lambda_s$ )

Existe muy poca información publicada acerca de geometría optimizada de herramientas de corte, los ensayos para determinar la geometría óptima son costosos y consumen mucho tiempo.

La selección de la geometría de la herramienta de corte es importante en el diseño de cualquier proceso de maquinado y es tarea compleja debido a la gran cantidad de consideraciones que influyen en ella, de ahí la importancia de esta metodología que permite contar con una geometría de referencia como base para escoger la herramienta con la forma mas adecuada en operaciones de torneado.

## **2.6 LOGICA DIFUSA APLICADA AL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES**

Para el control de procesos industriales se implementan controladores mediante algoritmos de lógica difusa, el bloque de ingeniería de la Universidad de Antioquia, Colombia, ha desarrollado un dispositivo que realiza las labores de control en procesos industriales, compitiendo con los controladores PID. El desarrollo se hizo a partir del micro controlador MC68HC912B32 de motorola, cuya CPU soporta instrucciones de lógica difusa. El algoritmo de control esta programado en el micro controlador, al igual que un conjunto de instrucciones de monitoreo y control a través de una conexión

serial. El dispositivo presenta una simplicidad en el manejo para evitar confusiones y problemas con operarios inexpertos.

## **2.7 LOGICA DIFUSA APLICADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

En la Universidad de los Andes, Colombia se ha empleado lógica difusa para el arranque de un reactor anaerobio piloto, esta contribución resalta la importancia de la lógica difusa en este tipo de reactores para el tratamiento de aguas residuales industriales como alternativa de control del pH. El reactor utilizado es un prototipo de laboratorio el cual se alimenta con agua residual con características similares a las aguas residuales resultantes del proceso de producción de bebidas gaseosas.

La variable a controlar es el pH. Para ello se maneja el caudal de entrada de agua contaminada al reactor. El sistema de control utilizado es un regulador basado en lógica difusa. Cuyas reglas fueron calibradas y definidas inicialmente usando un modelo matemático desarrollado en **SIMULINK**. El montaje final se hizo utilizando **LABVIEW**. Los resultados muestran el arranque satisfactorio del reactor de laboratorio utilizando la estrategia propuesta.

## **2.8 CONTROL DE VOLTAJE DE SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA**

En sistemas eléctricos de potencia, los voltajes fuera de sus límites operativos pueden ocasionar daños a equipos, y en ocasiones el desabasto temporal de energía a un

número considerable de usuarios del servicio. Para asegurar la calidad y la confiabilidad del sistema, los operadores de los Centros de Control de Energía deben mantener los voltajes de los nodos de carga dentro de los límites de operación permitidos. Los cambios de la carga y/o la topología del sistema pueden ocasionar variaciones no aceptables en los voltajes del sistema de potencia. El operador generalmente mejora esta situación de reacomodar los flujos de potencia reactiva mediante cambios en los voltajes de generación, ajustando los **taps** de los transformadores, y conectando o desconectando bancos de capacitores y/o reactores.

El desarrollo de la teoría de conjuntos difusos, y los logros obtenidos con su aplicación en diferentes áreas, empieza a traer la atención a los investigadores del área de potencia eléctrica. En esta sección se ilustra el método de lógica difusa para el control de voltaje en sistemas de potencia, utilizando solamente cambios de voltaje en los nodos de generación.

**2.8.1 Aplicación de la teoría de conjuntos difusos.** La solución de problemas utilizando la teoría de conjuntos difusos requiere de las siguientes etapas:

**Etapa 1.** *Descripción del problema original.* El problema a resolver debe describirse matemática y lingüísticamente.

**Etapa 2.** *Definición de umbrales de las variables.* Basado en el conocimiento empírico, para cada variable se puede determinar el valor que tiene el mayor grado de satisfacción, y con cierta desviación aceptable el grado de satisfacción decrece hasta

que es inaceptable. Los valores que corresponden al mayor y menor grado de satisfacción se les denomina *umbrales*.

**Etapa 3. Cuantificación difusa.** Con los umbrales determinados en la etapa 2, se deben construir formas apropiadas de las funciones de membresía.

Existen muchas formas de funciones de membresía: lineales, lineales separables, trapezoidales, parabólicas, etc. La forma de la función de membresía debe reflejar los cambios de grado de satisfacción del experto, con los cambios en las variables.

**Etapa 4. Selección de las operaciones difusas.** En términos del proceso de toma de decisiones de un experto, se debe seleccionar una operación difusa apropiada de tal forma que los resultados obtenidos sean semejantes a las decisiones tomadas por los expertos. La interpretación de los resultados al utilizar sistemas difusos se basa en el dominio del razonamiento del experto. Las operaciones difusas comúnmente utilizadas son las de Mamdani y Zadeh.

**Etapa 5. Dezzfusificación.** En esta etapa se aplica un proceso de Dezzfusificación para obtener una salida no difusa. Las operaciones de Dezzfusificación más utilizadas son el método de los centros y el método de los pesos promedio.

**2.8.2 Problemas de control de voltaje en estado estacionario en sistemas de potencia.** Descripción: cuando el voltaje de un nodo de carga viola los límites operativos, se deberá ejecutar acciones de control que mejoren esta condición anormal colocándola dentro de límites de operación del sistema.

El efecto del control de voltaje a través de cambios en el voltaje de nodos de generación se puede determinar mediante análisis de sensibilidad obtenidos en la solución de flujos de potencia. Considérese un sistema de N nodo, con L nodos de carga, N – L – 1 nodos de generación, siendo N el nodo compensador. Para el ajuste del elemento de control en el nodo j, el cambio de voltaje del nodo i es:

$$\Delta V_i = S_{ij} \Delta U_j, \quad i= 1,2,\dots, L; \quad j= 1,2,\dots, N - 1$$

Donde  $\Delta V_i$  es el cambio de voltaje del nodo i,  $S_{ij}$  es el coeficiente de sensibilidad del nodo j al nodo i, y  $\Delta U_j$  es el ajuste realizado por el elemento de control en el nodo j. Los ajustes en los elementos de control se restringen a un rango entre los valores máximos y mínimos del diseño.

$$\Delta U_j^{\min} \leq U_j \leq U_j^{\max}$$

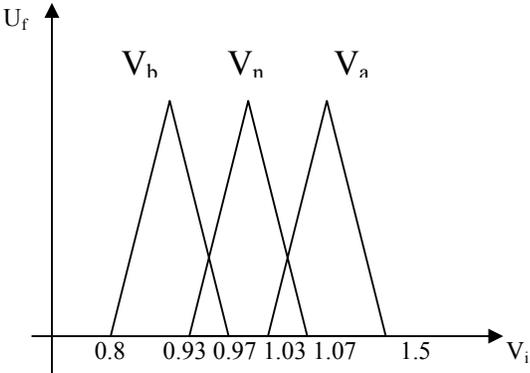
Donde  $\Delta U_j^{\min}$  y  $\Delta U_j^{\max}$  representa el ajuste mínimo y el máximo de voltaje o potencia reactiva del elemento de control en el nodo j. En esta investigación, los voltajes de los nodos se controlan dentro del rango [0.95 1.05] por unidad (p.u.) de los voltajes nominales (1 p.u.).

**2.8.3 Características de los sistemas de lógica difusa.** En los modelos convencionales de flujos de potencia, las restricciones son rígidas y en algunas ocasiones no es posible representarlas.

En consecuencia, se requiere un modelo mas razonable para este problema seleccionándose la teoría de conjuntos difusos para representar la función objetivo y restricciones del problema. Los umbrales de los voltajes de los nodos de generación, con sus correspondientes funciones de membresía se presentan a continuación.

**Umbral y funciones de membresía de los nodos de carga.** Las funciones de membresía de los nodos de carga se muestran en la Fig. 1. donde  $V_b$ ,  $V_n$  y  $V_a$  representan las variables lingüísticas voltaje bajo, voltaje nominal y voltaje alto respectivamente. El umbral de las variables  $V_b$ ,  $V_n$  y  $V_a$  son  $[0.8 \ 0.97]$  p.u.,  $[0.93 \ 1.07]$  p.u., y  $[1.03 \ 1.5]$  p.u. respectivamente.

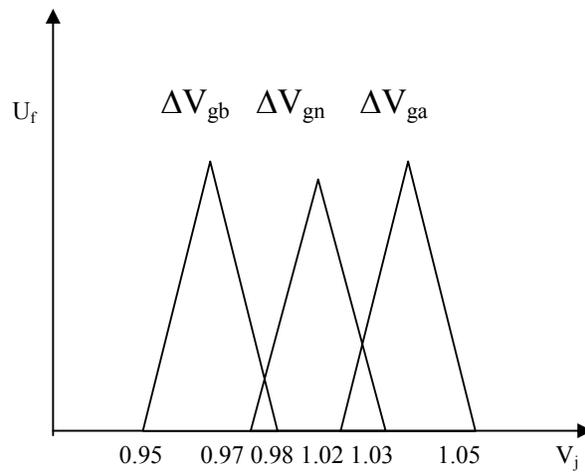
Figura 15. Funciones de membresía del voltaje de nodos de carga



**Umbral y funciones de membresía de los cambios de voltaje en los nodos de generación.** Las generaciones de membresía de los cambios en los voltajes de los nodos de generación se muestran en la fig. 2 donde  $V_{gb}$ ,  $V_{gn}$ ,  $V_{ga}$  representan las

variables lingüísticas de cambios bajos, normales y altos en los voltajes de generación respectivamente. Los umbrales de estas variables lingüísticas son [0.95 0.98] p.u., [0.97 1.03] p.u., y [1.02 1.05] p.u. respectivamente.

Figura 16. Funciones de membresía de los cambios de voltaje en nodos de generación.



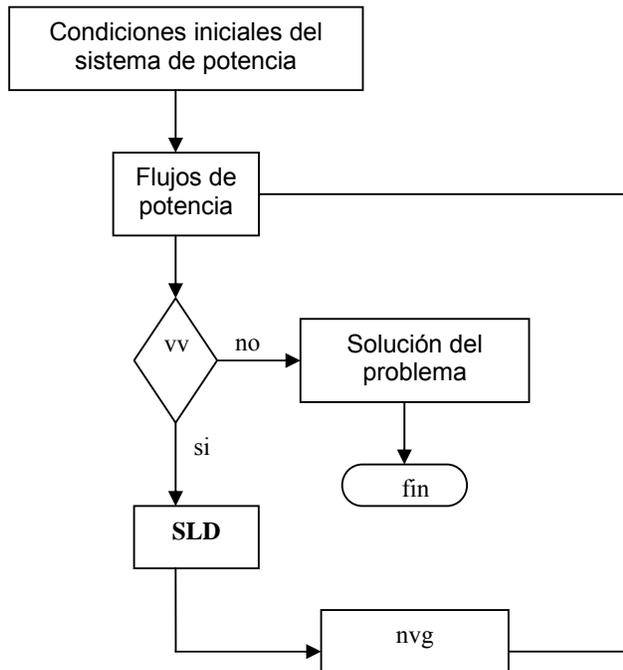
**2.8.4 Base de conocimiento.** La estrategia de control de lógica difusa propuesto (SFD) esta basada en un esquema sistema experto-conjunto difuso consistente en un grupo de reglas **IF-THEN**, que representan el conocimiento que el operador del sistema de potencia (experto) tiene respecto al control de voltaje del sistema de potencia bajo estudio. Una regla **IF -THEN** esta constituida por un par de estatutos que describen: el primero (**IF**), los estados de operación anormal del sistema, y los segundos (**THEN**) las acciones del control a realizar; por ejemplo: **IF** ( $V_i$  es un voltaje bajo en el nodo  $i$ ) **THEN** (se debe realizar un cambio  $V_{ga}$  en el nodo de generación  $j$ )

Se realiza una operación difusa para evaluar las reglas como resultado **(THEN)** una salida difusa en cada una de ellas, y la agregación de todas las salidas asociadas al mismo nodo de generación, se defuzzifican para obtener el valor no difuso del incremento o decremento (acción de control) de los voltajes de generación. Esta acción de control corregirá el voltaje anormal en el nodo de carga afectado.

En la figura 17. se muestra un diagrama esquemático del proceso de simulación. Dada la información del sistema de potencia (topología, líneas de transmisión, cargas y generación), se realiza un cálculo de flujos de potencia para determinar el estado de operación del sistema, y así identificar los nodos de carga con violación del voltaje (vv)

Con la detección de una violación del voltaje vv (fuera de los límites operativos) se inicia la operación del SLD. Los valores de los voltajes de los nodos de carga, obtenidos en la solución de flujos de potencia, se fuzzifican, utilizando las funciones de membresía de las variables lingüísticas  $V_b$ ,  $V_n$  y  $V_a$ . Esta información se emplea para evaluar las reglas de la base de conocimiento (el conocimiento de la operación del sistema de potencia) obteniéndose para cada regla una salida difusa del cambio en el voltaje de generación correspondiente a la regla.

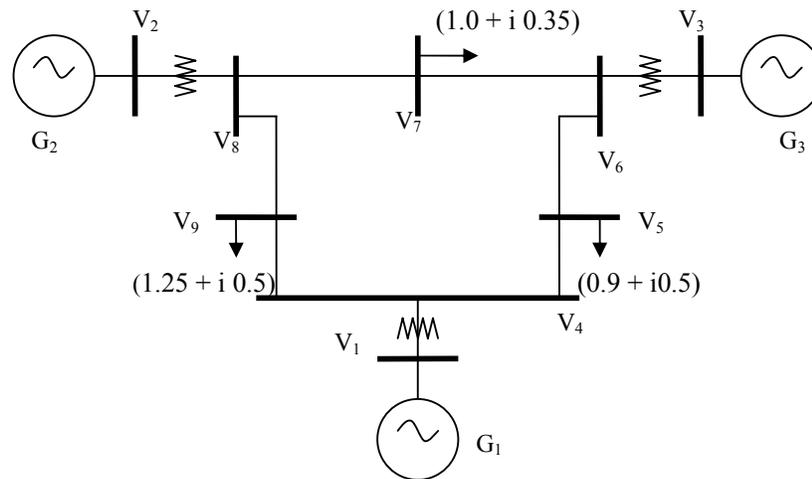
Figura 17. Proceso de Simulación.



La agregación (operación difusa) de las salidas que corresponden a un cambio de voltaje de un nodo de generación específico, da como respuesta un conjunto difuso. La Dezzfusificación de los resultados de las agregaciones de los cambios de voltaje de los nodos de generación, da como respuesta un incremento o decremento de los voltajes de generación correspondientes. Con los nuevos voltajes de generación (nvg) se procede a realizar nuevamente el estudio de flujos de potencia para obtener los cambios de voltaje en los nodos de carga. Si los problemas de carga continúan, se repite el proceso con los nuevos voltajes fuera de los límites operativos (vv): de lo contrario representan la solución al problema.

**Aplicaciones y resultados.** Para la aplicación de la lógica difusa en el control de voltaje se utiliza el sistema de potencia de 9 nodos de la figura 18.

Figura 18. Sistema de potencia de 9 nodos de la IEEE



Los nodos 1, 2, y 3 son nodos de generación, y el nodo 1 actúa como nodo compensador. Los nodos de carga son los nodos del 4 al 9. La tabla 3 y 4 muestran los datos del sistema.

Tabla 3. parámetros del sistema

Línea	Nodo	R	X	B	T
1	1-4	0.0000	0.0576	0.000	1.0
2	3-6	0.0000	0.0586	0.000	1.0
3	4-5	0.0170	0.0920	0.158	1.0
4	5-6	0.0390	0.1700	0.358	1.0
5	6-7	0.0119	0.1008	0.209	1.0
6	7-8	0.0085	0.0720	0.149	1.0
7	8-2	0.0000	0.0625	0.000	1.0
8	8-9	0.0320	0.1610	0.306	1.0
9	9-4	0.0100	0.0850	0.176	1.0

Tabla 4. Condiciones iniciales del sistema de potencia

Nodo	Nodo tipo	P Gen	Q Gen	P Car.	Q Car.	V	Ang
1	SLK	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0
2	P-V	1.0	1.63	0.00	0.00	1.0	0
3	P-V	1.0	0.85	0.00	0.00	1.0	0
4	P-Q			0.00	0.00	1.0	0
5	P-Q			0.90	0.30	1.0	0
6	P-Q			0.00	0.00	1.0	0
7	P-Q			1.00	0.35	1.0	0
8	P-Q			0.00	0.00	1.0	0
9	P-Q			1.25	0.50	1.0	0

Con el fin de demostrar esta metodología en la solución del problema de control del voltaje, se resulten los siguientes casos:

- Incremento de carga de 90% en el nodo 7
- Incremento de carga de un 45% en los nodos del 4 al 9
- Desconexión de la línea que conecta los nodos 6 y 7

En los tres casos el problema se resuelve por dos métodos: SLD y minimización de pérdidas de potencia activa (MPPA)

Los resultados de ambos métodos se dan en las tablas 3, 4, y 5 para los casos 1, 2 y 3 respectivamente. En estas tablas la segunda columna contiene los valores de los voltajes de la solución de flujos de potencia con las condiciones iniciales. En la tercera columna, los primeros 3 valores de voltajes representan el voltaje propuesto para los nodos de generación como solución del método de SLD, y el resto (voltajes del 4 al 9)

como solución de flujos de potencia manteniendo fijos los voltajes de generación propuestos.

En la cuarta columna se presenta la solución de cada caso mediante la minimización de pérdidas de potencia activa por la solución propuesta en ambos métodos.

En el caso 1, Tabla 5, columna 2, se muestra que el voltaje del nodo 7 es anormal (0.9474 abajo del limite inferior – dato en negrita). Ambos métodos resuelven el problema satisfactoriamente: 0.9797 por método SLD y 1.008 por MPPA. Las perdidas de potencia activa son muy cercanas, como se muestran en la tabla 8; sin embargo, el método MPPA coloca a los voltajes de generación en su limite superior.

Tabla 5. Soluciones del caso 1

Voltajes de nodos	Solución flujos potencia	SLD	MPPA
V1	1.0	1.0226	1.050
V2	1.0	1.0274	1.050
V3	1.0	1.0226	1.050
V4	0.9841	1.0101	1.041
V5	0.9696	0.9969	1.029
V6	0.9888	1.0144	1.045
V7	0.9474	0.9797	1.008
V8	0.9797	1.0081	1.036
V9	0.9536	0.9823	1.014

Tabla 6. Soluciones del caso 2

Voltajes de nodos	Solución flujos potencia	SLD	MPPA
V1	1.0	1.0348	1.050
V2	1.0	1.0227	1.050
V3	1.0	1.0355	1.050
V4	0.9661	1.0043	1.022
V5	0.9431	0.9834	1.00
V6	0.9891	1.0253	1.043
V7	0.9604	0.9944	1.016
V8	0.9798	1.0098	1.034
V9	0.9208	0.9596	0.979

En el caso 2, el incremento de carga en los nodos del 4 al 9, causa violación en los voltajes de los nodos 5 y 9.

Ambos métodos resuelven el problema satisfactoriamente, con pérdidas mínimas de potencia activa cercanas como se muestra en la Tabla 6. Como en el caso 1, el método MPPA eleva los voltajes de los nodos de generación al límite superior.

Tabla 7. Soluciones del caso 3

Voltajes de nodos	Solución flujos potencia	SLD	MPPA
V1	1.0	1.0226	1.050
V2	1.0	1.0319	1.050
V3	1.0	1.0226	1.042
V4	0.9816	1.0081	1.041
V5	0.9679	0.9952	1.031
V6	1.0046	1.0287	1.050
V7	0.9443	0.9791	1.005
V8	0.9777	1.0108	1.035
V9	0.9510	0.9817	1.014

Tabla 8. Perdidas de potencia activa

CASO	SLD	MPPA
1	0.0498	0.0401
2	0.0676	0.0605
3	0.0646	0.0302

Para el tercer caso, donde se desconecta la línea que une los nodos 6 y 7, se produce un voltaje anormal en el nodo 7 como lo muestra la Tabla 5 en la columna 2. En este caso ambos métodos resulten el problema de voltaje satisfactoriamente, pero en lo relativo a perdidas de potencia activa, el método MPPA (diseñado específicamente para este fin) ofrece mejor solución que el método SLD (diseñado para el control de voltaje).

### 3. APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN OTROS CAMPOS

#### 3.1 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA DOCENCIA

Resulta verdaderamente sorprendente el impacto que ha tenido la lógica difusa en el desarrollo de diversas disciplinas, se menciona a continuación algunos ejemplos: en el campo de la *docencia* existe hoy en día un sistema conocido como multiagente **MAS-PLANG (MultiAgent System-Plang)** desarrollado para transformar el entorno educativo virtual de las USD (“**Unitats de Suport** a la docencia”) en un sistema hipermedia adaptivo teniendo en cuenta estilos de aprendizaje.

Las técnicas de adaptación están dirigidas a la selección personalizada de los materiales didácticos, las herramientas de navegación y las estrategias de navegación del entorno educativo de acuerdo al estilo de aprendizaje del estudiante. Para el modelado del estudiante se utilizan técnicas de inteligencia artificial como el razonamiento basado en casos y la *lógica difusa*. El sistema esta en capacidad de categorizar estudiantes de acuerdo a su habilidad para procesar, percibir, recibir, organizar y entender la información. Se utilizan agentes inteligentes para examinar oportunidades de mejorar en la enseñanza y para motivar los estudiantes a aprender según sus preferencias en un entorno amigable y lo más cercano posible a su estilo de aprendizaje.

El **MAS-PLANG** se ha construido bajo el concepto central de un agente inteligente conocido como una entidad software que actúa en forma inteligente y semiautomática en representación y beneficio del estudiante.

### **3.2 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA AGRICULTURA**

En la Habana, Cuba se ha implementado la lógica difusa en la *agricultura* mediante un sistema capaz de reconocer la fase de cultivo en lote alimentado de la levadura **Saccharomyces Cereviceae**, a partir de la emulación del conocimiento de un operario. Para ello, se emplearon las variables de “consumo de sustrato” y “producción de biomasa” del cultivo.

Las pruebas de simulación numérica muestran el desempeño del identificador para caracterizar las diferentes fases, esto se comprobó utilizando una base de datos de mediciones obtenidas de fermentaciones realizadas en un biorreactor.

### **3.3 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA PARA LA PREVENCION DE DESASTRES NATURALES**

Desde la perspectiva de los *desastres naturales*; una concepción holística del riesgo, consistente y coherente, fundamentada en los planteamientos teóricos de la complejidad, que considera no solamente variables geológicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas, culturales o de otro tipo, que permita orientar de manera efectiva la toma de decisiones en un área geográfica puede

contribuir a mejorar la efectividad de la gestión urbana y facilitar la identificación de medidas factibles y eficientes de reducción del riesgo.

Estimaciones obtenidas mediante índices relativos, *variables difusas* (**Fuzzy**) y redes neuronales (**Neural Networks**). Son técnicas matemáticas que pueden facilitar la realización de los análisis de riesgo sísmico de ciudades o áreas desde una perspectiva holística, considerando como punto de partida los modelos convencionales de estimación de pérdidas o escenarios de daños.

Este tipo de enfoque integral y multidisciplinar podría tener en cuenta de manera mas consistente las relaciones no lineales de los parámetros del contexto, la complejidad y dinámica de los sistemas sociales y contribuir a la gestión efectiva del riesgo por parte de las autoridades y las comunidades, actores fundamentales para lograr una actitud preventiva.

### **3.4 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA INFORMATICA**

En *informática* El comportamiento normal y anormal de los computadores\_conectados en red es difícil de predecir, como las fronteras no pueden ser bien definidas. Este proceso de predicción por lo general genera falsas alarmas en muchos sistemas basados en la detección de intrusos.

Sin embargo con la *lógica difusa*, la rata en las alarmas falsas en la determinación de actividades de intrusión se pueden reducir, donde un conjunto de reglas difusas se

emplean para definir el comportamiento normal y anormal en una red de computadores, el conocimiento de la inferencia difusa se puede aplicar sobre tales reglas para determinar las intrusiones.

Para esta aplicación de la lógica difusa en informática se propone una técnica basada en algoritmos genéticos para generar las reglas difusas ( en lugar del diseño manual) que son capaces de detectar las anomalías y algunas intrusiones específicas.

### **3.5 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA ROBOTICA**

Al construir un *robot* autónomo móvil se pretende que sea capaz de desenvolverse en un entorno real, sin modificaciones que ayuden al desarrollo de la tarea a llevar a cabo. Esto conlleva el problema de que el conocimiento que se tiene del entorno es parcial.

Los sensores son sensibles a ruidos, el entorno suele ser cambiante y las tareas a llevar a cabo no están completamente especificadas.

La *lógica difusa* se ha convertido en una herramienta muy útil para el desarrollo de las técnicas de control ya que es capaz de tratar la incertidumbre existente en el entorno, la lógica difusa se aplica en forma natural a dos tipos de incertidumbre: imprecisión debida a la dificultad de caracterizar una medida en un valor concreto (conjunto crisp), y falta de evidencia, debido al conocimiento incompleto.

El número de aplicaciones de lógica difusa para control de agentes autónomos ha crecido significativamente debido a sus características. Entre ellas se pueden citar el tratamiento robusto de la información imprecisa, la facilidad que ofrece a la hora de interpolar las medidas de los sensores y la flexibilidad en la definición de reglas de control no lineales.

Un campo de potencial electrostático planificador de rutas se combina con un motor de inferencia difusa de dos capas e implementado para la navegación de un robot móvil en tiempo real en un medio dinámico de dos dimensiones.

La cartografía se graba primero en una red resistora. Se crea por consiguiente un campo potencial electrostático a través de una inyección de corriente en la red. El camino o ruta de corriente máxima a través de la red corresponde a aproximadamente al camino óptimo del medio.

La primera capa del motor de inferencia difusa genera las lecturas del sensor en una variable difusa, colisión, proporcionando información de posibles colisiones en cuatro direcciones, frente, detrás, izquierda y derecha.

La segunda capa garantiza la evitación de colisiones con obstáculos dinámicos mientras sigue la trayectoria generada por el campo potencial electrostático.

### 3.6 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN MEDICINA

El número de aplicaciones médicas que emplean técnicas de lógica difusa es menor que las desarrolladas mediante RNA, de todas formas el abanico sigue siendo muy amplio. Binaghi ilustra en su trabajo el uso de herramientas basadas en lógica difusa, incluyendo sistemas híbridos basados en redes neuronales y en el concepto de conjunto difuso, para diseñar sistemas expertos en el campo médico presenta el uso de estas herramientas en diferentes casos de diagnósticos, variando la complejidad de ellos, comentando su uso en la interpretación de imágenes médicas, como pueden ser las mamografías digitalizadas.

Al igual que en el caso de las redes neuronales, las patologías asociadas al corazón también han sido tratadas mediante lógica difusa. Por ejemplo Cios et al. Utilizan el concepto de conjunto difuso para diagnosticar la estenosis de la arteria coronaria. El resultado del proceso es la generación de 15 reglas, que aportan igual o mejores resultados que las 86 reglas que habían determinado los cardiólogos.

Otro campo de aplicación de la teoría de conjuntos difusos es el de la instrumentación, como el trabajo de Ying et al. Que representa un sistema de control para la dosificación de la medicación, en concreto la regulación de la infusión de **Sodium nitroprusside** a los pacientes postoperatorios en la unidad de cuidados intensivos de cirugía cardiaca a fin de controlar la presión media arterial.

También es posible encontrar su aplicación para evaluar el resultado obtenido por un determinado tratamiento, ya que una buena evaluación permite al médico mejorar el tratamiento a seguir. Para ello se utilizan varios algoritmos de comparación de los resultados después del tratamiento, con las condiciones previas antes de la aplicación del tratamiento. Goodman et al. Presentan un sistema híbrido, en concreto una red neural difusa **ARTMAP**, como una alternativa a los algoritmos de predicción en el análisis de bases de datos masivos. En el estudio del glaucoma nos encontramos con la utilización de conjuntos difusos tanto en el proceso de diagnóstico, como en el proceso de seguimiento de la patología.

En el hospital, San Felipe de San Nicolás, se emplea el conocimiento en lógica difusa para el control de una incubadora de cuidados intensivos, el fin de este proyecto fue diseñar el circuito electrónico de una incubadora de cuidados intensivos, que no solo realice un excelente control de temperatura y visualización de sus parámetros, sino que también brinde al personal médico y de mantenimiento, comodidad al usarla, y como fin principal, que cumpla con las normas de seguridad para el cuidado de un recién nacido. El circuito electrónico esta basado en la utilización de un microcontrolador PIC 16C73B. Como características posee control de temperatura utilizando lógica difusa, comunicación serie PC, medición de humedad, alarmas de motor detenido y sobre temperatura e interfaces con el usuario a través de un teclado matricial y un LCD.

**3.6.1 Incubadora de cuidados intensivos controlada con lógica difusa.** La función principal de la incubadora es controlar la temperatura del habitáculo y proveer medidas de seguridad que garanticen al personal médico que el equipo funcione correctamente.

Es por ello que en este proyecto se decidió realizar el control de temperatura mediante las técnicas de la Lógica Difusa que como se verá es muy confiable, así como también proveer diversas señales de alarma.

El núcleo del circuito es un PIC16C73 que como se detallará posteriormente está dotado de varias funciones que lo hacen muy versátil. Con él se puede fácilmente implementar la Lógica Difusa, convertir señales analógicas a digitales, dar tratamiento a señales mediante tres puertos de entrada salida y conectarlo con PC mediante una interfase RS 232.

La temperatura censada ingresa al PIC16C73 a través de su conversor Analógico Digital. Luego, el controlador, la compara con la deseada por el personal médico, quien interactúa con el sistema mediante un teclado matricial y un display inteligente. El sistema controla el ángulo de disparo de un triac que comanda a la resistencia calefactora de la incubadora. Una vez alcanzada la temperatura deseada, esta se mantendrá aún ante perturbaciones externas tan comunes, como por ejemplo la apertura de la puerta del habitáculo para atender al bebé.

Además toda la información que maneja el sistema puede ser monitoreado y registrado desde una PC, conectada al PIC por la interfase RS 232. El proyecto cuenta con un medidor de humedad dentro del habitáculo que facilita al médico el tratamiento del sistema respiratorio del neonato. Otra característica importante que ofrece el equipo: el monitoreo de la frecuencia cardíaca.

Es importante mencionar, que el sistema posee un ventilador que recircula el aire interior con el fin de lograr dos propósitos:

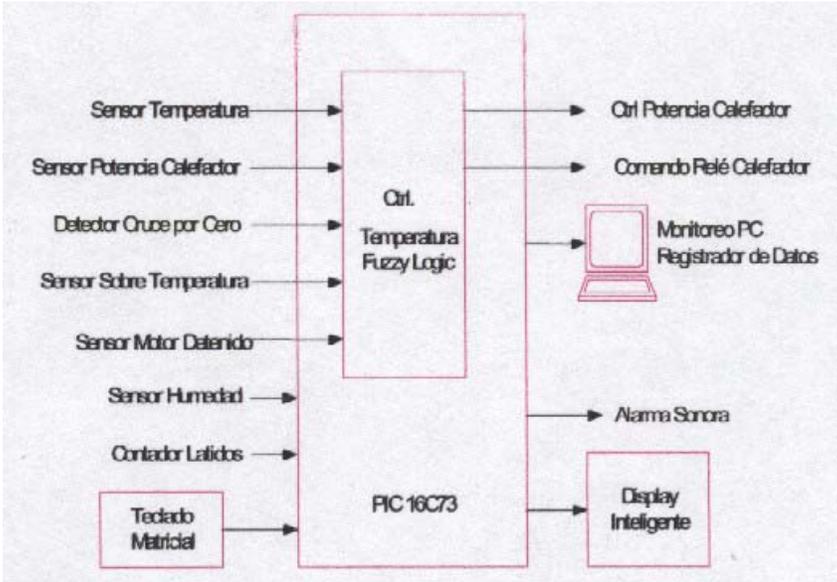
- Mantener la temperatura uniforme dentro del habitáculo
- Renovar el aire interior.

Estas funciones son muy necesarias, por lo cual es imperioso asegurar que el ventilador este funcionando correctamente, ya que de no hacerlo, la resistencia calefactora podría llegar a dañar al paciente por estar colocada debajo del mismo.

Debido a esto, el sistema cuenta con un sensor de motor detenido, que de estar activado, automáticamente dará una alarma y desconectará el relé de alimentación de la resistencia calefactora.

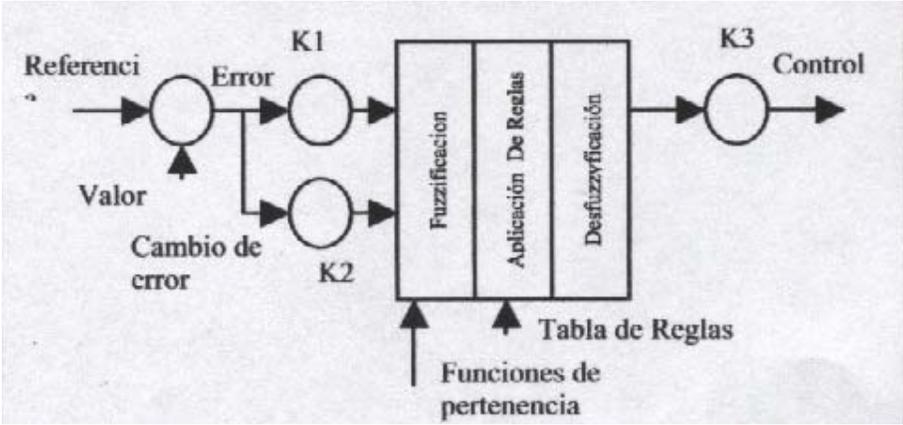
También se toman otras medidas de seguridad para garantizar que el sistema este bajo control, verificando el funcionamiento del **TRIAC**. Además, esta dotado de una alarma de sobre temperatura que se dispara si la temperatura supera los 39C. Para garantizar la máxima seguridad se utilizó un sensor adicional e independiente al sensor de control de temperatura.

Figura 19. Diagrama del circuito de la incubadora de cuidados intensivos.



**Controladores con Lógica Difusa.** Como se sabe, un PID se compone de una acción Proporcional-Derivativa-Integral. La primera establece la ganancia, la segunda, controla el transitorio y la última, el régimen permanente. En el controlador difuso se emplean dos de estos conceptos: el error y el cambio de error, conocido normalmente como el gradiente. Figura 20.

Figura 20. Esquema de un controlador de Lógica Difusa.



Estas variables pueden ser ponderadas por las ganancias **K1 K2** y así constituirse en las entradas propiamente dichas del controlador difuso.

Este controlador, tiene un primer bloque “*Fuzzificación*”, que transforma las variables de entrada, en sus respectivos valores difusos definidos por las etiquetas de los conjuntos difusos a los que pertenecen y sus correspondientes grados de pertenencia.

El próximo bloque “*Aplicación de reglas*”, selecciona de entre la base de reglas aquellas que son verdaderas para los valores difusos calculados en el bloque anterior. También calcula en qué grado influirá cada una de ellas, en la decisión tomada.

Por último el bloque “*Defuzzificación*”, devuelve una conclusión numérica, como consecuencia de aplicar a los conjuntos difusos de la variable de salida las conclusiones difusas con su respectivo grado de pertenencia, obtenidas en el bloque anterior. Por ejemplo, supóngase que las variables de entrada sean: la temperatura deseada y el error (diferencia entre la salida y la temperatura deseada) por lo tanto la salida será el valor del ciclo de trabajo D.

### **Descripción del circuito.**

**Interfase con el operador.** Una de las virtudes más importantes que posee esta incubadora, es su forma de comunicarse con el operador.

Para lograr esto se recurrió:

- A la utilización de un conjunto *Teclado-Display Inteligente* para ingresar y visualizar información, parámetros de seteo y rutinas de mantenimiento.
- A la comunicación con una PC para la visualización y registro de datos.

Para este punto se decidió no contar con la posibilidad del seteo de datos desde la PC por razones de seguridad. El software utilizado para la comunicación y el monitoreo de los parámetros de la incubadora fue LABVIEW DE **National Instrument**. Figura 21.

Figura 21. Pantalla de monitoreo de los parámetros de la incubadora realizada en LABVIEW.

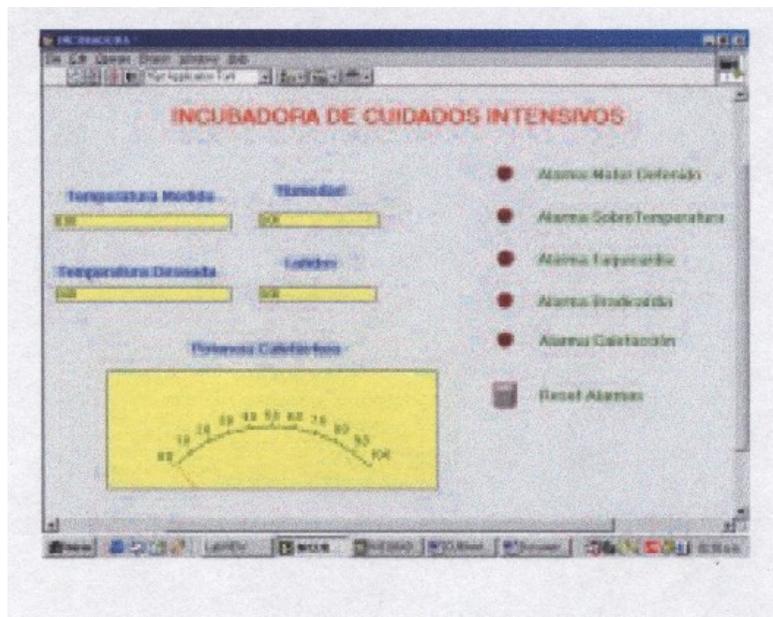
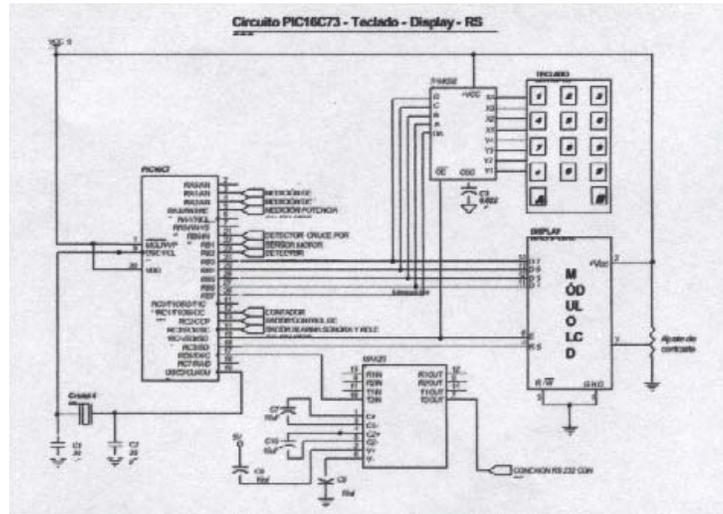


Figura 22. Circuito electrónico de la interfase de usuario.



**Medición de temperatura.** La medición de temperatura se realiza utilizando un termistor como sensor primario y conjunto con el conversor A/D del PIC.

El termistor tiene una variación lineal, de  $-20 \Omega / ^\circ\text{C}$  dentro del rango utilizado. Para obtener una tensión que varíe con la temperatura y que esté acorde con la resolución del A/D, se implementó una fuente de corriente de 1 mA con el circuito integrado LM334. Se puede notar que cuando aumenta la temperatura, la tensión baja. Para solucionar esto, y para mejorar las características del circuito, se utilizó un amplificador de instrumentación cuya función de transferencia es:

$$V_o = V_{\text{sense}} - K V_{CC}$$

**Censor de sobre-temperatura.** Este módulo, es uno de los componentes de seguridad con el que cuenta el equipo. Dotado de un termistor independiente informara al PIC si la temperatura es superior o no a  $39^\circ\text{C}$ . De ser superior, el PIC dará alarma de “sobre-temperatura”. Este umbral de temperatura, se fija en  $39^\circ\text{C}$  ya que ha

sido científicamente demostrado, que las temperaturas superiores a esta quedan excluidas de las zonas de termorregulación, producen un calentamiento inevitable para el paciente aumentando su temperatura corporal con un alto riesgo de provocarle la muerte por calor, fenómeno conocido por Efecto **Van t Hoff**.

**Censor de humedad.** Según lo manifestaba el personal médico del Hospital de San Nicolás esta medición es muy importante, porque la humedad del aire es uno de los factores que deben considerarse para lograr el “Ambiente Térmico Neutral”. Además, un ambiente muy seco, perjudica las vías respiratorias del paciente. El censor seleccionado, es un censor de humedad resistivo llamado NH 101. Los sensores resistivos, se basan en la propiedad que presentan ciertos materiales aislantes de cambiar su resistividad, de acuerdo a su contenido de humedad. Si se mide la variación de resistencia se tiene un higrómetro resistivo o humistor.

**Censor de potencia calefactor.** Este censor, es el encargado de dar la información de la magnitud de corriente que circula por la resistencia calefactora. Esta constituido por una bobina con núcleo de ferrita, la cual induce sobre el arrollamiento una tensión proporcional a la corriente.

Esta tensión, se rectifica para obtener una tensión continua proporcional. Luego esta tensión ingresa al PIC, previo paso por un amplificador operacional que la acondiciona, para conformar la alarma Calefactor, tendiente a detectar el mal funcionamiento del triac, es decir, si el sistema detecta que aún enviándole potencia a la resistencia calefactora, el censor de potencia de ésta, indica cero, entonces, dará alarma de

“Calefactor”. De la misma manera, si detecta que al no enviarle potencia el indicador de ésta, está en alto, también dará alarma y desactivará el relé desconectando el equipo.

**Censor motor detenido.** Este sensor detecta la presión del aire impulsado por el ventilador. Es dicotómico e ingresa al PIC quien ante una activación dará la alarma de “Motor Detenido” y accionará la desconexión del relé de alimentación de la resistencia calefactora.

**Contador de pulsos cardiacos.** Este sistema contará los impulsos del paciente provenientes de un “Monitor Cardíaco”. Si bien en el mismo monitor se puede visualizar perfectamente los pulsos del paciente, el valor agregado de este componente del proyecto, es sin duda poder enviar y registrar esta información.

**Control de temperatura.** El control de temperatura tendrá como objetivo calentar el habitáculo de la incubadora desde la temperatura ambiente hasta la deseada por el personal médico y luego mantenerla en ese valor aún ante perturbaciones externas. Es decir, deberá actuar sobre la resistencia calefactora, la cual proporcionará el calor necesario.

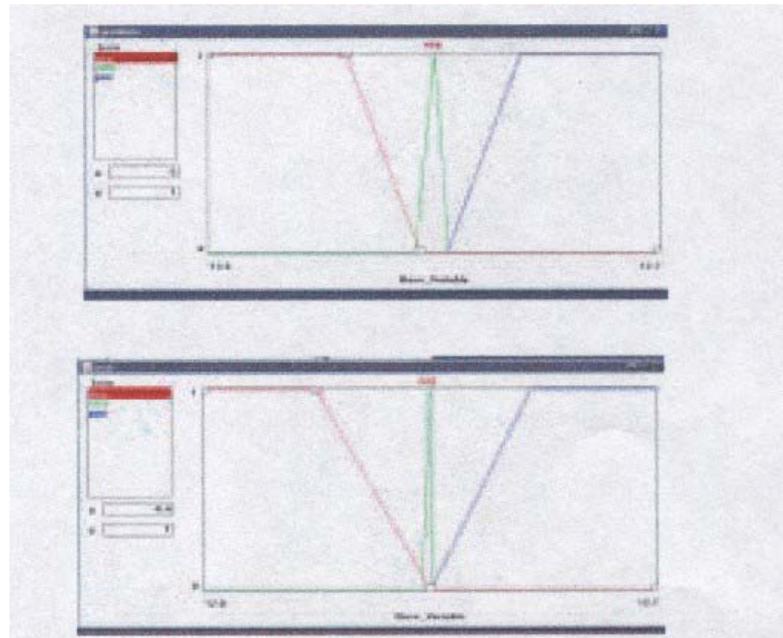
La entrada a este sistema de control, será el error de temperatura y el gradiente, obtenidos desde el sensor colocado en el habitáculo, y la salida controlará el ángulo de disparo del triac que comanda a la resistencia calefactora modificando su potencia. Se calcula la diferencia entre la temperatura media y la temperatura deseada. De esta manera se conoce el Error, el cual se denomina dentro del programa como  $Iv0$  -



diseñada la lógica de control, solo se debe compilar el programa y luego hacer referencias a éste desde el software principal del proyecto.

**Fuzzificación.** La primera instancia fue definir las variables lingüísticas error y gradiente. Estas variables poseen valores determinísticos. La verbalización de la variable error gradiente será: Negativo, Cero y Positivo.

Figura 24. División de los conjuntos difusos para las variables error y gradiente realizadas en el software **FUZZY TECH**



**Base de conocimiento.** Se deben incluir en este punto los datos e informaciones suministradas al Controlador, tales que posibiliten el procesamiento matemático de las variables, medidas en el proceso, a fin de generar las acciones del control.

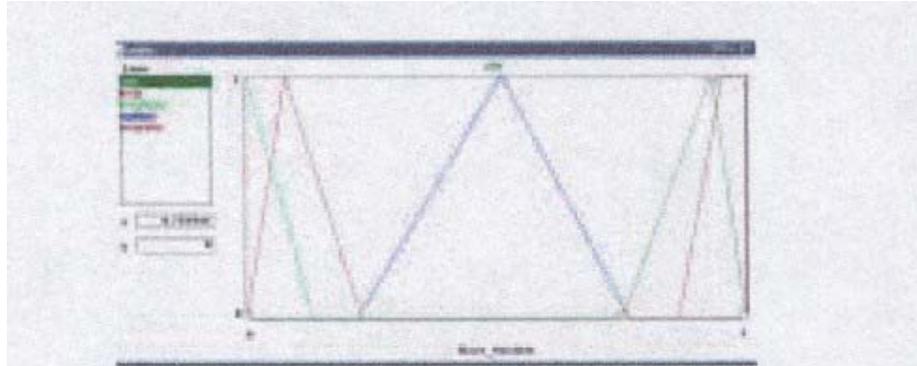
El número máximo de reglas viene dado por el producto de números de particiones de todas las variables de entrada al Controlador; que en nuestro caso serian: número de reglas Partición de la variable "Error". Partición de la variable "Gradiente  $3.3=9$ . Nuestro conjunto de reglas seria: Figura 25.

Figura 25. Reglas programadas en el **FUZZY TECH EXPLORER**.

Regla	Error	Gradiente	Fuzy	Salida
1	neg	neg	1.00	muyalta
2	neg	zero	1.00	alta
3	neg	pos	1.00	alta
4	zero	neg	1.00	optima
5	zero	zero	1.00	optima
6	zero	pos	1.00	optima
7	pos	neg	1.00	baja
8	pos	zero	1.00	muybaja
9	pos	pos	1.00	muybaja
10				

**Defuzzificación:** La verbalización de la variable de salida será: Muy Alta, Alta, Optima, Baja y Muy Baja. Figura 26.

Figura 26. Representación de los conjuntos difusos para la variable de salida que comandará el ángulo de disparo del TRIAC.

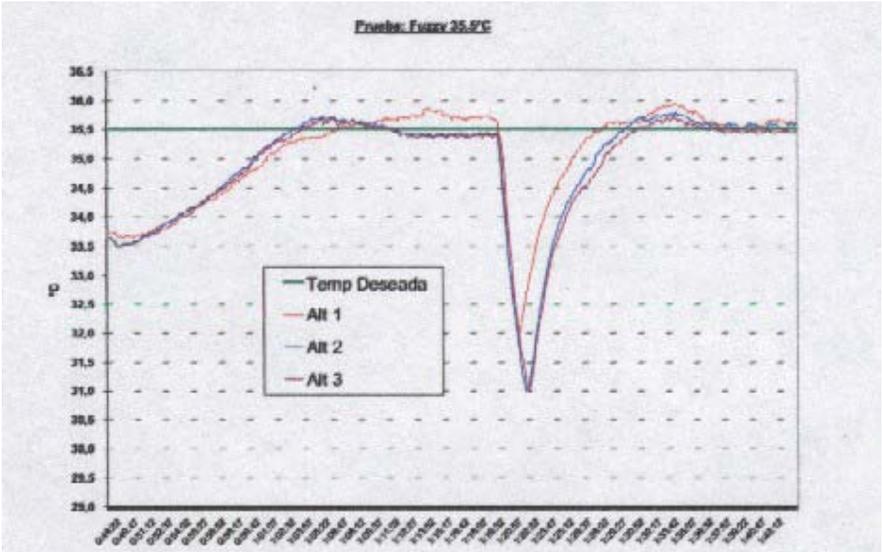


**Resultados.** Se comprueba el control de temperatura, mediante diferentes alternativas de diseño de Lógica Difusa, registrando en una base de datos, la evolución de la temperatura medida en la incubadora,. Para ello, se repite un itinerario de eventos que a continuación se detallan:

- Llevar la temperatura de 29,0 a 33,5°C
- Llevar la temperatura de 33,5 a 35,5°C
- Abrir la puerta del habitáculo durante 2 minutos
- Una vez recuperados los 35°C, llevar la temperatura de 35,5 a 38,0°C

Las alternativas ensayadas, variaban en el diseño de la lógica difusa. Y la más conveniente, es la que se detalló a manera de ejemplo en la figura 5,6 y 7. Dando como respuesta la siguiente gráfica.

Figura 27. Evolución de la temperatura en el tiempo ante una perturbación.



#### **4. APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LOELECTRODOMÉSTICOS**

La lógica difusa manipula los conceptos vagos tales como "caliente" o "todavía sucio" y de esta forma ayuda a ingenieros a construir sistemas de aire acondicionado, lavadoras y otros dispositivos que juzgan cómo deben funcionar o cambiar de acción o proceso rápidamente a partir de la una serie de reglas o criterios cuando estos criterios son difíciles de definir al momento de realizar estos cambios.

Un televisor ajusta automáticamente el volumen debido a que el ruido del ambiente en el cuarto aumenta o disminuye y lo altera, también ajusta el brillo ya que la intensidad de la luz en el cuarto cambia.

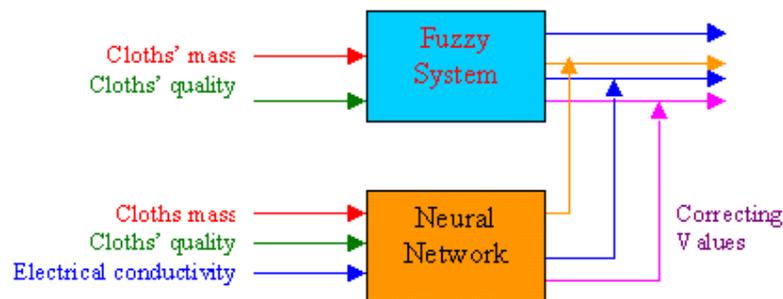
En las Cámaras de vídeo los usos de la lógica difusa incluyen enfoque automático, exposición automática, el equilibrio automático del blanco y la estabilización de la imagen. La técnica automática utiliza la medida aproximada de agudeza de reglas difusas para controlar la velocidad del motor y mejorar la calidad de la imagen de lo que se enfoca. Éstas son algunas de las aplicaciones que se han implementado en los electrodomésticos mediante el uso de la lógica difusa.

En 1965, Lofti A. Zadeh, informático de la universidad de California, propuso una manera matemática de mirar la imprecisión con la cual una computadora podría ocuparse. Él llamó al nuevo enfoque lógica difusa. Aunque la lógica difusa fue

inventada en los EE.UU., el crecimiento rápido de esta tecnología se ha dado en Japón, que cuenta con más de 3000 productos.

En los aparatos electrodomésticos La lógica difusa encuentra su uso en una amplia gama de aplicaciones eléctricas caseras tales como refrigeradores, aspiradoras, lavadoras y acondicionadores de aire. El aspirador de Matsushita detecta qué tipo de superficie del piso está limpiando, si alfombra o superficie lisa. Junto con un sensor de calidad del polvo, la energía de succión del sistema varía por consiguiente, de tal modo que permite el ahorro de energía.

Figura 28. Diagrama esquemático de una lavadora Neuro Fuzzy.

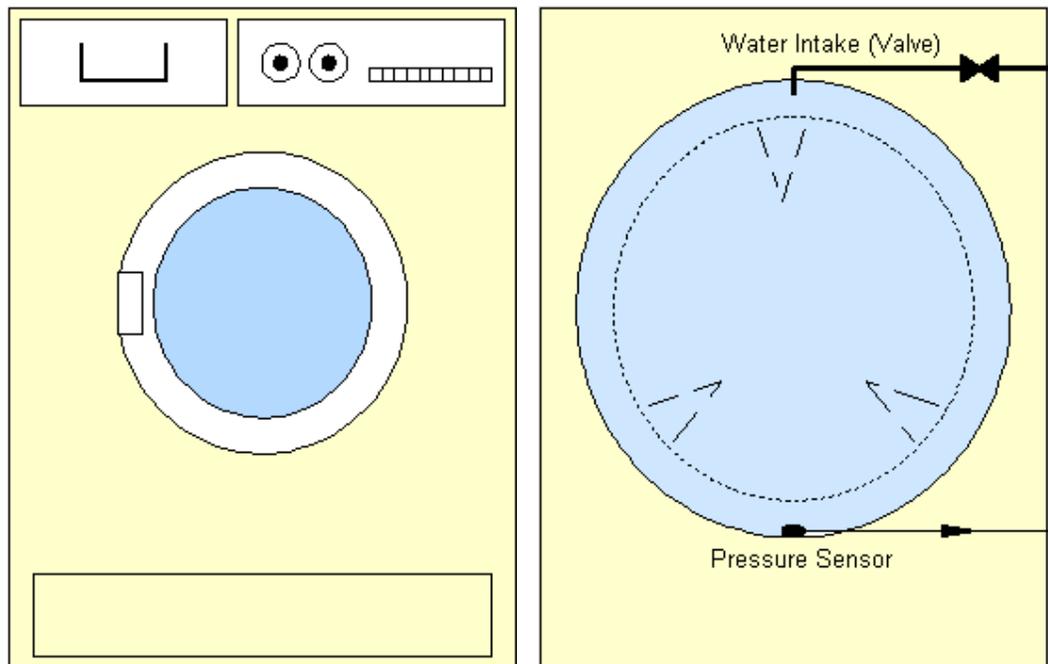


#### 4.1 ANÁLISIS NEURO FUZZY EN LAS LAVADORAS

En algunos usos, el conocimiento sobre la solución del sistema se contiene en datos de la muestra. En estos casos, Neuro Fuzzy es el método de opción. El estudio de caso siguiente es un buen ejemplo para demostrar el potencial de las tecnologías Neuro Fuzzy. El fabricante alemán AEG del aparato electrodoméstico utilizó un módulo difuso Neuro Fuzzy para diseñar una lavadora favorable al medio ambiente.

El sistema Neuro Fuzzy analiza la señal de un sensor existente para estimar el volumen y el tipo de lavado. Esta información se utiliza para optimizar el programa de lavado. En un hogar promedio, esta tecnología ahorra un cerca de 20% en agua y energía.

Figura 29. Vista exterior y de corte de la lavadora difusa.



**4.1.1 Lavadoras europeas.** Las lavadoras en Europa son diferentes a las que se usan en los EE.UU. y en Japón. El proceso de lavado es mucho más complicado y toma cerca de 2 horas. Por otra parte, el consumo de agua es mucho más bajo. Un consumo típico de agua puede variar de 50 a 60 litros (13 - 18 galones). El lavado blanco, tal como ropa interior, artículos de mesa, y sábanas de cama, se lava a temperaturas de hasta 95°C (203°F). Por lo tanto, las lavadoras no utilizan agua caliente de la casa sino que la calientan eléctricamente.

El proceso de lavado complejo consiste en lavado múltiple, el blanqueo, la aclaración y pasos de giro. Para controlar esto, las lavadoras de hoy utilizan el hardware del microcontrolador y los sensores múltiples:

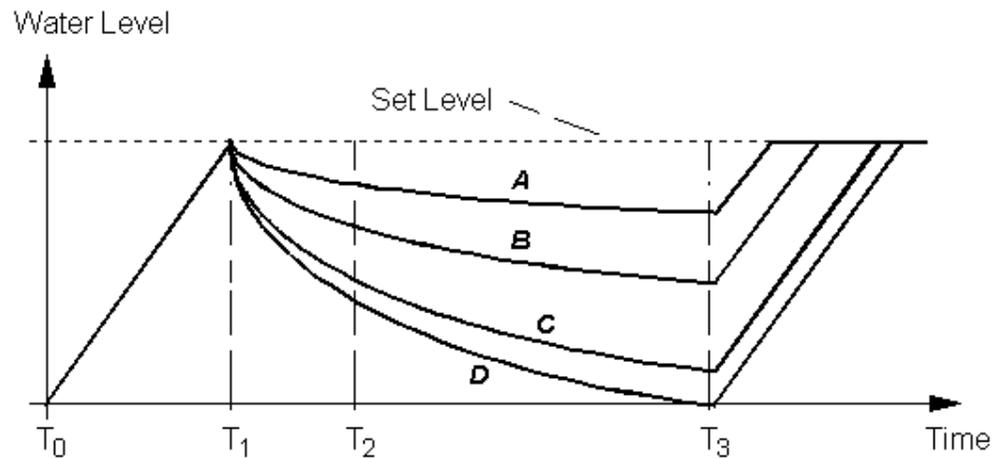
- Tacómetro para la vuelta del tambor.
- Sensor análogo de presión para el nivel del agua.
- Sensor Digital para detectar fuerte desigualdad durante el girado.
- Sensor Digital para detectar espuma excesiva.

Para determinar el programa de lavado óptimo, la carga real de lavado (tipo y volumen) de la lavadora se debe conocer. Los sensores que podrían medir estos parámetros directamente son costosos y no fiables. Por lo tanto, el objetivo para AEG era diseñar un sistema que estime la carga real de lavado solamente con los sensores existentes.

**4.1.2 Curvas de absorción de Agua.** La figura 30. traza la curva del sensor de presión en un cierto plazo. El diagrama comienza cuando la válvula de toma de agua se abre primero. La válvula de toma de agua se abre en  $T_0$ . En  $T_1$ , el nivel del agua alcanzó un valor determinado. Esta duración no depende mucho de la carga de lavado puesto que el lavado en el tambor no-rotario no absorbe mucha agua. En  $T_1$ , el tambor comienza a rotar a cierto ritmo, haciendo que en el lavado se absorba agua. Puesto que el peso del lavado es llevado a cabo por el tambor, la presión del agua medida por el sensor decrece. Un tiempo después  $T_2$ , la nueva presión se almacena y la diferencia a la presión en  $T_1$  da una indicación de la velocidad de absorción. En  $T_2$ , la presión actual del agua se almacena otra vez. Da una indicación del volumen de absorción,

pues el lavado se satura sobre todo en este tiempo. En  $T_2$ , la válvula del agua se abre otra vez para subir el nivel del agua al punto de ajuste.

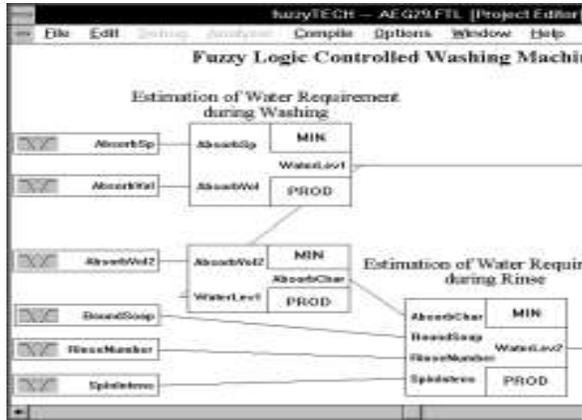
Figura 30. Nivel del agua en el tambor de la lavadora durante el lavado inicial.



Mientras que no haya ningún modelo matemático en la relación de la curva de absorción de agua a la carga del lavado, AEG decidió utilizar lógica difusa para diseñar una solución basada en el conocimiento de sus expertos en lavado.

La figura 31. muestra la estructura del sistema de lógica difusa que estima el requerimiento de agua en pasos de lavado y enjuague. Las variables de entrada del sistema de lógica difusa provienen de la curva de absorción de agua.

Figura 31. Estructura del sistema de lógica difusa para el cálculo del requerimiento de agua en los procesos de lavado y enjuague.



El bloque superior estima el requerimiento de agua durante lavado (**Waterlev1**) de la velocidad de absorción (**AbsorbSp**) y del volumen de absorción (**AbsorbVol**). Ambas variables de entrada se calculan de  $T1 - T0$  y  $T2 - T1$ . Los dos bloques más bajos estiman el requerimiento de agua durante el enjuague (**Waterlev2**). Las entradas al bloque intermedio son requerimiento de agua durante el lavado, según lo determinado por el bloque superior y volumen total de la absorción. Éstos se combinan para describir la característica total de la absorción (**AbsorbChar**). Esta variable no es una salida del sistema de lógica difusa, pero se emplea solamente como una entrada para el bloque más bajo. El bloque más bajo estima el requerimiento de agua durante el paso de enjuague. (**Waterlev2**). Otras entradas son la ración de jabón limitado, el número de pasos para el enjuague dados por el programa de lavado seleccionado, y la intensidad seleccionada para el paso de giro. Todas las funciones de membresía son de tipo Standard (Z, la lambda, S) y la **Defuzzificación** emplea el método del **Center-of-Maximun**.

**4.1.3 Lógica difusa contra Neuro Fuzzy.** El enfoque de interpretar la curva de absorción del agua para estimar la carga de lavado es innovador, y por lo tanto, no existe mucha ingeniería de "conocimientos técnicos" en la interpretación de las curvas. Pues dirigir "conocimientos técnicos" en el uso es esencial para la construcción de una solución con lógica difusa, el primer intento de AEG para encontrar un sistema que satisfaga las reglas de lógica difusa falló.

Por otra parte, AEG registró ya las curvas de absorción de agua para varias cargas conocidas de lavado. El requerimiento óptimo de agua para estas cargas de lavado se puede determinar fácilmente por los expertos en lavado. Usando estos resultados experimentales como ejemplos de entrenamiento, el intento siguiente de AEG era utilizar las técnicas Neuro Fuzzy.

La tabla 9. muestra algunos de estos ejemplos de entrenamiento. La columna de la izquierda (carga del lavado) enumera los materiales usados para este experimento de lavado, las dos columnas siguientes (velocidad de absorción de agua y volumen) dan los parámetros de la curva de absorción de agua. AEG mostró a los expertos en lavado las primeras columnas la carga real conocida y les pidió que recomendaran el requerimiento óptimo de agua para esta carga.

El entrenamiento Neuro Fuzzy utilizó la columna derecha como la salida deseada y las dos columnas medias como las entradas respectivas. El entrenamiento no puede utilizar la columna izquierda pues no se conoce la carga real en la lavadora durante la operación. El objetivo de este entrenamiento es que después de entrenar, el sistema de

lógica difusa, que el módulo Neuro Fuzzy entrena, responda a la recomendación apropiada de nivel del agua determinada con los valores reales de las variables de entrada.

Tabla 9. Ejemplos de entrenamiento para diferentes cargas de lavado.

CARGA LAVADO	VELOCIDAD ABSORCIÓN DE AGUA	VOLUMEN ABSORCIÓN DE AGUA	REQUERIMIENTO DE AGUA EN LOS PASOS DE LAVADO SUBSECUENTES (DE EXPERTO)
4 Kgs. LANA/1 Kg. ALGODON	0.67	2.44	3.5
3 Kgs. LANA/1 Kg. ALGODÓN	0.61	2.10	3.1
2 Kgs. ALGODÓN/2 Kg. LANA	0.62	1.99	2.8

Los datos del ejemplo para el entrenamiento **Neuro Fuzzy** se han obtenido con experimentos de lavado extensos. En cada experimento, diversos tipos y volúmenes de lavado fueron utilizados. Para cada experimento, el experto en lavado dió su recomendación para la cantidad de agua a ser utilizada en pasos de lavado subsecuentes.

El proceso de aprendizaje Neuro Fuzzy creó 159 reglas en el sistema de lógica difusa. La solución podía estimar el requerimiento de agua con una diferencia máxima con respecto al valor óptimo de 0.35 litros (0.09 galón). En un hogar promedio, esto ahorra cerca del 20% del consumo de agua. Como la mayor parte de la electricidad consumida por la lavadora se utiliza para calentar el agua, el 20% de energía

también se ahorra. El sistema de lógica difusa generado por el proceso de aprendizaje Neuro Fuzzy, fue aplicado en un microcontrolador estándar de 8 bits.

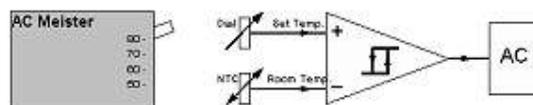
## 4.2 TERMOSTATOS PARA EL CONTROL DE AIRES ACONDICIONADOS

En los sistemas de aire acondicionado caseros, el realce del termostato mediante técnicas de control de lógica difusa permite una mejor adaptación a los requerimientos del usuario. Esto da lugar a un nivel más alto de comodidad y ahorro de energía.

En un sistema de control de calefacción central, un sensor de temperatura al aire libre y su instalación fueron sustituidos. Las comparaciones demuestran que la solución por lógica difusa se adapta mejor a los períodos altos y bajos de la demanda de calor, así proporcionando ahorros más significativos en comodidad y energía al mismo tiempo.

Cada sistema de CA tiene un termostato que mide la temperatura ambiente y la compara con la temperatura del sistema que se fija en un dial. La figura 32. demuestra el principio de tal termostato.

Figura 32. Esquema para un termostato convencional.



El termostato compara la temperatura del sistema que es seleccionada en el dial por el usuario con la temperatura ambiente real. Para reducir al mínimo el número de

encendidos para la CA, Se utiliza una histéresis. Los termostatos mecánicos y electrónicos se utilizan para esto. La figura 32. muestra el principio de un regulador electrónico de CA análogo.

**4.2.1 Termostato Inteligente con Lógica difusa.** Este método trabaja bien para mantener cierto nivel de temperatura en un cuarto. Sin embargo, la temperatura ambiente real no corresponde siempre a la sensación subjetiva de la temperatura de la gente en el cuarto. Cierta nivel de comodidad se alcanza con diversas temperaturas ambiente, dependiendo de un número de condiciones:

- Durante el día, la temperatura puede ser más alta que durante la noche.
- La misma temperatura ambiente se percibe mas cálida si el sol brilla.

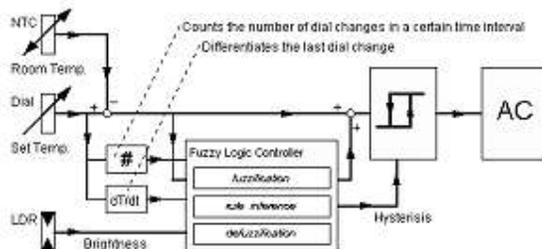
El análisis empírico de cómo la gente ajusta el dial de temperatura en sus sistemas de CA ha mostrado aún más factores:

- Alguien que reduce la temperatura del sistema desea un mayor efecto de enfriamiento, debido a esto, la mayoría de la gente tiende a poner el dial de temperatura más bajo de lo necesario. Generalmente, la gente se olvida de aumentar el dial de temperatura nuevamente. Antes de que se corrija esto, el enfriamiento conlleva a un gran desperdicio de energía.
- Alguien que reduce solo un poco la CA no está interesado en una respuesta rápida sino en una temperatura precisa. El reaccionar demasiado rápido a esto puede conllevar a llegar más allá de la temperatura ambiente.

- Si alguien cambia la temperatura ambiente muy a menudo, el control debe ser sensible.
- Si la temperatura ambiente varía fuertemente y el cuarto se utiliza a menudo, entonces, el control debe ser sensible.

El objetivo en este estudio de caso es diseñar un termostato "inteligente" que "entienda" diversas condiciones de ambiente y las necesidades actuales del usuario. Puesto que esta clase de conocimiento es difícil de modelar matemáticamente, y además resulta también complicado elaborar un algoritmo convencional, la lógica difusa se emplea para dar solución a este problema.

Figura 33. Termostato difuso.



La figura 33. muestra la estructura del termostato "inteligente". Para medir el brillo en el cuarto se agrega un foto censored LDR. El sistema de lógica difusa corrige la señal antes de la unidad del umbral y fija su histéresis. Para esto, el sistema de lógica difusa utiliza cuatro variables de entrada.

**Diferencia entre el sistema y la temperatura ambiente (Temp\_Error).**

Cuando la diferencia entre la temperatura del sistema y la temperatura ambiente es muy grande, el sistema de lógica difusa aumenta la señal de tal forma que la temperatura deseada se alcance más rápido. Al mismo tiempo, la histéresis se fija a un valor mayor, para que las perturbaciones de menor importancia no causen interrupciones innecesarias.

**Diferencia de temperatura con el cambio del tiempo (dTemp\_by\_dt).** La señal de temperatura del sistema se distingue con una constante de tiempo de 30 minutos. El sistema de lógica difusa utiliza esta señal para entender cuando el usuario quiere que la CA reduzca rápidamente el enfriamiento de un cuarto. También la histéresis se fija a un valor mayor, de tal forma que las perturbaciones no interrumpan el proceso de enfriamiento. Como esta señal es una señal diferencial, desaparece cuando el usuario no modifica el dial.

**Número de los cambios de temperatura del sistema (cambios).** Se utiliza esta señal de entrada para identificar a un usuario que intenta fijar la temperatura ambiente a un valor muy preciso. Para satisfacer a tal usuario, la histéresis se fija a un valor pequeño. Esta variable cuenta cada vez que el usuario mueve el dial. Cada 6 horas, esta variable se varía hasta que se alcanza 0.

**Brillo en el cuarto (brillo).** Si la luz directa del sol golpea el cuarto, la temperatura del sistema se reduce automáticamente. Durante el día o cuando las luces están

encendidas en el cuarto, la temperatura del sistema aumenta levemente y la histéresis se fija a un valor pequeño.

**4.2.2 Puesta en práctica de una estrategia del control de lógica difusa.** La figura 34. muestra la estructura del sistema de lógica difusa según lo diseñado con el sistema de desarrollo *borroso* del TECH. Todas las variables de entrada tienen tres (3) términos con funciones de membresía estandarizada. La variable de salida "corrección" tiene cinco (5) términos y utiliza la **Defuzzificación Center-of-Maximun**. La variable de salida "Histéresis" tiene tres (3) términos y utiliza también la **Defuzzificación Center-of-Maximun**.

Figura 34. Estructura del sistema de lógica difusa en el termostato.

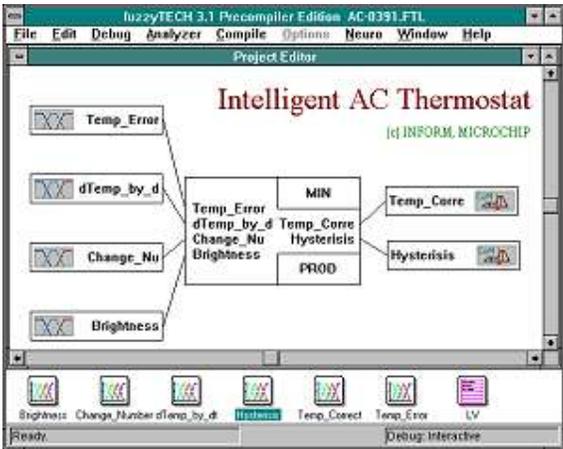


Figura 35. Reglas de lógica difusa que el termostato emplea para corregir la temperatura del sistema y la histéresis.

Spreadsheet Rule Editor								
Matrix	IF				THEN			
Rules	Temp_Error	dTemp_dt	Changes	Brightness	DoS	Correction	DoS	Hysteresis
1				medium	1.00	warmer	1.00	small
2				high	1.00	cooler		
3		negative			1.00	much_cool	1.00	large
4			frequent				1.00	small
5	too_cold				1.00	warmer	1.00	large
6	too_warm				1.00	cooler	1.00	large
7	OK	zero			1.00	zero	1.00	small
8								

Esta representación de la hoja de extensión es apropiada para las bases pequeñas de la regla. Cada fila representa una regla. La parte izquierda de la pantalla debajo del botón **IF** muestra todas las variables de entrada del bloque de la regla; la parte derecha debajo del botón **THEN** muestra todas las variables de salida. La columna dos que se exhibe para cada variable de salida permite la asociación de un peso a esta conclusión. Esto permite un fino ajuste del sistema de lógica difusa durante la optimización.

**4.2.3 Resultados y comparación de la simulación.** Se ha probado el sistema de lógica difusa usando los datos que se han registrado en varios cuartos bajo diferentes condiciones. Estos datos de prueba han sido pre-procesados con el software de la hoja de balance MS Excel™. Para probar el funcionamiento mediante la solución con lógica difusa, se han utilizado TECHs difusos. Se han utilizado enlaces Excel. Esto Permite que las celdas Excel se ligen a las variables de la entrada y de salida de lógica difusa. Ya que este acoplamiento es dinámico, el sistema de lógica difusa se puede supervisar y modificar usando los analizadores y los redactores difusos del **TECH** mientras que hojear a través de los **módems**.

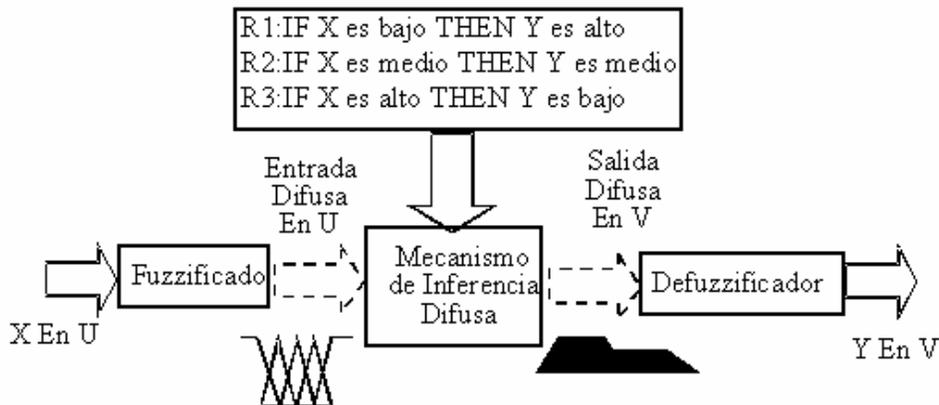
## ANEXO C

### TIPOS DE SISTEMAS DE LOGICA DIFUSA

Los sistemas de lógica difusa tiene un estrecha relación con los conceptos difusos tales como conjuntos difusos, variables lingüísticas y demás. Los más populares sistemas de lógica difusa que se encuentra en la literatura se encuentran en unos de los siguientes tipos: sistemas difusos tipo Mamdani (con fuzzificador y defuzzificador) Sistemas difusos tipo Takagi-Sugeno

**Sistemas Tipo Mamdani.** En la figura se muestra la configuración básica de un sistema tipo Mamdani.

Figura 1. Sistema Difuso Mamdani, Procesamiento General.



En un sistema difuso tipo Mamdani se distinguen las siguientes partes:

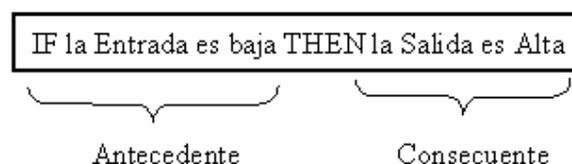
**Fuzzificador.** La entrada de un sistema de lógica difusa tipo Mamdani normalmente es un valor numérico proveniente, por ejemplo, de un sensor; para que este valor pueda ser procesado por el sistema difuso se hace necesario convertirlo a un "lenguaje" que los mecanismos de inferencia puedan procesar. Esta es la función del fuzzificador, que toma los valores numéricos provenientes del exterior y los convierte en valores "difusos" que pueden ser procesados por el mecanismo de inferencia. Estos valores difusos son los niveles de pertenencia de los valores de entrada a los diferentes conjuntos difusos en los cuales se ha dividido el universo de discurso de las diferentes variables de entrada al sistema.

**Mecanismo de inferencia difusa.** Teniendo los diferentes niveles de pertenencia arrojados por el fuzzificador, los mismos deben ser procesados para generar una salida difusa. La tarea del sistema de inferencia es tomar los niveles de pertenencia y apoyado en la base de reglas generar la salida del sistema difuso.

**Base de Reglas Difusas.** La base de reglas son la manera que tiene el sistema difuso de guardar el conocimiento lingüístico que le permiten resolver el problema para el cual ha sido diseñado. Estas reglas son del tipo IF-THEN.

Una regla de la base de reglas o base de conocimiento tiene dos partes, el antecedente y la conclusión como se observa en la figura 2.

Figura 2. Sentencia antecedente y consecuente sistema Mamdani.



En un sistema difuso tipo Mamdani tanto el antecedente como el consecuente de las reglas están dados por expresiones lingüísticas.

**Defuzzificador.** La salida que genera el mecanismo de inferencia es una salida difusa, lo cual significa que no puede ser interpretada por un elemento externo (por ejemplo un controlador) que solo manipule información numérica. Para lograr que la salida del sistema difuso pueda ser interpretada por elementos que solo procesen información numérica, hay que convertir la salida difusa del mecanismos de inferencia; este proceso lo realiza el fuzzificador.

La salida del mecanismo de inferencia es un conjunto difuso resultante, para generar la salida numérica a partir de estos conjuntos existen varias opciones como el Centro de Gravedad, los Centros Promediados entre otros.

Centro de gravedad.

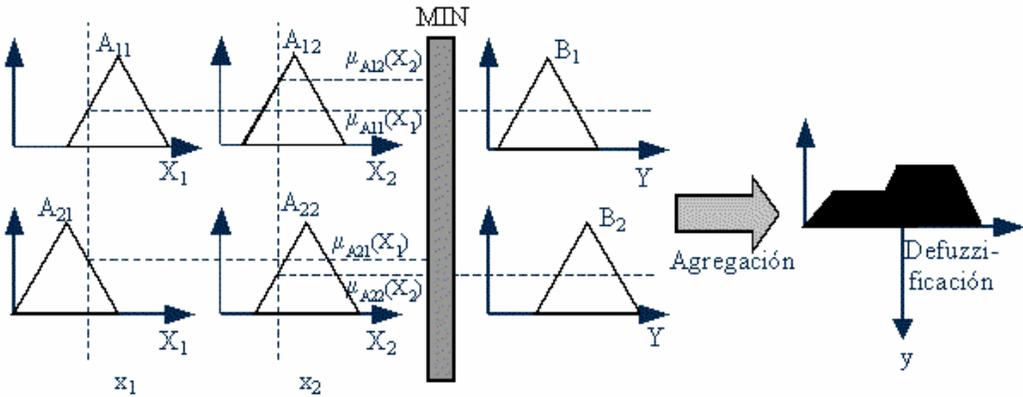
$$y = \frac{\sum_i b_i \int \mu(i)}{\sum_i \int \mu(i)}$$

**Centros Promediados.**

$$y = \frac{\sum_i b_i \int \mu(i)}{\sum_i \int \mu(i)}$$

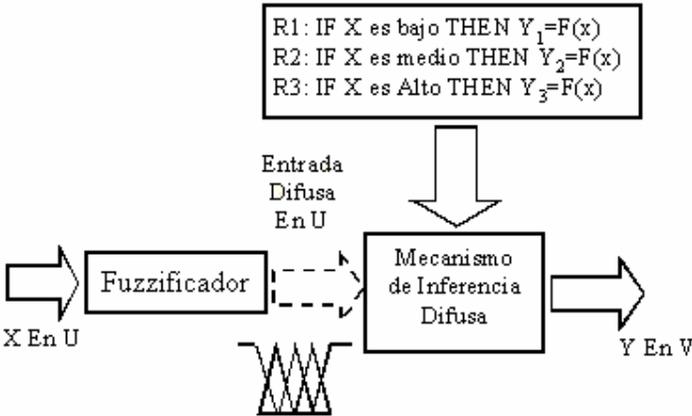
En la siguiente figura se muestra de manera mas detallada como es el funcionamiento de un sistema difuso Mamdani.

Figura 3. Sistema Difuso Mamdani, Procesamiento Detallado



**Sistema tipo Sugeno.** Otra alternativa de procesamiento en los sistemas difusos fue la propuesta por Sugeno en los sistemas difusos que llevan su nombre.

Figura 4. Sistema Difuso Sugeno, Procesamiento General.



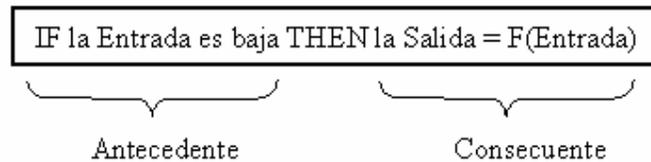
En los sistemas difusos Sugeno se distinguen las siguientes partes:

**Fuzzificador.** Realiza la misma función que en los sistemas Mamdani explicados anteriormente.

**Mecanismo de inferencia difusa.** Realiza la misma función que en los sistemas Mamdani explicados anteriormente.

**Base de Reglas Difusas.** Las reglas de la base de conocimiento de un sistema Sugeno es diferente a las de los sistemas Mamdani pues el consecuente de estas reglas ya no es una una etiqueta lingüística sino que es una función de la entrada que tenga el sistema en un momento dado, esto se ilustra a continuación en la figura 5.

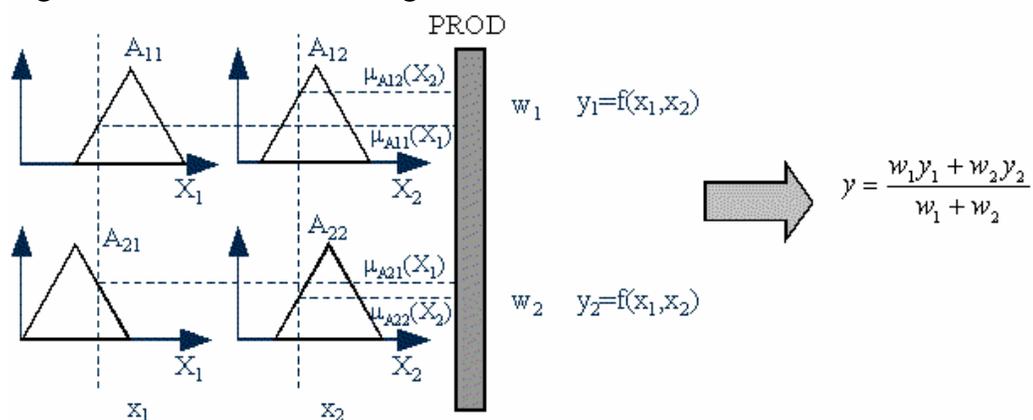
Figura 5. Sentencia antecedente y consecuente sistema Sugeno.



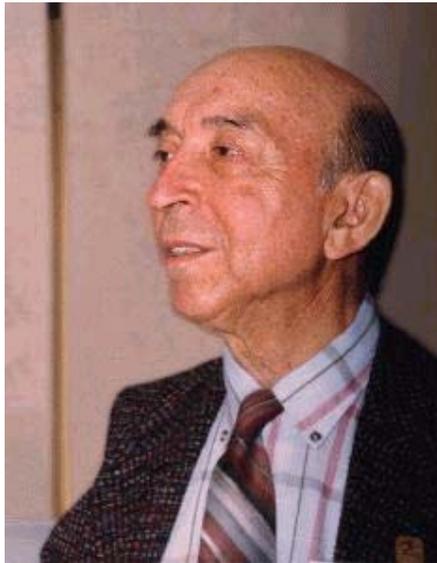
Serían las funciones que permiten calcular el consecuente de cada una de las dos reglas implicadas.

En la siguiente figura se muestra de manera mas detallada como es el funcionamiento de un sistema difuso Sugeno.

Figura 6. Sistema Difuso Sugeno, Procesamiento Detallado.



## ANEXO A



**Lofty A. Zadeh**

## **LOFTY A. ZADEH: LAS MÁQUINAS TIENEN QUE HABLAR EN HUMANO**

### **ENTREVISTA**

**Lluís AMIGUET**

**La Vanguardia, Barcelona, 23 nov. 2004-12-22**

Lo de la **FUZZY LOGIC** me cuesta pillarlo. El profesor Zadeh se desgañita en inglés y el doctor Gil Aluja en reusense. Sin éxito: soy de letras. Por fin, al día siguiente, descubro en un hotel ¡Albricias! ¡Pan de Madagascar!...¡Un aire acondicionado japonés con **“fuzzy”**! “Si usted tiene calor –dice el letrero–, apriete una vez; si tiene mucho calor, apriete dos”. Y con el frío lo mismo. Pero al darle ya no me acuerdo si “mucho” era dos o uno. Vuelvo a leer las instrucciones y vuelvo a apretar: hace frío y

sale aire helado, así que estoy equivocándome otra vez. Llamo a recepción y el señor pierde la paciencia: “Pero lea el letrero... ¡Si es muy fácil!”. Cuelgo, resignado, busco otra manta en el armario y me duermo aceptando que mi cerebro ya está deformado para siempre...

Tengo 83 años y sigo impartiendo clases en Berkeley. Nací en Baku, Azerbayán, y soy genuino fruto del culto soviético a la ciencia, pero hoy Rusia sólo adora al dinero. Mi lógica funciona en 5.000 patentes, de ordenadores a microondas, y creo que propicia un pensamiento más tolerante. He recibido el premio Kaufmann de la **Universitat Rovira i Virgili**.

ZADEH:.- Si en la vida nada es enteramente falso o enteramente cierto...

AMIGUET:.- Eso parece...

Z.- ¿Por qué la lógica, entonces, desde Aristóteles hasta Descartes, tenía que ser binaria: verdadero o falso, si o no, blanco o negro?

A.- Para los problemas del cole servía.

Z.- En 1965 publiqué un pequeño artículo científico en el que me revelaba contra esa estrecha lectura de la realidad. Fue el nacimiento de la “**Fuzzy logic**”, lógica borrosa.

A.- Una lógica gallega, difusa.

Z.- Una lógica más humana. El sentido común frente al idealismo racionalista. Se trataba de acercar la lógica a nuestro modo de pensar. ¿Acaso usted es feliz o

desgraciado? ¿O por el contrario usted gradúa su felicidad, el amor, la amistad, incluso su antipatía?

A.- Incluso los mezclo y confundo.

Z.- La mente humana siempre gradúa la realidad, la percibe así, y la lógica, lógicamente, debe hacer lo mismo!

A.- Parece lógico.

Z.- ¿Verdad? Pues todavía la comunidad científica recela de mi lógica borrosa.

A.- ¿Por qué?

Z.- Porque muchos científicos están cómodamente instalados en sus poltronas mentales y cambiar de hábitos les supone esfuerzo...

A.-... Que no están dispuestos a hacer.

Z.- ¡Menos mal que la realidad les enseña el camino! Por eso la industria se ha apresurado a aprovecharse de mi lógica y en cambio hay comunidades científicas que la miran con desconfianza.

A.- ¿Le dicen que no se la creen?

Z.- No se la creen hasta que la tocan. Uno de estos cerebros reticentes, un genio de la inteligencia artificial, me vino un día a ver a Berkeley con una videocámara cuyo autofocus y estabilización de imagen estaban basados en mi lógica y me confesó: “Perdone profesor: yo no creía en su lógica borrosa hasta que he filmado la realidad con ella; ahora sí creo”.

A.- ¿Cuántos aparatos funcionan hoy con su lógica borrosa?

Z.- Los japoneses, con más de 5.000 patentes, y los alemanes después son los grandes campeones de la aplicación de mi lógica a los automatismos de todo tipo de aparatos: desde el metro de Sendai en Japón, hasta medidores de la presión sanguínea, lavadoras, aspiradoras, ascensores, neveras, microondas... ¡Todo hoy funciona mejor con la lógica “fuzzy”.

A.- Pero ¿cómo funciona?

Z.- Las máquinas tienen que hablar en humano. Es más fácil para los humanos usar palabras que porcentajes o números para graduar los automatismos, por eso mi lenguaje se emparenta con la lingüística variable...

A.- Hacer que las máquinas hablen nuestro idioma.

Z.- De eso se trata. Una lavadora debe saber ir mucho más allá del encendido o apagado. Tiene que saber analizar percepciones humanas en gradación, y con la

lógica binaria las máquinas no entienden gradaciones y las percepciones humanas que son graduales.

A.- Es como esa tele que nunca sé si está del todo encendida o apagada.

Z.- Porque siempre hay posibilidades intermedias siempre graduables. Hemos superado la lógica binaria que regía nuestra ingeniería. Una lavadora tiene que saber lavar a medias. En lógica “fuzzy” todo es graduable y a todo se le ha de permitir que sea graduable.

A.- Yo sigo sin entender cómo demonios funciona mi vídeo y me pierdo peleas y partidos.

Z.- ¡Porque son aparatos que todavía no aplican la lógica “**fuzzy**”. Sus manuales de instrucción son jeroglíficos. Mi lógica es mucho más comprensible para los seres humanos que la binaria. Y aún le diré más: la substitución de la lógica binaria de verdadero/falso, o blanco/negro por la “**fuzzy**” de hecho acaba influyendo en el modo de pensar del ciudadano. Creo que la lógica “**fuzzy**” propicia hábitos mentales más tolerantes, más humanos: en la lógica “**fuzzy**” la verdad o la mentira son graduables. Como en la vida misma.

A.- El automatismo de la lavadora o el aspirador influye en mi modo de pensar?

Z.- Pues claro.

A.- Se habrá usted forrado con el invento.

Z.- ¡No! No me ha interesado nunca cobrar por mi descubrimiento. Lo único que he recibido fue un detalle de Canon, que me regaló una cámara especial, la primera con lógica “fuzzy”, que lleva mi nombre grabado en oro. Eso es todo, pero hacerme rico no, porque yo soy hijo de la cultura soviética.

A.- ¿A qué se refiere?

Z.- A mi me educaron en la adoración a la ciencia para que devolviera a la sociedad algo del inmenso esfuerzo que todos mis conciudadanos hacían para educarme.

A.- Pues hoy se lo cobran los japoneses.

Z.- La humanidad. Da igual. A mi no me interesa el dinero y le aseguro que si me interesara, sería millonario. Pero soy mucho más feliz investigando: si mi lógica es más útil a todos sin encarecer las patentes, mejor.

A.- ¿Por qué acabó usted en Berkeley?

Z.- Mi formación inicial era soviética y con ella el culto a la ciencia y la pasión por las matemáticas. Mi padre era periodista y lo destinaron a Teherán y allí acudí al colegio norteamericano, que dejó una profunda impronta en mí: me pareció natural ir a estudiar a EE.UU. Sé que si cuando descubrí la lógica “fuzzy” yo no hubiera sido el jefe del Departamento de Ingeniería de Berkeley...

A.- Nadie le hubiera hecho caso.

Z.- Nadie. Menos mal que en Japón antes de discutir teóricamente mi lógica se pusieron a hacerla funcionar en la práctica y se impuso. Y debo citar en España a dos paladines de la lógica “fuzzy”: los doctores Jaume Gil Aluja y Enric Trillas que han conseguido que mi lógica sea también española.

## **ANEXO B**

### RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CONTRIBUCIONES

1. El desarrollo de un frecuencia-dominio basó la teoría de redes tiempo-**time-varying**, 1949
2. Desarrollo de una teoría de filtros no lineales, 1953.

3. Formulación del problema de la identificación del sistema, 1956.
4. Lanzamiento del acercamiento del estado-espacio al análisis de sistemas lineales, con C.A. Desoer, 1963.
5. Lanzamiento de la teoría de conjuntos borrosos, 1965.
6. Desarrollo de una teoría de la toma de decisión en un ambiente borroso, con R.E. Bellman, 1970.
7. Introducción de los conceptos de una variable lingüística y borrosa si entonces reglas, 1973. Este trabajo puso los fundamentos para el control de la lógica confusa y la mayoría de las aplicaciones actuales de la lógica confusa.
8. Desarrollo de la teoría de la posibilidad, 1978.
9. Desarrollo de PRUF - un lenguaje para los lenguajes naturales, 1978 de la representación del significado.
10. Desarrollo de una teoría del razonamiento aproximado, 1979.
11. Desarrollo de una teoría del razonamiento del **usuality** y del **common sense**, 1985.
12. Desarrollo de la semántica para los lenguajes naturales, 1986.
13. Desarrollo del concepto de un constreñimiento generalizado, 1986.
14. Desarrollo de la lógica del **dispositional**, 1988.
15. Lanzamiento del calculo de reglas borrosas, de gráficos borrosos y de las probabilidades borrosas, 1991.
16. Desarrollo de software, 1991.
17. Desarrollo de **software** con **Words**, 1996.
18. Desarrollo de la teoría de la información borrosa **Granulation**, 1997.
19. Desarrollo de una teoría de cómputo de **Perceptions**, 1998.

## **CONCLUSIONES**

De este trabajo se obtienen las siguientes conclusiones:

La lógica difusa ha mostrado gran aplicabilidad en la mayor parte del entorno humano desde lo social hasta el desarrollo técnico y científico; los sistemas de lógica difusa reúnen los conocimientos de humanos expertos en un área específica. De esta forma los datos son recopilados y presentados de una manera mas precisa como un conjunto de reglas formuladas según sentencias condicionantes como la utilización de expresiones lingüísticas.

Entre las múltiples ventajas de un Sistema de Control difuso se pueden mencionar:

- Una mayor cantidad de variables puede ser evaluada.
- Variables lingüísticas, no numéricas, se pueden emplear simulando

la vía del conocimiento humano.

- Estas relacionan entradas y salidas, sin tener que entender todas las variables

permitiendo que el sistema pueda ser mas 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 se requiere conocer

todas las variables acerca del sistema antes de empezar a trabajar.

- El desarrollo de estos sistemas es más económico que el de sistemas

convencionales, porque son mas fáciles de diseñar.

- Simplifican la adquisición y representación del conocimiento.
- Con pocas reglas se pueden abarcar gran cantidad de complejidades.
- Como punto en contra los sistemas difusos requieren mayor simulación y una

excelente depuración y prueba antes de que sean operacionales.

Algunos de los sistemas donde las técnicas difusas son necesarias o benéficas son:

- Sistemas complejos, donde es muy difícil o imposible crear 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 sociales o relativos al comportamiento, la conducta y el proceder.
- Sistemas no lineales.

Para el caso del control de voltaje en sistemas de potencia mediante lógica difusa se puede concluir:

Los resultados del control de voltaje para contingencias de diferentes magnitudes en los sistemas de potencia, induce a establecer que el método SLD cumplen con los objetivos del control de voltaje dentro de los límites operativos.

Las aplicaciones del método de SLD( Sistema de Lógica Difusa) para el control de voltaje muestra claras ventajas tales como:

- Mayor flexibilidad en el modelo de control de voltaje.
- Efectividad computacional. La estructura simple del método de SLD no

depende de estructuras de datos especiales de lenguajes de programación.

- Tiempo de ejecución pequeño. Las reglas de operación se pueden evaluar en

forma simultánea; no existe una secuencia preestablecida en su evaluación. Se tiene una evaluación rápida al problema de control de voltaje, razón por la cual se considera que esta metodología es efectiva.

- El límite del método de SLD está relacionado con el conjunto de reglas de

operación que constituyen la base del conocimiento. La base del conocimiento es válida solamente para el sistema específico bajo control; por consiguiente se hace

necesario un proceso computacional inteligente (con aprendizaje) que genere las reglas de operación de la base de conocimiento para cualquier sistema de potencia.

Para el caso de la incubadora de cuidados intensivos controlada por lógica difusa se puede concluir:

- Con las distintas pruebas que se realizaron sobre este prototipo, se comprobó

que su comportamiento alcanzo y supero el desempeño de las incubadores comerciales en existencia. La operación por parte de los usuarios fue muy aceptada.

- Con respecto al control de temperatura implementando lógica difusa, se puede

decir que posee las ventajas de no necesitar un método matemático preciso del sistema a controlar, tiene alto rechazo al ruido y permite contemplar situaciones excepcionales del estado del proceso, gracias a su forma de representar el conocimiento.

- Como desventaja se puede decir, que el diseño debe realizarse

generalmente

con el método de prueba y error.

Para el caso de electrodomésticos que operan con tecnología difusa y aludiendo el caso especial de las lavadoras y termostatos de control difuso se concluye:

- Las lavadoras modernas de hoy detectan la calidad y la cantidad de

suciedad

en la ropa, el peso de la carga y el tipo de tela. Además ajustan el ciclo de la colada, la temperatura y el nivel de detergente.

- Para la detección de carga en lavadoras, se emplea la tecnología

de

las redes neuronales que instalado a un sistema con lógica difusa emplea datos experimentales. Los resultados del experimento de lavado, evaluados por los expertos, forman esta base de datos. La introducción del detector de carga para el lavado con lógica difusa repercute en un ahorro promedio del 20% en el agua y energía.

- La temperatura ambiente controlada por el termostato con lógica difusa,

da lugar a un nivel mayor de comodidad. Además, el termostato con lógica difusa detectó las situaciones donde se requiere menos esfuerzo para realizar el

enfriamiento. La simulación reveló que en una casa residencial media, el consumo de energía media fue reducido hasta en un 3.5%. Al mismo tiempo, el nivel de comodidad aumentó, puesto que, dependiendo de la situación, el termostato con lógica difusa redujo la temperatura ambiente 5°F más que el termostato convencional.

- El termostato con lógica difusa no requiere de ninguna modificación de CA

por sí mismo. Por lo tanto, mediante la sustitución de reguladores de temperatura existentes, hasta los viejos sistemas de CA pueden ser modernizados. También controlando la ventilación se puede alcanzar un mejor desempeño en su funcionamiento.

## RECOMENDACIONES

1. Una de las aplicaciones que mayor auge ha tenido últimamente la lógica difusa ha sido en la identificación de procesos, por lo que se hace necesario Investigar sobre el estado del arte de las investigaciones relacionadas, lo cual está íntimamente ligado al control de procesos.
2. Otro de los campos en los que se deben direccionar otras investigaciones sobre la lógica difusa es en la bioinformática, la cual cobra mayor importancia día a día y en los que se han desarrollado novedosos algoritmos de búsqueda y análisis de datos empleando lógica difusa.
3. Es de resaltar la gran importancia que ha cobrado en los últimos años el descubrimiento del genoma humano, por lo que se hace indispensable implementar en dichas investigaciones herramientas útiles en el análisis y solución de problemas de difícil modelación matemática en este campo.
4. En tecnologías donde la naturaleza prima como modelo natural en todas las investigaciones, resulta de gran utilidad inyectar en los correspondientes programas académicos estudios relacionados con la lógica difusa pues el desarrollo progresivo y continuado de esta herramienta será pieza clave en el avance y progreso de

tecnologías tales como la robótica, la cibernética, las comunicaciones espaciales, los diagnósticos médicos de enfermedades de difícil detección previa así como de otros campos como la criminalística donde día a día se perfeccionan los métodos para dar solución final a la impunidad mediante el conocimiento del comportamiento humano.

5. Otro campo en donde la utilización de la herramienta difusa resulta de vital importancia es en la exploración de yacimientos minerales, especialmente en países como Colombia, Venezuela y otros en donde esta actividad constituye una de sus principales fuentes de ingresos económicos.

## BIBLIOGRAFÍA

Astrom K J A y Arzen, K E (1986) **Expert control**. Automática, 22 (3) 227 286.

Chen, Guanrog, and Trung Tat Pham “ **Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy control Systems** “CRC Press, 2001.

Dubois, D Prade, H y Ughetto, L (1997) **Checking the coherence and redundancy of Fuzzy Knowledge bases**. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 5 (3).

Jay D Colclazier “**Fuzzy Logic An Effective Alternative to PID Control**” **Advances in Instrumentation and control ISA Conference**, 1994

Jan Jantzen < JJ @ iau.dtu.dk > **Tutorial on Fuzzy Logic**.

Kim, G. (1998). **A Model Validation Methodology For Isolating Knowledge Between Fuzzy rule-based and Quantitative Models Using Fuzzy Simulation** University of Florida. Ph.D. thesis.

Lee H M Chen J M y Lui C.L (2002) **Inconsistency resolution and rule insertion for Fuzzy rule-based Systems**, **Journal of information Science and Engineering** 18, 187-210.

Lin C T y Lee G (1991) **Neural network-based fuzzy logic control and decision system. IEEE transactions on Computers Special issue on Artificial Neural Networks** 40 (12) 1320-1336.

Ling, Cheng, and Edgar Thomas F **“The Tuning of Fuzzy Heuristic Controllers” Proceedings of American Control Conference, Chicago.** 1992 pp. 22842290.

Mamdani E H **“Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant” Proceedings of the Institution of Electrical Engineers (London)** v 121 n 12 Dec 1974 p 1585-1588, 121 (12) pp. 1585-1588.

Morari M y Zafirou E (1989) **Robust process control.** Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall.

Nguyen T Perkins, W Laffey T y Pecora D (1985) **Checking and expert** 85 (pp. 375-378).

Passino K y Yurkovich S (1998), **Fuzzy Control** Addison- Wesley California (pp. 301-390).

Sala, A (1998). Validación y Aproximación Funcional en Sistemas de Control Basados en la Lógica Borrosa. Universidad politécnica de Valencia. Tesis Doctoral.

Shinsky F G **“Process Control Systems: Application, Design, and Adjustment”** 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill Book, New York 1988.

Sugeno M **“An Introductory Survey of Fuzzy Control “Information Sciences**, vol. 38 1985 pp. 59-83.

Willy Wojsznis **“An Alternative Fuzzy Logic Controller Design: A Simulation Study “Proceedings of the 1994 International Control Engineering Conference**, pp. 159-167 March 1994, Chicago.

Yager, R. y Larsen H (1991). **On discovering potential inconsistencies validating uncertain knowledge bases by reflecting on the input IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics**, 21(4), 790-801.

Ying, Hao, Siler, William, and Buckley. James, **“Fuzzy Control Theory: A Nonlinear case” Automatica**, vol. 26 no 3. 1990.

Zadeh L A. (1965). **Fuzzy Sets and Systems “Information & Control”**, vol. 8 1965 pp. 338-353.

\_\_\_\_\_ (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex system and decision processes. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 32844.

[http://members.tripod.com/jesus\\_alfonso\\_lopez/FuzzyIntro.html](http://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/FuzzyIntro.html)

[www.lcc.uma.es/~ppgg/FSS/Fundamentosdelogicadifusa](http://www.lcc.uma.es/~ppgg/FSS/Fundamentosdelogicadifusa)

[www.itq.edu.mx/vidatec/espacio/aiee/256,1,Fundamentosdelogicadifusa](http://www.itq.edu.mx/vidatec/espacio/aiee/256,1,Fundamentosdelogicadifusa)

<http://diofantico.homeip.net/doctorado/articulos/planyrobot.pdf>

<http://www.egrafica.unizar.es/ingegraf/pdf/comunicacion17108.pdf>

[http://ingenierias.uanl.mx/23/pdfs/23\\_p30a36\\_sierra.pdf](http://ingenierias.uanl.mx/23/pdfs/23_p30a36_sierra.pdf)

<http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/moralesacca.pdf>

[http://www.unal.edu.co/icn/Publicaciones/caldasias/26\(1\)/12F.pdf](http://www.unal.edu.co/icn/Publicaciones/caldasias/26(1)/12F.pdf)

<http://www.eng.salleurl.edu/~se04184/P2Definitions.html>

<http://espejos.unesco.org.uy/simplac2002/Ponencias/Infoedu/IE005%20Juan%20Antonio%20Contreras%20Montes.doc>

[http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/Sept2004/Energy\\_energia\\_01.pdf](http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/Sept2004/Energy_energia_01.pdf)

[http://ingenierias.uanl.mx/6/pdf/6\\_Manuel\\_Ley\\_et\\_al\\_Control\\_Voltaje.pdf](http://ingenierias.uanl.mx/6/pdf/6_Manuel_Ley_et_al_Control_Voltaje.pdf)

<http://www.Control-Systems-Principles.co.uk/whitepapers/Spanishwp/13fuzzylogicSP.pdf>

<http://www.hab2001.sld.cu/arrepdf/00209.pdf>

<http://www.hab2001.sld.cu/arrepdf/00163.pdf>

<http://www.elo.utfsm.cl/~elo377/Fuzzy.pdf>

<http://kim.ece.buap.mx/posgrado/Fuzzytutorials/sites.html>

<http://eia.udg.es/~atm/bcads/pdf/maagpa-cameraready.pdf>

<http://dimei.fi-b.unam.mx/CDM/ARTICULOSOMIM.htm>

Delta T<sup>m</sup> Home Page: <http://www.easydeltav.com>

## INDICE DE CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCION	22
1.1 RESEÑA HISTORICA Y ESTADO DE ARTE	23
1.2 IMPACTO EN COLOMBIA	27
1.3 MARCO TEORICO	29
1.3.1 ¿Qué es la lógica difusa?	29
1.3.2 Conjuntos difusos	29
1.3.3 Operaciones entre conjuntos difusos	31
Intersección	31
Unión	33
<b>Complemento</b>	<b>34</b>

	pág.
1.3.4 Control difuso	36
<b>Construyendo un controlador difuso</b>	<b>37</b>
<b>Fuzzificación</b>	<b>37</b>
<b>Reglas de inferencia difusa</b>	<b>39</b>
Defuzzificación	41
2. APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA INDUSTRIA	43
2.1 APLICACIONES EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	43
2.2 LOGICA DIFUSA APLICADA PARA LA DETERMINACION DEL NIVEL DE DETERIORO EN LAS LINEAS ELECTRICAS	45
2.3 APLICACIÓN DE LA LOGICA DIFUSA PARA LA MODELACION DEL DETERIORO EN TUBERIAS	45
2.4 LOGICA DIFUSA APLICADA AL CONTROL DE UN SERVO SISTEMA NEUMÁTICO	46

pág.

## 2.5 LOGICA DIFUSA APLICADA EN DIBUJO INDUSTRIAL.

47

2.6 LOGICA DIFUSA APLICADA AL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES 48

2.7 LOGICA DIFUSA APLICADA EN INGENIERIA AMBIENTAL 49

2.8 CONTROL DE VOLTAJE DE SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO LOGICA DIFUSA. 49

2.8.1 Aplicación de la teoría de conjuntos difusos 50

2.8.2 Problemas de control de voltaje en estado estacionario en sistemas de potencia 52

2.8.3 Características de los sistemas de lógica difusa 52

Umrales y funciones de membresía de los nodos de carga 53

pág.

Umrales y funciones de membresía de los cambios de voltaje en los nodos de generación 53

2.8.4 Base de conocimiento 54

2.8.5 Aplicaciones y resultados	56
---------------------------------	----

### 3. APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN OTROS CAMPOS 62

3.1 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA DOCENCIA	62
---	----

3.2 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA AGRICULTURA	63
--	----

3.3 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA PREVENCIÓN DE DESASTRES NATURALES	63
---	----

3.4 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN INFORMÁTICA	64
---	----

3.5 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LA ROBÓTICA	65
---	----

3.6 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN MEDICINA	67
	pág.

3.6.1 Incubadora de cuidados intensivos controlada por lógica difusa	68
--	----

Controladores con lógica difusa	71
---------------------------------	----

Descripción del circuito	72
--------------------------	----

Interfase con el operador	72
Medición de temperatura	74
Censor de sobre temperatura	74
Censor de humedad	75
<i>Censor de potencia calefactor</i>	75
Censor motor detenido	76
Contador de pulsos cardiacos	76
Control de temperatura	76
	pág.
<b>Fuzzificación</b>	<b>78</b>
<b>Base de conocimiento</b>	<b>78</b>
Defuzzificación	79

Resultados	80
4. APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA EN LOS ELECTRODOMESTICOS	82
4.1 ANÁLISIS DE LA SEÑAL NEURO-FUZZY EN LAVADORAS	83
4.1.1 Lavadoras europeas	84
4.1.2 Curvas de absorción de agua	85
4.1.3 Lógica difusa contra neuro fuzzy	88
4.2 TERMOSTATOS PARA EL CONTROL DE AIRE ACONDICIONADO	90
4.2.1 Termostato inteligente con lógica difusa	91
	pág.
4.2.2 Puesta en practica de una estrategia de control por lógica difusa	94
4.2.3 Resultados y comparación de la simulación	95
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Conjuntos difusos para la altura de una persona	30
<b>Figura 2. Conjuntos crips para la altura de una persona</b>	<b>30</b>
Figura 3. Conjuntos difusos entre los que se definirán las operaciones	31
<b>Figura 4. Intersección entre dos conjuntos difusos</b>	<b>32</b>
Figura 5. Valor de pertenencia de $x= 4.5$ a la intersección de los conjuntos difusos A y B	32
Figura 6. Unión entre dos conjuntos difusos	33
Figura 7. Valor de pertenencia de $x= 4.5$ a la unión de los conjuntos difusos A y B	34
Figura 8. Complemento de un conjunto difuso	35
Figura 9. Valor de pertenencia de $x= 6$ al complemento del conjunto difuso A	35
Figura 10. Diagrama de un controlador difuso típico	37
Figura 11. Funciones de pertenencia para conjuntos difusos alto y bajo	38
Figura 12. Nivel de tanque controlado por un controlador difuso	40
Figura 13. Funciones de pertenencia para el nivel de un tanque	40
Figura 14. Operación de un controlador difuso	41
Figura 15. Funciones de membresía del voltaje de nodos de carga	53
	pág.

Figura 16. Funciones de membresia de los cambios de voltaje en nodos de generación	54
Figura 17. Proceso de simulación	56
Figura 18. Sistema de 9 nodos de la IEEE	57
Figura 19. Diagrama en bloques del circuito de la incubadora de cuidados intensivos	71
Figura 20. Esquema de un controlador de lógica difusa	71
<b>Figura 21. Pantalla de monitoreo de los parámetros de la incubadora realizada en labview</b>	<b>73</b>
Figura 22. Circuito electrónico de la Interfase de usuario	74
Figura 23. Circuito electrónico del control de potencia en la resistencia calefactora	77
Figura 24. División de los conjuntos difusos para las variables error y gradiente, respectivamente, realizadas en el Software Fuzzy Tech	78
Figura 25. Reglas programadas en el Fuzzy Tech Explorer	79
Figura 26. Representación de los conjuntos difusos para la variable de salida que comandara el ángulo de disparo del Triac	80
Figura 27. Evolución de la temperatura en el tiempo dentro de la incubadora ante una perturbación	81
<b>Figura 28. Diagrama esquemático de una lavadora neuro Fuzzy</b>	<b>83</b>
Figura 29. Vista exterior y de corte de una lavadora difusa	84
	pág.
Figura 30. Nivel del agua en el tambor de la lavadora durante el lavado inicial	86
Figura 31. Estructura del sistema de lógica difusa para el cálculo del requerimiento de agua en los procesos de lavado y enjuague	87
Figura 32. Esquema para un termostato convencional	90
Figura 33. Termostato difuso	92
Figura 34. Estructura del sistema de la lógica difusa en el termostato	94
<b>Figura 35. Reglas de la lógica difusa para el termostato</b>	<b>95</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Principales diferencias entre el control difuso y el clásico	36
Tabla 2. Reglas de inferencia difusa para control del nivel de un Tanque	40
Tabla 3. Parámetros del sistema de potencia	57
Tabla 4. Condiciones iniciales del sistema de potencia	58
Tabla 5. Soluciones del caso 1	59
<b>Tabla 6. Soluciones del caso 2</b>	<b>60</b>
Tabla 7. Soluciones del caso 3	60
Tabla 8. Pérdidas de potencia activa	61
Tabla 9. Datos del ejemplo para el entrenamiento neuro Fuzzy de la lavadora difusa	89

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

Cartagena, Febrero 28 de 2006

Cartagena de Indias, Febrero de 2006

Señores:  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR  
Comité de Evaluación de Proyectos  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
La Ciudad

Estimados señores:

De la manera más cordial, me permito presentar a Ustedes para su estudio, consideración y aprobación la Monografía con el título de **“APLICACIONES INDUSTRIALES, DOMESTICAS Y OTROS CAMPOS DE LA LOGICA DIFUSA”**,

Trabajo de grado presentado para obtener el titulo de Ingeniero Electricista.

Espero que este proyecto sea de su total agrado

Cordialmente,

---

JORGE ALBERTO ORTIZ TURIZO  
Código 0102350

Cartagena de Indias, Febrero de 2006

Señores :  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR  
Comité de Evaluación de Proyectos  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
La Ciudad.

Estimados señores:

Con el mayor agrado me dirijo a ustedes para poner a consideración la Monografía con el título de **“APLICACIONES INDUSTRIALES, DOMESTICAS Y EN OTROS CAMPOS DE LA LOGICA DIFUSA”**, la cual fue desarrollada por el estudiante JORGE ALBERTO ORTIZ TURIZO, bajo mi orientación como director.

Agradeciendo su amable atención

Cordialmente,

---

ENRIQUE VANEGAS CASADIEGO  
Ingeniero Electricista.

## **AUTORIZACIÓN**

Cartagena de Indias D.T.C.H.,

Yo, JORGE ALBERTO ORTIZ TURIZO, identificado con en número de cédula 73.149.313 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catálogo online de la Biblioteca

Nombre del estudiante

---

JORGE ALBERTO ORTIZ TURIZO

## **DEDICATORIA**

Dedico esta Obra principalmente a Mi Amado Padre Celestial y a su muy amadísimo hijo JESUCRISTO que desde siempre me han bendecido con su infinito amor.

A mi hija MARIA ALEJANDRA quien se ha constituido en una de mis mayores alegrías.

A mi madre quien me ha apoyado a salir adelante.

A los Ingenieros Oscar Segundo Acuña y Enrique Vanegas quienes con su orientación y apoyo me han ayudado en los momentos más difíciles de mi carrera.

Al Ingeniero Juan Antonio Contreras quien gracias a su conocimiento y guía he logrado culminar con éxito esta Obra.

A todos ellos EL SEÑOR los guarde siempre.

**JORGE ALBERTO ORTIZ TURIZO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco principalmente a todo el cuerpo de docentes y a la Institución en general, por brindarme las herramientas y apoyo necesario durante el desarrollo académico e investigativo de este trabajo.

Especialmente a mi Director Enrique Vanegas Casadiego por la orientación y apoyo brindado en el transcurso de mi investigación.

## RESUMEN

En el capítulo introductorio se hace una breve reseña histórica de la lógica difusa desde sus inicios hasta sus actuales alcances en el desarrollo tecnológico y científico de la humanidad.

De igual forma, en este mismo capítulo de introducción se define lo que es la lógica difusa, se mencionan las ventajas con respecto a lógica tradicional, se resalta el estado de arte al igual que el impacto que esta herramienta ha logrado en Colombia y su perspectiva hacia el futuro.

Hacia el final de este mismo capítulo se presenta el marco teórico que sustenta las bases en las que se apoya la lógica difusa, aquí se destacan entre otros los conjuntos difusos y las operaciones entre ellos y una aplicación práctica de control difuso para el control de nivel de un tanque.

En el capítulo de las aplicaciones de la lógica difusa se presenta las diversas estrategias empleadas por expertos en los diversos campos del conocimiento humano tomando como base los fundamentos de la lógica difusa. En el campo industrial se detalla una aplicación práctica en el control de voltaje para sistemas de potencia, a su vez se menciona otras aplicaciones en la industria enfocadas al cálculo del nivel de deterioro en las tuberías y la determinación del nivel de deterioro de las líneas eléctricas. De igual forma se menciona una aplicación de la lógica difusa en mecánica para el control de un servo- sistema neumático.

Se hace también referencia a los trabajos de investigación desarrollados por algunas universidades del país empleando lógica difusa, destacándose entre otras la Universidad Nacional de Colombia con trabajos como la implementación de un sistema que emplea lógica difusa para determinar la geometría óptima de la herramienta de corte en operaciones de maquinado. Finalmente en el área industrial se hace referencia a la aplicabilidad de **fuzzy logic** en el control de procesos industriales e ingeniería ambiental.

En otros campos se detalla la aplicación de la lógica difusa para el control de una incubadora de cuidados intensivos, se mencionan además otras aplicaciones prácticas en el campo de la medicina, la docencia, la agricultura, la prevención de desastres naturales, informática y robótica.

En los electrodomésticos, se presenta una aplicación práctica en lavadoras y termostatos para el control de aires acondicionados.

Espero que esta obra sea de gran utilidad para sus lectores y responda a sus expectativas sobre el tema.