



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

10 ej.

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ARAGON”

“CONTROLADORES DE SENTIDO COMUN”

T E S I S

Que para obtener el Título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a

ANDRES FERREYRA RAMIREZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

San Juan de Aragón, Edo. de Méx.

1994



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**EL HOMBRE NO PUEDE HEREDAR EL PASADO; DEBE  
CREARLO DE NUEVO**

*En agradecimiento por el apoyo y comprensión durante mi formación profesional y por el amor que me han brindado a lo largo de mi vida. Dedico este trabajo de tesis.*

*A mi madre*

*Antonia Ramírez de Ferreira*

*A la memoria de mi padre y de mi hermano que en paz descansen*

*Andrés Ferreira Peña  
y  
Ramón Ferreira Ramírez*

*A mis familiares*

*A mis amigos*

*Al M. en I. Angel Ramón Zapata Ferrer por sus valiosos consejos y apoyo para la culminación exitosa de éste trabajo de tesis.*

*Al Dr. en I. Adriano de Luca Peniche por su valiosa colaboración y por su apoyo y confianza depositados en la asesoría de este trabajo.*

*Y muy en especial*

*Al M. en I. David González Maxínez por su estupenda dirección en la asesoría de esta tesis, por su gran capacidad humana y por su amistad incondicional.*

## CONTENIDO

## PREFACIO

## CAPITULO 1.- SISTEMAS FUZZY LOGIC

1.1. Introducción	1
1.2. El concepto de Fuzzy	2
1.3. Las características de Fuzzy	5
1.4. ¿ Cuando es apropiado usar la lógica difusa	6
1.5. Principios básicos fuzzy	7
1.5.1. La lógica difusa en terminos de sets	7
1.5.2. Variables lingüísticas y su aplicación al control fuzzy	12

## CAPITULO 2. DESCRIPCION DE LOS CONTROLADORES FUZZY

2.1. Introducción	15
2.2. Control fuzzy en perspectiva	16
2.2.1 Controladores Convencionales	16
2.2.1.1. Controladores Digitales	16
2.2.1.2. Controladores PID	16
2.2.2 Controladores con lógica difusa	19
2.3. Metodología de diseño fuzzy	22
2.4. Fuzzy vs control convencional	45

## CAPITULO 3. MODULOS FUZZY Y SUS APLICACIONES

3.1. Introducción	47
3.2. Estructuras para el contro fuzzy	50
3.3. Arquitecturas Hardware fuzzy	57
3.3.1. Circuitos analógicos para la instrumentación de controladores difusos	58
3.3.2. Arquitectura de un mecanismo de inferencia fuzzy	66
3.4. Aplicaciones de la lógica difusa	70
3.5. Desarrollos recientes	72
3.6. Herramientas fuzzy	75

CONCLUSIONES	76
--------------	----

BIBLIOGRAFIA	77
--------------	----

## PREFACIO

*Los ordenadores no funcionan como los cerebros. El "razonar" de un ordenador consiste en manipular hechos precisos, enunciados que por necesidad son o verdaderos o falsos, convertidos en series de ceros y unos, mientras que el cerebro humano puede hacerlo con aseveraciones vagas, afirmaciones inciertas y juicios de valor: "hace frío", "va de prisa", "es joven". A los ordenadores les falta el sentido común que nosotros poseemos y que nos permite afrontar un mundo en el que las cosas solo son parcialmente verdaderas.*

*Los controladores de sentido común -también conocidos como controladores de lógica difusa-son una rama de la inteligencia artificial gracias a la cual los ordenadores pueden diluir el blanco y el negro de la lógica ordinaria y los grises con que el sentido común percibe un mundo incierto.*

*La teoría Fuzzy nace hace 29 años. En 1964 Lofti Zadeh -un profesor de la Universidad de California en Berkeley- presenta su artículo bosquejando la teoría Fuzzy ante una asamblea de 20 profesores, los cuales lo criticaron fuertemente. Pero como es normal, cuando surgen teorías nuevas; estas tienen que enfrentarse a obstáculos tecnológicos y financieros. Por ejemplo algunas de estas novedades, como el panel-liso (display) de computadora, para muchos expertos necesitaba de trabajos más extensos; otros como el VCR, caen víctimas de la mercadotecnia y la fabricación de baja calidad. Sin embargo otros, como los robots industriales, sencillamente son suspendidos y son utilizados solo para estimular el interés del inventor<sup>1</sup>. En todos estos casos, las empresas americanas ven el precio que hay que pagar para alcanzar la meta y el tiempo que tomaría llegar a esta; por lo que en muchas ocasiones no quieren arriesgar su dinero y su tiempo.*

*A diferencia de esto, el obstáculo al que se tuvo que enfrentar la lógica difusa (Fuzzy logic) fué mental. Cuando Zadeh dio a conocer su teoría, esta fue fuertemente rechazada y los científicos americanos advertían en contra de ella, llamándola una farsa ya que toleraba sin precedentes a la permisividad y para ellos esto era algo que amenazaba al método científico. Tales acusaciones hicieron de la lógica difusa una tecnología escondida y poco conocida en los Estados Unidos.*

*A principios de 1973, Zadeh demuestra que con la lógica difusa se pueden fabricar máquinas inteligentes y en 1974, E.H. Mandani - un profesor de colegio Queen Mary, en la Universidad de Londres - aplica por primera vez la teoría en un sistema de control de vapor<sup>2</sup>.*

---

<sup>1</sup> Daniel McNeill and Paul Freiberger: Fuzzy Logic. 1ª Ed. p. 10

<sup>2</sup> Daniel G. Schwartz and George J. Klir: Fuzzy logic Flowers in Japan, IEEE SPECTRUM JULI 1992 P. 32.

\* En este trabajo, cada vez que se hable de los controladores de lógica difusa (controladores Fuzzy Logic); estaremos refiriéndonos a los controladores de sentido común.

Por otra parte, mientras la lógica difusa era rechazada y criticada fuertemente en los Estados Unidos; un grupo de investigadores japoneses siguió cuidadosamente estos acontecimientos y descubrió que para desarrollarla no era necesario tener muchos años de preparación en este campo y tampoco era necesario invertir grandes cantidades de dinero. Por lo tanto, al darse cuenta de esto, los japoneses no solo le dieron la bienvenida a la lógica difusa sino que además la desarrollaron rápidamente para hacerla rentable y venderla a los Estados Unidos y Europa.

La lógica difusa capturó rápidamente el interés de los japoneses. Los noticieros nocturnos rutinarios, presentaban diariamente documentales que demostraban los avances que se lograban día con día con esta nueva teoría; inclusive cuando los niños caminaban y jugaban por las calles, platicaban e inventaban juegos sobre ella<sup>3</sup>.

La lógica difusa aparece comercialmente por primera vez en un controlador - producido por Hitachi - de un tren subterráneo en la ciudad de Sendai, Japón. El controlador gobernaba los aspectos de aceleración, frenado y paro; proporcionando un aumento de precisión en la plataforma de parada del tren así como un gran confort (aceleración y paro suave) y sobre todo un bajo consumo de energía eléctrica. Para 1991 el subterráneo de Sendai; tenía ya 4 años de funcionar y seguía siendo todavía el sistema más avanzado sobre la tierra. Desde entonces, el número de aplicaciones industriales de la lógica difusa ha ido en aumento, en casi todos los campos de la ingeniería.

Actualmente, una gran variedad de productos fuzzy están disponibles en Japón y unos cuantos son vendidos ahora en Estados Unidos y Europa. Tokyo's Cannon Inc, está aplicando un controlador con lógica difusa en el mecanismo de auto-enfoque de su nueva cámara de cine de 8mm. Matsushita y Panasonic Palmcorder usan la lógica difusa para una estabilización de imágenes en una cámara de consumo -las primeras de esta clase<sup>4</sup>. Pero esto no es todo, la lógica difusa a traído un enorme talento: lavadoras inteligentes, en las cuales colocando una carga de ropa y precionando el botón de encendido, la máquina empieza a agitar; seleccionando el mejor ciclo de lavado. Hornos de microondas, en los cuales solo se necesita colocar los alimentos dentro de ellos y oprimir el botón de encendido para que este cocine los alimentos en el tiempo exacto y a la temperatura apropiada<sup>4</sup>. La lógica difusa es aplicada sobre automóviles: amortiguando su recorrido,

---

<sup>3</sup> Daniel McNeill and Paul Freiberger: Fuzzy Logic. 1ª Ed. p.11

<sup>4</sup> Daniel G. Schwartz and George J. Klir: Fuzzy Logic Flowers in Japan, IEEE SPECTRUM JULI 1992 P. 34

umentando su seguridad, y sobre todo rebajando el consumo de gasolina en un 15%. Entre otras aplicaciones están los limpiadores en vació, aire acondicionado, ventiladores eléctricos, planchas, etc.<sup>4</sup>.

En consecuencia de todos estos logros tecnológicos obtenidos con la explotación de la lógica difusa, las empresas americanas decidieron arriesgar fuertes cantidades de dinero para tratar de alcanzar a los japoneses en el mercado mundial; entre estas se encuentran Motorola, General Electric, Ford, etc. Pero aunque estas empresas están invirtiendo fuertes cantidades para el desarrollo de sistemas con lógica difusa, en realidad aquellas empresas que inicialmente no quisieron arriesgar su capital fueron las que dañaron y atrasaron tecnológicamente a los Estados Unidos. Lofti Zadeh - el creador de la lógica difusa- estima que con todos estos avances, los Estados Unidos están 5 o 6 años detrás de los japoneses en cuanto a tecnología y además la distancia sigue creciendo día con día.

En el presente trabajo se introducen los conceptos básicos de la lógica y del control difuso, se estructura la teoría y se proporcionan una serie de descubrimientos interesantes a medida que se avanci a través de la misma. Se ha hecho un verdadero esfuerzo para tratar de presentar - por primera vez - la teoría difusa de una manera sencilla y eficiente. Por lo tanto si este trabajo consigue ayudar al elector a descubrir la teoría y la práctica de los sistemas de control con lógica difusa, habra tenido éxito.

El trabajo se encuentra dividido en tres capítulos. El primero de ellos contiene los principios básicos necesarios para poder comprender de una manera sencilla la lógica difusa además de incluir las características de la misma.

El segundo capítulo puede ser considerado como la parte fundamental de este trabajo puesto que proporciona una metodología - sencilla y confiable - para el diseño de controladores difusos. En este capítulo se destaca la deducción de las reglas de control "reglas fuzzy"- o también llamadas " reglas de sentido común", que representan el paradigma básico de la lógica difusa; lo cual viene a justificar el título dado a este trabajo de tesis.

Finalmente en el capítulo 3 se describen en forma práctica los módulos principales de la lógica difusa, así como se presentan ARQUITECTURAS HARDWARE fundamentales en el diseño e instrumentación de controladores difusos.

Cabe señalar que este trabajo presupone una razonable familiaridad con circuitos analógicos y digitales, por lo que el hardware presentado en las arquitecturas del capítulo 3 serán tratadas en forma superficial debido principalmente a que estas estructuras electrónicas para esta aplicación solo son realizables a nivel de microelectrónica.

Por otro lado, el contenido de este trabajo aquí presentado ha sido desarrollado dentro de un grupo interdisciplinario formado por prestigiados investigadores de diferentes

*universidades como son : el M. en I. David Gonzalez Maxínez, del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey ; el M en I. Angel Ramón Zapata Ferrer, del Instituto de Psiquiatría; el Dr. en ingeniería Adriano de Luca Peniche, de la Universidad Autónoma Metropolitana y un servidor de la Universidad Nacional Autónoma de México.*

*Andrés Ferreyra R.*

**SISTEMAS  
FUZZY  
LOGIC****1.1. INTRODUCCION**

*La lógica difusa es fascinante, su destreza revoluciona completamente la historia como una innovación importante en lógica; es una nueva teoría que estimula al desarrollo de máquinas inteligentes más potentes. Si bien los sistemas expertos y la inteligencia artificial fueron en su momento tecnologías de punta, hoy en día los sistemas con lógica difusa tienden a convertirse muy rápidamente en una tecnología de vanguardia de las más exitosas, sobre todo para desarrollar una gran variedad de sistemas de control sofisticados para aplicaciones comerciales e industriales. Por ahora este esfuerzo tiene comienzo en Japón y para remarcar esto solo basta tomar parte de un artículo del reportaje realizado recientemente por la Inteligencia de Mercados corp's (Market Intelligence Research Corp's Mountain view, California) en donde se escribe: "En 1991 Japón capturo casi un 80% del mercado mundial con los sistemas de lógica difusa, calculando junto con los sistemas rentados casi 150 millones de dólares que se incrementaron a 350 millones en 1992"<sup>3</sup>; y creó en lo particular que estos ingresos se irán incrementando hasta hacer de Japón una nación que será muy superior en un futuro no muy lejano.*

*Los beneficios de la lógica difusa son convincentes y son elogiados por la comunidad fuzzy ya que reclaman -de los métodos convencionales- lo que por razón de*

---

<sup>3</sup> Daniel G. Schwartz and George J. Klir: Fuzzy Logic Flowers in Japan, IEEE SPECTRUM JULY 1992 P. 32-35.

dominio les pertenece, como: desarrollo o progresos en poco tiempo, fácil mantenimiento, mejor rendimiento, hardware menos costos, y más robusticidad. Aunque este no es el problema a resolver en todos los casos, la lógica difusa con frecuencia es útil para encargarse del control o fabricación de decisiones en problemas que no son fácilmente definidos por modelos matemáticos prácticos. En la lógica difusa, la relación entre los conceptos imprecisos son evaluados en lugar de ecuaciones matemáticas, es decir, es una lógica que permite describir con palabra y precisión nuestros sistemas de control en lugar de tener que combatir con modelos matemáticos complejos.

*Pero la lógica difusa no esta limitada a problemas de control. En realidad, la lógica difusa originalmente fué pensada para ser más aplicable a problemas de "ciencias delicadas", tal como psicología y biología. Algunas tareas de fabricación de decisiones pueden ser buenos candidatos para la lógica difusa, tal como invertir en la producción real, diseñando circuitos en mascarillas (layout), o traductores de (o entre) lenguajes.*

### 1.2 EL CONCEPTO DE FUZZY

Aunque actualmente la lógica difusa tiende a mantenerse firme tranquilamente por más de 20 años. Sino hubiera sido por el rotundo éxito logrado por la lógica difusa en el sistema de control automatizado del tren subterráneo en Sendai, Japón; hoy en día seguiría siendo ignorada. El comienzo de la lógica difusa esta muy relacionado con Lofti Zadeh - uno de los más grandes investigadores de las ultimas décadas - ya que en 1965 escribe un papel original definiendo formalmente la teoría fuzzy set de la cual surge la lógica difusa<sup>6</sup>. Zadeh, extiende la clásica teoría set para resolver problemas que son a veces generados por la dura y rígida clasificación "Todo o nada" de la lógica booleana. Tradicionalmente una expresión lógica puede caer solo en uno de los dos extremos: completamente verdadero o completamente falso. Sin embargo en el mundo creado por Zadeh, los valores alcanzan de 0 a 100% de verdad o falsedad. En otras palabras, la lógica difusa se apoya en la teoría de que todas las afirmaciones, objetos o cosas se reconocen con grados de verdad, es decir, tienen algunos grados de verdad entre 0 y 1, inclusive. Temperatura, distancia, belleza, simpatía, inexperiencia, gusto - todos se pueden evaluar con grados de verdad y en una escala móvil que con frecuencia hace lo imposible para distinguir miembros de una clase de no miembros.

---

<sup>6</sup> Daniel McNeill and Paul Freiberger: Fuzzy Logic 1<sup>o</sup> ed. p. 14-44

Para incorporar estos conceptos "grados de verdad", la lógica difusa extiende la lógica tradicional en dos caminos: primero, los sets (grupos) pueden ser definidos cualitativamente (usando términos lingüísticos como "alto", "caliente", "activo", y así sucesivamente), y a los elementos de estos sets se les asignan grados de miembros. Por ejemplo, un rango de temperatura, puede ser representado por el set formado por los términos: "muy baja", "baja", "media", "alta", y "muy alta"; cada una es descrita por un miembro funcional como se muestra en la figura 1.

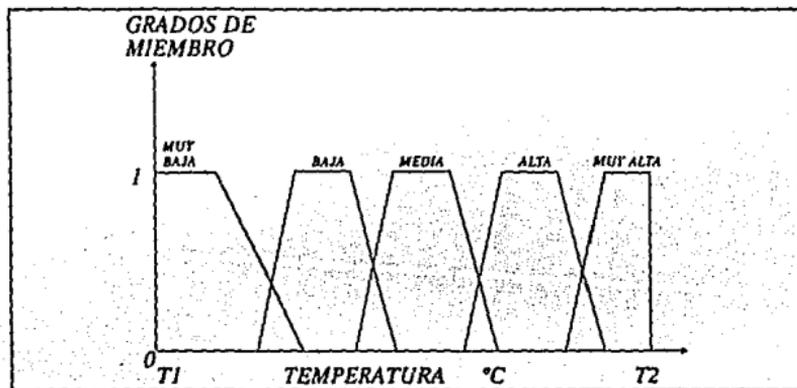


Figura 1. Cinco estados Fuzzy de una variable de temperatura  $T$  dentro de un rango ( $T_1$ ,  $T_2$ ), son elementos de un set Fuzzy particular. Cada estado es descrito por una palabra apropiada - "muy baja", "baja", "media", "alta", y "muy alta"; y de este modo con miembros grandes funcionales - curvas que relacionan las palabras con valores de temperatura.

En segundo lugar, alguna, acción o respuesta (salida) resultante de una declaración es verdadera o parcialmente verdadera cumpliendo, una fuerte reflexión del grado para el cual la declaración es verdadera. Como un ejemplo rápido, imagine un motor de un ventilador tradicional cuya velocidad es una función de la temperatura de entrada, como

muestra la tabla 1<sup>7</sup>. La corriente suministrada al motor del ventilador es regulada por sets de temperatura: frío, fresco, caluroso y caliente. Si la temperatura es caluroso la corriente es 50 y la velocidad del ventilador es media. El problema es que cuando la temperatura de entrada rebasa los límites especificados por las temperaturas: fría y caliente, la corriente de impulso y la velocidad del ventilador cambian bruscamente. Sin embargo en la lógica difusa, cuando la temperatura se mueve de CALUROSO a FRESCO, la velocidad del ventilador cambia gradualmente. Por lo tanto, los sistemas con lógica difusa producen salidas suaves y continuas con las cuales se evitan los cambios bruscos, a pesar de que las entradas crucen los límites establecidos.

TEMPERATURA	VELOCIDAD DEL VENTILADOR	ACCION RELATIVA "CORRIENTE"
FRIO	OFF	0
FRESCO	LENTO	5
CALUROSO	MEDIA	50
CALIENTE	RAPIDA	100

Tabla 1. Control de velocidad del ventilador

La lógica difusa puede ser considerada como una teoría cuyas bases son los principios formales del razonamiento aproximado y exacto como límite. Es una teoría que está hecha para jugar un papel importante en nuestra comprensión del conocimiento humano y en nuestra habilidad para construir máquinas que simulen decisiones humanas formadas en un medio ambiente incierto e impreciso. La lógica difusa refleja lo que la gente piensa. En parte, modela nuestro sentido de la palabra, nuestra formación de decisiones, nuestro reconocimiento de vista y sonido. Descubre un ángulo de intuición. Puede también reflejar funciones cerebrales actuales, tales como detectar color y distinguir fonemas. Como un resultado nos guía hacia el diseño de máquinas modernas más humanas.

<sup>7</sup> Greg Viot: Fuzzy logic; concepts to constructs, AI EXPERT NOVEMBER 1993 P. 26-27

### 1.3. LAS CARACTERÍSTICAS DE FUZZY

*La lógica difusa es una extensión de multiniveles lógicos, en donde, todo pero completamente todo inclusive la verdad, es una cuestión de grado. Su estupendo poder expresivo deriva del hecho de que no solo contiene como caso especial los valores clásicos (0 y 1), sino que además hace uso de la teoría y probabilidad lógica sobre todo al momento de tomar decisiones. Fundamentos como estos hacen posible establecer las siguientes características importantes que distinguen a la lógica difusa de los sistemas de lógica tradicional:*

- 1.- En lógica difusa, el razonamiento exacto es visto como un límite del razonamiento aproximado.*
- 2.- En lógica difusa, todo completamente todo es manejado como grados de verdad.*
- 3.- En lógica difusa, los conocimientos son interpretados como una colección de límites elásticos en una colección de variables.*
- 4.- En un sistema lógico de dos valores, una proposición P o es falsa o es verdadera. En un sistema lógico difuso, una proposición puede ser verdadera o falsa o puede tener un valor intermedio.*
- 5.- La lógica difusa proporciona un método para representar el significado de una división lógica de dos especialidades mutuamente exclusivas (ó grupos contradictorios es decir, de un tipo SI-O-NO, MAS-O-MENOS, O FALSO-O-VERDADERO) como un predicado Fuzzy-modificadores ejemplificados por "no", "muy", "mas o menos", "extremadamente", "ligeramente", "muchos", "pocos" y así sucesivamente. Estos en turno, conducen a un sistema para calcular con variables lingüísticas.*
- 6.- La lógica difusa proporciona las herramientas necesarias para el tratamiento de la INEXACTITUD, un concepto asociado al conocimiento humano.*
- 7.- La lógica difusa permite manejar conceptos vagos como "alto", "sucio", o "edad".*

## 1.4 ¿CUANDO ES APROPIADO USAR LA LOGICA DIFUSA?

*En la mayoría de las ciencias, el razonamiento es de naturaleza incierta e imprecisa. Los conocimientos almacenados son inexactos, incompletos, o totalmente no son de confianza. Es en estas ciencias en donde las computadoras, controladores lógicos programables (PLC'S) y otros tipos de productos de control automatizados, son débiles para lograr los objetivos planteados; por lo tanto, es aquí en donde la lógica difusa es sorprendentemente buena.*

*Aunque la lógica difusa es muy potente, no puede ser aplicada para resolver todo tipo de problemas, y es necesario definir aquellos casos en los cuales es posible su aplicación, por lo tanto, la lógica difusa es aplicable:*

- 1.- *Cuando una o más de las variables son continuas.*

*Un ejemplo puede ser un sistema de frenado seguro para el automóvil<sup>4</sup>, puesto que en el método de control para un sistema de esta naturaleza pueden ser incluidas las variables de control que tienen un relación entre si para una acción determinada, es decir, variables continuas tales como: la velocidad del carro, la presión de frenado, la temperatura de frenado, y el ángulo del movimiento lateral del carro relativo para el movimiento delantero. En donde el rango de valores para estas variables esta sujeto a la interpretación del sistema diseñado.*

- 2.- *Cuando la planta es conocida, es decir, se cuenta con la experiencia suficiente para poder controlarla, aún cuando no se conozca la interpretación matemática de esta, ni sus variables de estado, ni su función de transferencia.*

*Un ejemplo claro es el controlar un automóvil, pues todos los conductores tienen la noción suficiente para conducir adecuadamente y de cierta manera conocen su función de transferencia, pues pueden deducir cuando hay que realizar el cambio de velocidades, que ángulo puede soportar este sin voltearse, etc.*

---

<sup>4</sup> Earl Cox: Fuzzy Fundamentals, IEEE SPECTRUM OCTOBER 1992 P. 58

- 3.- *En algunos casos, cuando el sistema no es lineal, pero es posible controlarlo mediante la experiencia humana.  
  
Por ejemplo, en el caso de un helicóptero, este es muy difícil de modelar, además de que su función de transferencia tampoco es lineal y es variante en el tiempo. Por lo tanto, para poder desarrollar un controlador para el piloto automático de este artefacto, es necesario recurrir a las experiencias y habilidades propias de los pilotos.*
- 4.- *En sistemas donde la vaguedad es común: por ejemplo, un sistema económico, psicológico, etc.*
- 5.- *Cuando se conocen todas las posibles variables que pueden intervenir en la salida de la planta, ya que si alguna de estas se desconoce y no es tomada en consideración, además de influir en gran parte en la salida, el control no sabrá que hacer.*

### 1.5 PRINCIPIOS BASICOS FUZZY

#### 1.5.1 La lógica difusa en términos de sets.

La teoría fuzzy set<sup>9</sup>, es considerada como el centro de la teoría de la lógica difusa, ya que Intenta un pacto con las intuiciones y experiencias del ser humano, y permite expresar con palabras las reglas de operación y control del sistema. El concepto de fuzzy sets suena difícil pero en realidad su comprensión es muy fácil.

Para poder comprender este concepto es necesario tener presente que la lógica clásica es aquella que solo maneja dos valores lógicos para determinar si una variable es completamente verdadera (1 lógico) ó completamente falsa (0 lógico). Por lo tanto, esta lógica no permite determinar una verdad o falsedad parcial, ya que la variable o es falsa o es verdadera.

---

<sup>9</sup> En la teoría fuzzy set, un set es normalmente definido como una colección de elementos u objetos que pueden ser finito, contable o sobre contable.

Por ejemplo una variable como MUJERES ALTAS puede se representada con lógica clásica como<sup>10</sup>:

$$A \text{ MUJERES ALTAS} = ( X | 1.60 \text{ M} < X < 2.20 \text{ M} )$$

En donde:

- A MUJERES ALTAS → Representa al set clásico de MUJERES ALTAS  
 X → Representa a una mujer x que pertenece al set.  
 1.60m < x < 220m → Representa al conjunto de elementos que conforman dicho SET.

2. Esto lo podemos representar por medio de una gráfica como se muestra en la figura

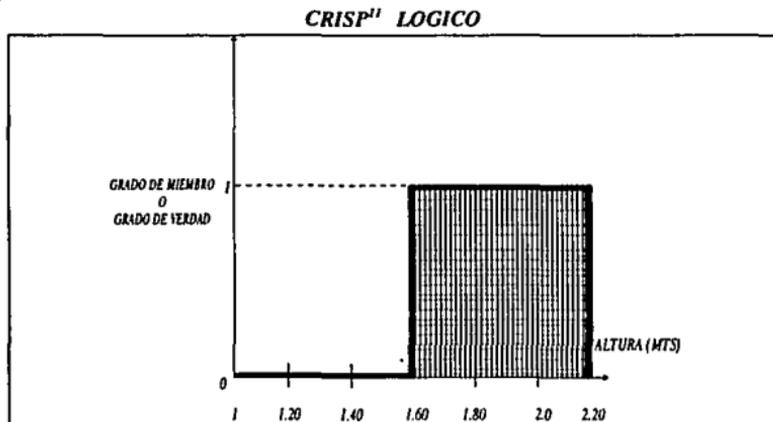


Figura 2. Lógica tradicional o clásica.- cada mujer es o no un miembro del set mujeres altas, y una simple fracción en centímetros puede ser la diferencia.

<sup>10</sup> H.J. Zimmerman: Fuzzy Set Teory - and its applications second, revised edition p. 11-21

<sup>11</sup> CRISP significa una división de dos especialidades mutuamente exclusivos o grupos contradictorios, es decir, de un tipo SI-O-NO ó algo como MAS-O-MENOS

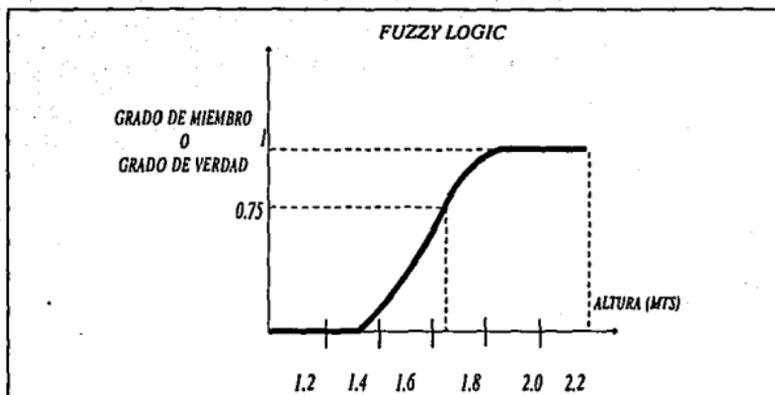
Ahora bien, podemos preguntarnos si Mary cuya estatura es de 1.7 mts. pertenece o no al set de MUJERES ALTAS (Parte sombreada de la fig. 2). Una lógica sería preguntarnos si la declaración "Mary es una mujer alta" es verdadera o falsa, y como solo existen 2 niveles lógicos (0 y 1), solo podemos seleccionar uno u otro.

Si observamos la figura 2, la declaración "Mary es una mujer alta" es totalmente verdadera, por lo tanto, pertenece al set de mujeres altas puesto que su estatura esta dentro del intervalo especificado para este set; pero si ella fuera 20 cm. más baja, esta declaración sería totalmente falsa.

Si ahora suponemos que la estatura de Mary es de 1.60 mts. Analizando la figura 2, observamos que no es posible definir si la declaración "Mary es una mujer alta" es verdadera o si es falsa; por lo tanto, nos encontramos con una clase de indeterminación. Esta indeterminación es la desventaja principal que presenta la lógica clásica y es ocasionada debido a que no permite determinar miembros parciales. La teoría fuzzy set es por ello desarrollada para poder expresar conceptos inexactos como este, que en ocasiones nosotros damos con subjetividad. Esta subjetividad tiene implicaciones profundas para modelar sistemas continuos y además es el corazón del poder y flexibilidad de la lógica difusa.

La lógica difusa basada en la teoría fuzzy set permite eliminar estas indeterminaciones permitiendo set de miembros parciales, es decir, permite una transición gradual entre ser completamente miembro de un set y no completamente miembro del set.

Podemos retomar con esto el ejemplo anterior para decir que el concepto de MUJERES ALTAS - dentro de la lógica clásica no esta bien definido, ya que es ir desde bajo hasta alto; con esto la sensación de MUJERES ALTAS se vuelve gradualmente fuerte y luego gradualmente débil. Por lo tanto si los grados de verdad (0 y 1) son designados nuevamente para representar esta sensibilidad, el resultado es una curva como la mostrada en la figura 3.



**FIGURA 3. Lógica Difusa.**- Permite un set parcial de miembros que es caracterizado por una transición gradual de estatura baja a estatura alta.

La lógica difusa permite la afirmación "Mary es alta" para tener un rango de veracidad, que depende de las Mary's altas. Por ejemplo, si Mary mide 1 metro, la afirmación de que ella es alta es completamente falsa; pero si ella mide 2.2 mts, la afirmación es completamente verdadera. Si consideramos ahora que ella mide 1.65 mts, la afirmación puede ser 75% verdadera.

Trabajando con estas premisas (resultados) el camino de verdadero y falso puede ser gradual y además implícito, ya que puede presentarse simultáneamente la verdad parcial y la falsedad parcial.

Para aplicar la teoría fuzzy set, debemos indicar el grado al que una variable es miembro de un set. Nosotros hacemos esto con la variable "grado de miembro" a menudo representada por la letra griega  $\mu$ . Por lo tanto, la expresión:<sup>12</sup>

$$\mu_A(X) \rightarrow [0,1]$$

Quiere decir: el grado del miembro del elemento  $X$  en el fuzzy set  $A$  con rango desde 0 a 1. Cuando es aplicado a la lógica difusa,  $\mu$  es llamada el "valor verdadero" y representa el grado al que una afirmación es verdadera (ver figura 4). El rango  $0 \leq \mu \leq 1$ , con 0 indicando miembro nulo (o completamente falso) y 1 indicando miembro completo (completamente verdadero), es consistente con las notaciones usadas en los dos niveles lógicos tradicionales.<sup>13</sup>

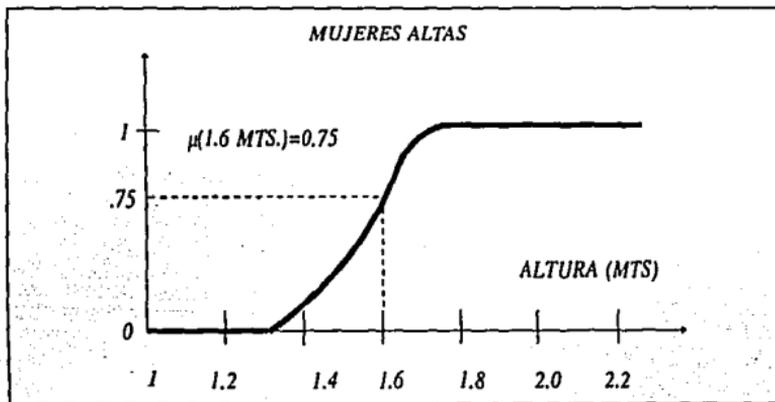


Figura 4. El grado al que un elemento es un miembro de un set fuzzy, es denotado por  $\mu$ , con rango de 0 (indicando miembro nulo) a 1 (indicando miembro completo). En este ejemplo, una mujer de 1.6 mts. de altura tiene un grado de miembro (grado de verdad) en el Set de MUJERES ALTAS de 0.75.

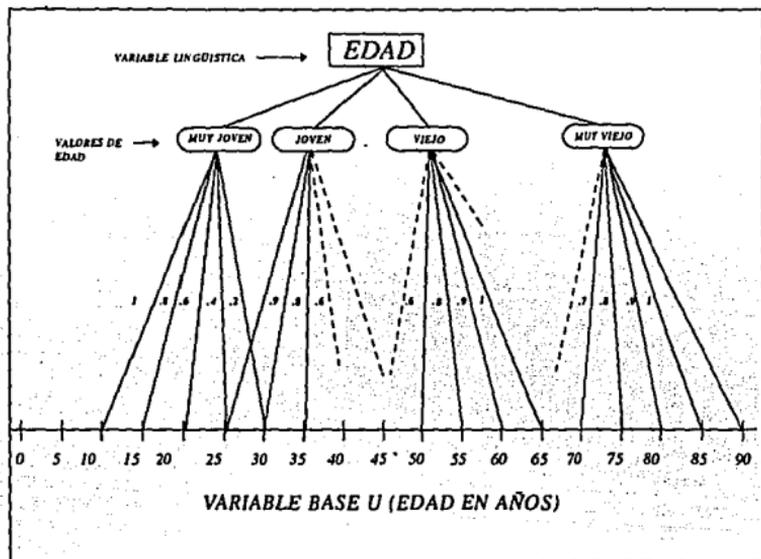
<sup>12</sup> George J. Klir and Tina A. Folger: FUZZY SETS, UNCERTAINTY AND INFORMATION 1988 p. 10-27

<sup>13</sup> Zimmerman: Fuzzy Set theory and its applications secon, revised edition p. 11-21

## 1.5.2 Variables lingüísticas y su aplicación al control fuzzy

Un concepto básico en la lógica difusa que juega un papel principal en muchas de sus aplicaciones, especialmente en el área de control fuzzy, es el de la variable lingüística.

Una variable lingüística, como su nombre lo indica, es una variable cuyos valores no son números sino palabras o sentencias en un lenguaje natural o sintético. Por ejemplo, "EDAD" es una variable lingüística y sus valores pueden ser "MUY JOVEN", "JOVEN", "VIEJO", y "MUY VIEJO". Esta variable puede ser representada utilizando la variable base  $U^4$  que representa la edad en años de vida ( $U = [0, 100]$ ), de la forma mostrada en la figura 5.



<sup>15</sup> Figura 5.- Representación de la variable lingüística EDAD.

<sup>14</sup> La letra  $U$  es utilizada para denotar a un universo de trabajo que es definido como una colección arbitraria de objetos que pueden ser discretos o continuos.

<sup>15</sup> H.J. Zimmerman: Fuzzy Sets theory and its applications second, revised edition p. 132-133

La representación de la variable "edad" en la figura 5 muestra dos cosas muy importantes que hay que mencionar:

- 1.- Las líneas punteadas entre los valores de EDAD indican que los rangos de estas variables con respecto a la variable base, están completamente abiertos para ser especificados según el criterio o razonamiento del diseñador.
- 2.- El porcentaje de probabilidad de que un valor X de la variable base pertenezca a un valor de edad, es representado por el número que se incluye en cada una de las líneas continuas. Por ejemplo, la probabilidad de que un valor de la variable base tal como 25 pertenezca al valor de edad "MUY JOVEN" es de .4, pero la probabilidad de que este mismo valor pertenezca al valor de edad "JOVEN" es de .9. Por lo tanto, sea cual fuere el valor de la variable base; el controlador basandose en los rangos establecidos para cada valor de edad, es capaz de determinar a que valor de edad pertenece, para poderlo utilizar posteriormente.

En general, los valores de una variable lingüística pueden ser generados de un término primario (por ejemplo "JOVEN") su antónimo ("VIEJO"), una colección de modificaciones ("NO", "MUY", "MAS" O "MENOS", "IGUAL", "NO MUY", etc.), y los conectores "Y" y "O". Por ejemplo, un valor de "edad" puede ser "no muy joven" y "no muy viejo". Cada valor puede ser generado por un contexto-libre gramático. Además, cada valor de una variable lingüística representa una posibilidad de distribución como muestra la figura 6.

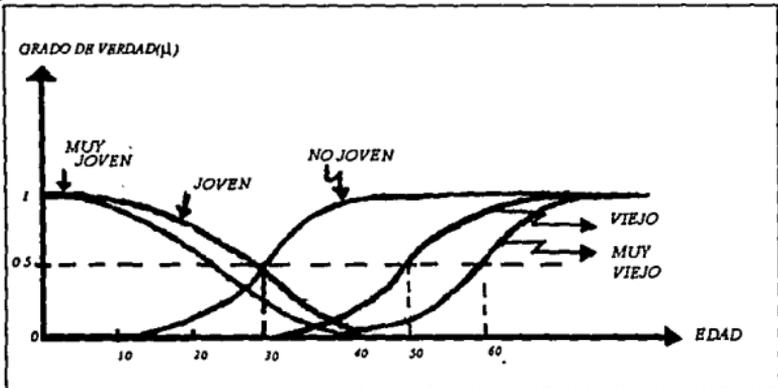


Figura 6. Valores lingüísticos de edad.

*Estas posibilidades de distribución pueden ser calculadas de la probabilidad de distribución (mostrada en la figura 4) de los términos primario y su antónimo a través del uso del atributo de técnicas gramaticales.*

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

---

### 2.1. INTRODUCCION

*El control automático de equipos para el hogar y la industria en general, resulta ser particularmente útil para poder realizar tareas que por naturaleza son peligrosas, repetitivas, tediosas, simples ó complejas. Por ejemplo, en la industria con frecuencia se utilizan máquinas para cargar, descargar, soldar, cortar, empacar, etc; con el objeto de conseguir mayor precisión, seguridad, economía y productividad. Máquinas que pueden llegar a ser más potentes, precisas, e inteligentes; si logramos integrarles controladores, que les permitan realizar tareas de la misma manera en que las realizan los seres humanos. ¡ Esto es posible solo con la lógica difusa !.*

*A pesar de que la lógica difusa fue creada hace 29 años, recientemente a renacido como una tecnología fuerte para el control industrial. Basta con observar los productos de consumo basados en la lógica difusa -cámaras de video, lavadoras, hornos de microondas, televisiones a color- que han llamado la atención mundial, para reconocer el tremendo potencial que ofrece para controlar una gran variedad de dispositivos y sistemas complejos. Pero ahora ya como una tecnología útil y rentable, puede ser en seguida aplicada a una gran diversidad de aplicaciones de control que incluyen a los sistemas no-lineales y otros que no son fácilmente definibles por modelos matemáticos prácticos.*

## 2.2. CONTROL FUZZY EN PERSPECTIVA

### 2.2.1. Controladores Convencionales

*Apoyándonos en la forma en que evalúan los resultados y en la manera en la cual son modelados, podemos clasificar y definir a los controladores convencionales de la siguiente manera:*

**2.2.1.1. Controladores Digitales.**- Son sistemas secuenciales que proporcionan pulsos adecuados en tiempos adecuados, para realizar operaciones lógicas sencillas, que en conjunto con otras realizan operaciones más complejas. Son muy sensibles, fáciles de diseñar, baratos para producir y sobre todo muy precisos. En su metodología de diseño, se evalúan las variables y los resultados empleando únicamente elementos discretos como 1's y 0's -esto en una lógica positiva- para representar verdad y falsedad respectivamente, por lo tanto, la lógica en la que se basan no permite determinar términos parciales o intermedios entre estos dos valores; esta es su principal desventaja. Es por esto que en ocasiones son incapaces de definir el estado de una variable de control, por lo que éste tiene que ser dado en una forma subjetiva por el diseñador (ver capítulo 1, sección 1.5.1.).

**2.2.1.2. Controladores PID (Proporcional-Integral-Diferencial).**-Son controladores que proporcionan un acercamiento clásico para controlar sistemas dinámicos. La idea básica en estos controladores es, comparar un valor de salida deseado con un valor de salida actual para poder calcular una señal de control eficiente; como se muestra en la figura 7. Por lo tanto, pueden proporcionar características de sistemas de respuesta rápida, reduciendo oscilaciones.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

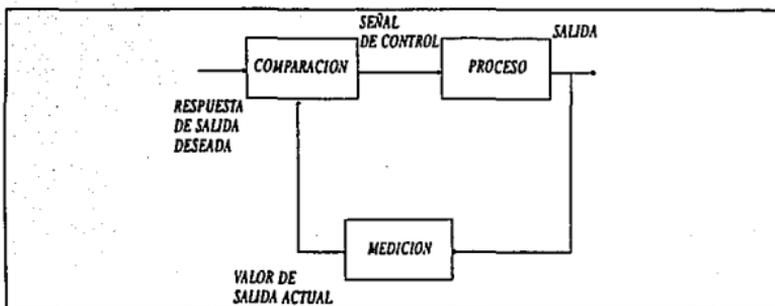


Figura 7. Controlador PID.- La idea básica es la de mantener una relación prescrita de una variable del sistema con otra, comparando funciones de estas variables y usando las diferencias como medio de control.

Estos controladores utilizan modelos matemáticos, son muy exactos y teóricamente muy precisos. En este tipo de controlador el sistema o proceso es modelado analíticamente por ecuaciones diferenciales, establecidas para ajustar los parámetros del sistema para cada tipo de comportamiento requerido. Ilustraremos este tipo de control con el siguiente ejemplo:

El equilibrar un palo de escoba en la palma de la mano es semejante al problema de controlar la posición de un proyectil durante las etapas iniciales de lanzamiento. Este es el problema clásico y fascinante del péndulo invertido montado en un carrito, como se muestra en la figura 8.

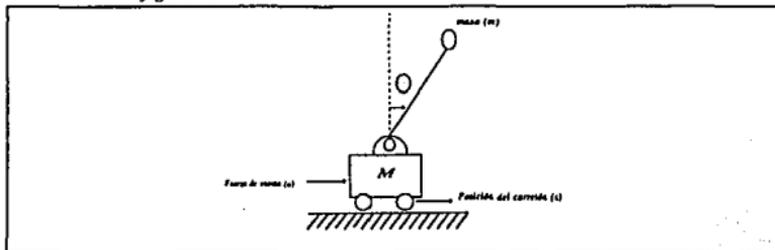


Figura 8. El problema del péndulo invertido.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

Como se muestra en la figura, el péndulo está sujeto al carrito de tal forma que el movimiento del carrito en la dirección X afecte al ángulo  $\theta$  del péndulo con respecto al eje vertical. El objetivo es mover el carrito de tal forma que la masa  $m$  esté siempre en posición vertical.

Cuando es estudiado como un problema clásico de control, el sistema del péndulo invertido es descrito por una serie de ecuaciones diferenciales que relacionan el ángulo  $\theta$ , la velocidad angular  $\dot{\theta}$ , y la posición  $x$  del carrito.

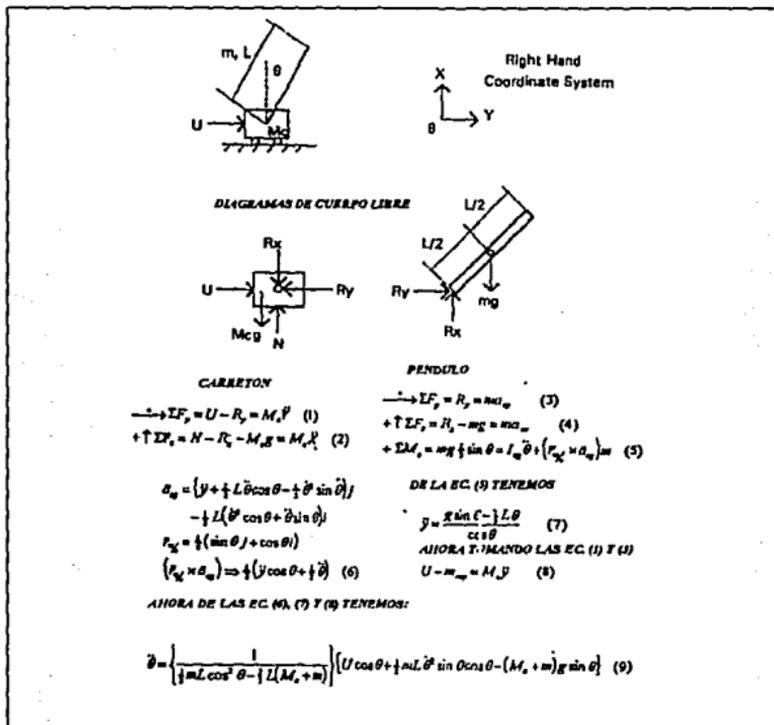


Figura 9.- Ecuaciones de movimiento para el problema del péndulo.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

para una fuerza de entrada  $U$ . La figura 9 ilustra la derivación de las ecuaciones de movimiento para el péndulo invertido.

Un sistema como este, esta sujeto a un medio cambiante y a la ignorancia de los valores exactos de sus parámetros. Por lo tanto, es suficiente con observar la figura 9 para poder deducir que la realización de estos controladores depende con exceso de los parámetros de operación del sistema — lo que lo hace bastante sensible a las señales de ruido — y una vez que estos parámetros cambian, se necesita una cantidad de cálculos significativos para poder ajustar este tipo de controladores; esta es su principal desventaja.

### 2.2.2.- Controladores con lógica difusa

Debido a las desventajas de los controladores convencionales, son sugeridos los controladores de lógica difusa como una alternativa prometedora aproximada para controlar procesos, especialmente esos que son demasiado complejos — como es el caso del péndulo invertido — para ser analizados por técnicas convencionales.

Los controladores con lógica difusa, intentan modelar las experiencias de los seres humanos, así como su comportamiento a la hora de tomar decisiones. Están fundamentados en las experiencias adquiridas por el operador del proceso con las cuales se puede controlar completamente este, sin el conocimiento de su dinámica fundamental. Para fortalecer esta idea, retomaremos un problema que hasta este momento ya no es desconocido; el péndulo invertido. Ahora veámoslo como un juego, un juego en el cual los protagonistas somos nosotros; un simple juego cuya idea es mantener en equilibrio a un trozo de madera colocado en la palma de la mano, como se muestra en la figura 10.

Cuando principie el juego, nos encontraremos con muchos problemas, ya que resultara imposible coordinar al mismo tiempo los movimientos de la mano con los movimientos indeterminados y complejos — por naturaleza — del trozo de madera. En muchas ocasiones, cuando la madera se incline ya sea hacia la derecha o hacia la izquierda, nos resultara imposible determinar la velocidad a la

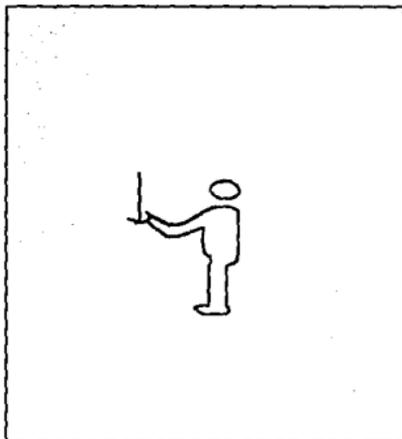


Figura 10.- El maestro acrobatico

*cual tenemos que mover la mano hacia un lado u otro para alcanzar el equilibrio deseado. Habrá ocasiones en las cuales la velocidad y el movimiento de la mano no serán las adecuadas, provocando con esto otro movimiento inmediato hacia el lado contrario tal vez más rápido o tal vez más despacio. Habrá ocasiones en las cuales, la madera cambie de dirección inclinándose hacia delante o hacia atrás provocando con esto un cambio de dirección y de velocidad en el desplazamiento de la mano. Al principio la madera caera una, otra y otra vez; pero con el paso del tiempo y con la práctica, iremos adquiriendo experiencias y en nuestra mente se irán acumulando estrategias de control que nos ayudaran a mantener el equilibrio del trozo de madera de una forma mas prolongada. Experiencias y estrategias que nos llevarán a ser verdaderos expertos en juegos como este. Estrategias de control que podrán ser formuladas como las siguientes:*

- 1.- *Si el trozo de madera se mueve hacia la izquierda lentamente, moveremos la mano hacia la izquierda también lentamente.*
- 2.- *Si la madera se mueve hacia la izquierda rápidamente, moveremos la mano hacia la izquierda también rápidamente.*

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

- 3.- Si la madera se encuentra en posición vertical y estática entonces la mano no tendrá movimiento alguno.
- 4.- Si el trozo de madera se mueve hacia la derecha lentamente, moveremos la mano hacia ese mismo lado también lentamente.
- 5.- Si la madera se inclina hacia la derecha rápidamente, tendremos que desplazar la mano hacia la derecha rápidamente.

.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Y así sucesivamente

Lo más importante de todo esto es que, todas estas estrategias que el operador humano aprende a través de su experiencia para poder controlar de una forma más efectiva los procesos complejos; pueden ser con frecuencia expresadas como un conjunto de reglas de la forma **CONDICION-ACCION** (SI — ENTONCES, llamadas reglas fuzzy), que describen el comportamiento del proceso usando términos lingüísticos. Tales reglas tienen la forma siguiente:

- Si la madera es inclinada a la izquierda ENTONCES mueve tú mano a la izquierda.
- Si la madera es inclinada a la derecha ENTONCES mueve tú mano a la derecha.
- Si la madera es inclinada lentamente ENTONCES mueve tú mano lentamente.
- Si la madera es inclinada rápidamente ENTONCES mueve tú mano rápidamente.

.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Y así sucesivamente.

Conjuntos de reglas como estas hacen posible la aplicación del modelado fuzzy a procesos complejos que no pueden ser modelados por las técnicas convencionales. Esta producción de reglas es el paradigma básico del control fuzzy; en pocas palabras, ¡ Esto es la lógica difusa !

## 2.3.- METODOLOGIA DE DISEÑO FUZZY

Aunque el ejemplo previo de lógica difusa ilustra como son escritos los sistemas fuzzy, esta descripción proporciona pocas sugerencias como para poder especificar y desarrollar un diseño completo. Por lo tanto, es importante establecer una buena metodología de diseño que nos guíe y de confianza en el diseño de estos sistemas ya que son totalmente nuevos.

Los investigadores que se han dedicado al estudio e implementación de sistemas fuzzy durante todos estos años, han logrado establecer diferentes metodologías de diseño que pueden ser aplicadas con éxito a estos sistemas. En la tabla 2 se presentan algunas metodologías de las más comunes.

<b>SUCESION DE DISEÑO</b> (H.J. Zimmermann 1985) <sup>16</sup>	
1.- Definición de entradas y variables de control	
2.- Definición de reglas y fuzzy sets	
3.- Desarrollo del mecanismo de inferencia	
4.- Selección de la estrategia de defuzzificación	
<b>PROCESO FUZZY</b> (Greg Viot) <sup>17</sup>	<b>CONFIGURACION BASICA DEL MODELADO FUZZY</b> (Li-xin wang) <sup>18</sup>
1.- Fuzziificación de entradas	1.- Interface de fuzziificación
2.- Evaluación de reglas	2.- Reglas basadas en fuzzy
3.- Defuzziificación de salidas	3.- Máquina de inferencia Fuzzy
	4.- Interface de defuzziificación

Tabla 2.- Metodología de diseño más comunes para el desarrollo de sistemas fuzzy.

Evidentemente la implementación de controladores con lógica difusa parece no ser fácil, ya que como se muestra en la tabla 2, prácticamente no existe una teoría que indique los pasos a seguir para el diseño de sistemas de control, ya que cada quien diseña como quiere. Sin embargo, mediante un estudio detallado y una comparación rigurosa de todas

<sup>16</sup> H.J Zimmermann: Fuzzy sets theory-and its applications second, revised edition p. 204

<sup>17</sup> Greg Viot: Fuzzy logic; concepts to constructs, AI EXPERT NOVEMBER 1993 p. 26-27  
Greg Viot: Fuzzy logic in C, Dr Dobbers Journal, February 1993 p. 40-49.

<sup>18</sup> Li-xin wang: fuzzy systems are Universal approximators. Signal and image procesing Institute, Div. of electric Engineering-system, University of southern California p. 1163-1169.

## **DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY**

---

*los procedimientos existentes; ha sido posible establecer una metodología de diseño que permita diseñar en orden, ahorrar tiempo, y sobre todo nos evitará problemas en el desarrollo de estos sistemas. Esta metodología es la siguiente:*

- 1.- OBSERVAR AL HUMANO EXPERTO OPERANDO EL PROCESO**
- 2.- CUESTIONAR AL OPERADOR DEL PROCESO**
- 3.- DEFINIR EL MODELO FUNCIONAL Y LAS CARACTERISTICAS DE OPERACION**
- 4.- FUZZIFICACION DE ENTRADAS**
- 5.- PRODUCCION DE REGLAS DE CONTROL**
- 6.- PROCESO DE INFERENCIA**
- 7.- DEFUZZIFICACION DE SALIDAS**

*Con el propósito de ilustrar y definir cada uno de los 7 pasos anteriores, aplicaremos esta metodología en el problema del péndulo invertido descrito en la sección anterior.*

- 1.- OBSERVAR AL HUMANO EXPERTO OPERANDO EL PROCESO.-** *este paso es de suma importancia ya que a través de él obtendremos experiencias del proceso o sistema físico en observación. Además, es importante repetir este paso cuantas veces sea necesario para poder determinar aspectos que pueden ser vitales para nuestro diseño; tales como: la secuencia que utiliza el operador para poder controlar el proceso, estrategias que utiliza el operador en el control, velocidad a la cual se realizan los pasos de control, la estimación de tiempos para la secuencia de control, etc.*

*Cuando se trate de un sistema físico, este punto, nos ayudará a comprender el funcionamiento del sistema.*

- 2.- CUESTIONAR AL OPERADOR DEL PROCESO.-** *Se debe de interrogar al operador del proceso para poder disipar dudas que pudieron haber surgido o quedado en el punto 1. En este punto es importante obtener consejos del operador humano que nos ayuden a realizar de manera más eficiente el control del proceso. Por otra parte, cuando se trate de un sistema físico, será necesario la interrogación de uno o varios expertos en el campo que proporcionen el conocimiento necesario*

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

del sistema a controlar.

*NOTA.- Para el controlador del péndulo invertido, los dos puntos anteriores ya han sido desarrollados en la sección anterior por lo que centraremos la explicación en los puntos posteriores de la metodología.*

- 3.- **DEFINIR EL MODELO FUNCIONAL Y LAS CARACTERISTICAS DE OPERACION.**- El objetivo es, establecer la arquitectura característica del sistema. El sistema es siempre descrito en términos de un modelo, entrada-proceso-salida. Es importante definir que información fluye dentro del sistema, que transformaciones básicas sufren los datos, y que datos son salidas para el sistema.

Como recordaremos, el problema del péndulo invertido consistía en mover un carrito sobre el cual estaba montado el péndulo, de tal forma que afectara al ángulo  $\theta$  formando por este, y el eje vertical. El objetivo es balancear el péndulo; esto es minimizar el valor de  $\theta$ . Esto es mostrando nuevamente en la figura 11.

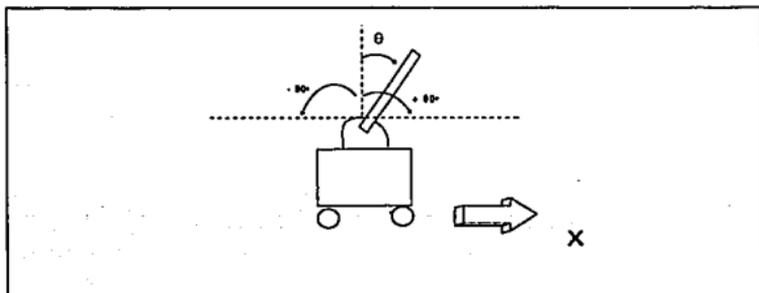


Figura 11.- El ángulo  $\theta$ , formado por un eje vertical imaginario y el péndulo, tiene que ser minimizado para mantener el equilibrio del péndulo. Este ángulo  $\theta$  solo puede variar de  $-90$  a  $+90$  grados.

Primeramente, debemos de imaginar como se puede implementar físicamente el

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

sistema contemplando el proceso y el controlador.

Para poder mantener el equilibrio del péndulo se ve claramente que se tiene que mover el carricón de un lado a otro sobre el eje  $x$  para compensar los movimientos del péndulo. Se puede pensar en un motor que realice este proceso. Ahora bien, si utilizamos un motor tendremos que pensar en una señal de voltaje que controle la velocidad y el sentido de giro de este; señal que tendrá que ser producida por el controlador. Por otra parte, debemos de considerar las variables que influyen en el movimiento, o comportamiento del carricón, como son el ángulo  $\theta$  y su razón de cambio  $\Delta\theta$ . Estaríamos pensando en un sistema como el mostrado en la figura 12.

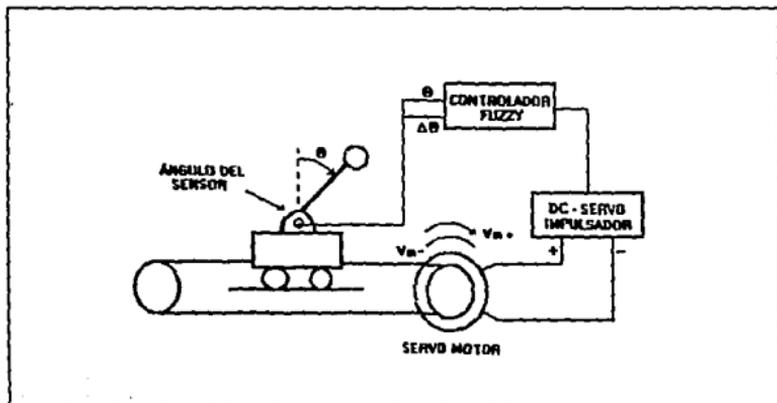


Figura 12.- Sistema de control para el péndulo invertido.- Se muestran las variables que son tomadas como entradas y salidas del controlador;  $\theta$  es el ángulo vertical del péndulo,  $\Delta\theta$  es la velocidad angular y  $V_m$  es el voltaje aplicado al motor. Cuando  $V_m$  es (+) el motor gira en sentido horario y cuando es negativo gira en sentido contrario.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

En forma más general, el sistema podría quedar como se muestra en la figura 13.

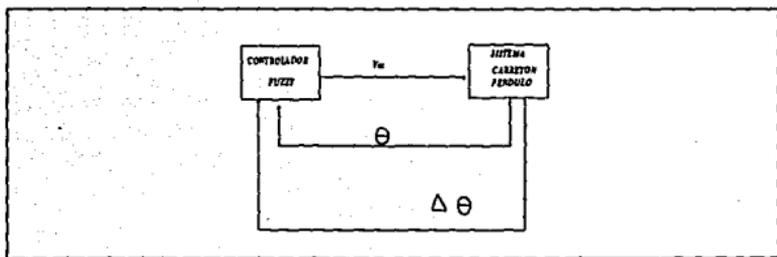


Figura 13.- Sistema de control para el péndulo invertido.

En la figura 12 y 13, observamos que existen dos estados variables fuzzy y una variable de control fuzzy. El primer estado variable fuzzy es el ángulo  $\theta$  que forma el péndulo con el eje vertical. Un ángulo nulo ( $\theta=0$ ) correspondera a la posición vertical. Los ángulos positivos serán para el lado derecho del eje vertical y los ángulos negativos serán para la izquierda. Su intervalo de trabajo sera de  $-90$  a  $+90$  grados.

El segundo estado variable fuzzy, es la velocidad angular  $\Delta\theta$ . En la práctica aproximamos la velocidad angular instantánea  $\Delta\theta$  como la diferencia entre el ángulo presente medido  $\theta$ , y el ángulo previo medido  $\theta_i$ , -1

$$\Delta\theta = \theta - \theta_i - 1$$

Como se trata de una diferencia de ángulos,  $\Delta\theta$ , podrá tener valores positivos y negativos. Por lo tanto su intervalo de trabajo sera de  $-90$  a  $+90^\circ$

La variable de control fuzzy sera el voltaje del motor  $V_m$ . El voltaje sera positivo o negativo y dependera de las especificaciones del motor utilizado. Un voltaje positivo hara que el motor gire en sentido horario y un voltaje, negativo en sentido contrario. Supondremos que si el péndulo cae para la derecha, el voltaje sera positivo para compensar el movimiento; como se muestra en la figura 12. Si el péndulo cae para la izquierda el voltaje sera negativo. Si el péndulo esta equilibrado, es decir, se encuentra en posición vertical; el voltaje  $V_m$  sera nulo. Supondremos que el motor es de 10 volts de C.D., por lo que su intervalo de trabajo sera de  $-10$  volts a  $+10$  v.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

En la tabla 3 se muestran estas tres variables con su intervalo de trabajo correspondiente comunmente llamado universo de discurso.

VARIABLE	INTERVALO DE TRABAJO ó UNIVERSO DE DISCRUSO
$\theta$	$-90^\circ < \theta < 90^\circ$
$\Delta\theta$	$-90^\circ < \Delta\theta < 90^\circ$
$U_m$	$-10, < U_m < 10,$

Tabla 3.- Variables de estado y de control con sus respectivos rangos de trabajo.

- 4.- **FUZZIFICACION DE ENTRADAS.**- El objetivo es definir las fuentes de control. Cada sistema de entradas es asociado con un grupo de clasificaciones cualitativas, llamadas FUZZY SET'S. Estas regiones son hechas con nombres singulares, dentro del dominio de la variable. La fuzzificación es el proceso mediante el cual se determinan ciertos valores para representar las entradas con grados de miembro — o grados de verdad — en cada uno de los fuzzy sets; en otras palabras, es el proceso que nos permite convertir las entradas del sistema en un lenguaje fuzzy para poder ser procesadas posteriormente.

En la tabla 3 se puede observar que los intervalos de trabajo de cada una de las variables contemplaran valores negativos, positivos y nulos; esta podría ser una primera clasificación. Ahora bien, debemos de considerar que las variables negativas o positivas podrán ser combinadas con los modificadores <sup>19</sup> "poco", "medio" y "muy", para tener valores poco positivos, medio positivos, muy positivos, medios negativos, poco negativos y muy negativos. Estos modificadores podrían representar una segunda clasificación. Por lo tanto una clasificación más general sería la mostrada en la figura 14.

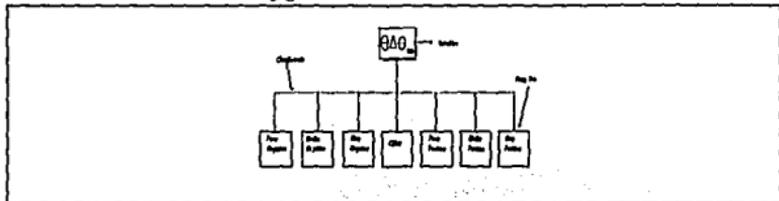


Figura 14.- Clasificación de las variables  $\theta$ ,  $\Delta\theta$  y  $U_m$

<sup>19</sup> Ver sección 1.5.2, cap.1.- A estos modificadores con frecuencia se les da el nombre de cuantificadores.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

En este ejemplo coincidirá que las tres variables tubieran la misma clasificación y esto fué debido a que tienen características similares, pero por lo general para la mayoría de los casos cada variable tiene una clasificación diferente, esto podrá ser apreciado en ejemplos posteriores.

Los fuzzy sets obtenidos con la clasificación tienen que ser graficados para poder desarrollar el proceso de fuzzyficación. El proceso de graficación consiste en representar las variables lingüísticas obtenidas en la clasificación — poco NEGATIVO, MEDIO POSITIVO, CERO, ETC. con curvas que relacionen a estos fuzzy sets con valores de las variables  $\theta, \Delta\theta$  y  $U_m$ . A continuación se presentará un procedimiento para graficar las variables:

a) Disponer a lo largo de uno de los ejes de la gráfica el universo de discurso de la variable a graficar y a lo largo del otro eje los grados de miembro o grados de verdad que serán asignados a los valores de las variables. Estos grados de verdad o de miembros tendrán una escala de 0 a 1, es decir, de 0 a 100 por ciento. Ver figura 15a.

b) Definir el conjunto de elementos —números— que forman los fuzzy sets obtenidos. Por ejemplo el fuzzy set etiquetado con la variable lingüística CERO podría ser definido como número mayor o igual a  $-10^\circ$  y menor o igual a  $10^\circ$  (matemáticamente  $CERO = \{x | -10^\circ \leq CERO \leq 10^\circ\}$ ), para poder establecer los límites de este fuzzy set. La especificación de este conjunto de elementos es dada en forma subjetiva por el diseñador. Habrá quien considere al fuzzy SET "CERO" como un punto único, y habrá quien lo considere en un intervalo mayor o menor; lo cierto es que esta asignación depende de las intuiciones y experiencias que se tengan para diseñar el proceso.

Para nuestro ejemplo, los elementos de todos los fuzzy sets podrían quedar como los mostrados en la tabla 4.

FUZZY SET'S	CONJUNTO DE ELEMENTOS
MUY NEGATIVO (MUN)	$-90^\circ \leq MUN \leq -65^\circ$
MEDIO NEGATIVO (MN)	$-65^\circ \leq MN \leq -35^\circ$
POCO NEGATIVO (PN)	$-35^\circ \leq PN \leq -10^\circ$
CERO (CE)	$-10^\circ \leq CE \leq 10^\circ$
POCO POSITIVO (PP)	$10^\circ \leq PP \leq 35^\circ$
MEDIO POSITIVO (MP)	$35^\circ \leq MP \leq 65^\circ$
MUY POSITIVO (MUP)	$65 \leq MUP \leq 90^\circ$

Tabla 4.- Fuzzy sets con sus conjuntos de elementos correspondientes.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

Estos intervalos formados por los elementos que forman cada fuzzy set, son representados en el sistema de ejes establecido en el inciso (a); como se muestra en la figura 15b.

c) Trazar las curvas que relacionan a los fuzzy sets con valores de las variables. El trazo de las curvas es muy fácil, primeramente tendremos que trazar líneas paralelas al eje vertical que partan del centro de los fuzzy sets e intercepten a la línea que limita los grados de verdad del eje vertical. A partir del punto de intersección superior se trazan líneas rectas hacia los puntos límites de cada fuzzy set que se encuentra en el universo de discurso, de la variable; de tal manera que formen triángulos para cada uno de los fuzzy sets. Esto es mostrado en la figura 15c.

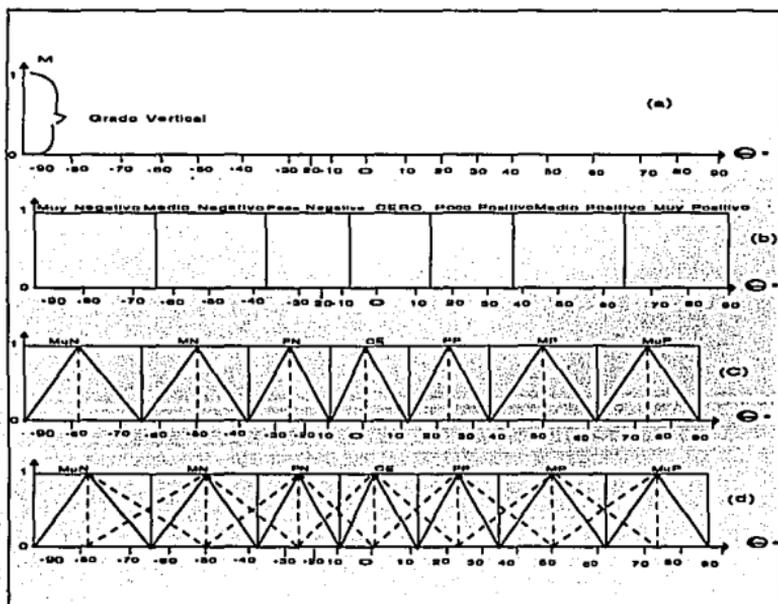


Figura 15. Pasos para graficar las variables en el proceso de fuzzificación. Aquí se ha aplicado el proceso a la variable  $\theta$  del problema del péndulo

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

d) *Traslapar los fuzzy sets, es decir, hacer que cada uno de los triángulos cubra parcialmente parte del otro triángulo. El área común puede estar entre el 10 y el 50 por ciento del próximo espacio o triángulo. Por ejemplo, el triángulo etiquetado con MUN (MUY NEGATIVO) tiene que cubrir de un 10 a un 50 por ciento del triángulo etiquetado con MN (MEDIO NEGATIVO) y este a su vez debe de cubrir la misma área del fuzzy set siguiente; y así sucesivamente hasta lograr el traslape de todos los triángulos. Entre más área se cubra del triángulo siguiente, más exacto es el proceso de fuzzificación. En la figura 15d se muestra con líneas punteadas, el traslape de los fuzzy sets para una área del 50 por ciento.*

*Si el procedimiento para graficar los fuzzy sets es aplicado a las variables  $\theta$ ,  $\Delta\theta$ , y  $V_m$  de nuestro ejemplo, obtendremos gráficas como las mostradas en la figura 16.*

*Cada una de las figuras —triángulos— resultantes del proceso de graficación de las variables  $\theta$ ,  $\Delta\theta$ ,  $U_m$  del proceso, reciben el nombre de FUNCIONES DE MIEMBRO. Estos representan las asociaciones entre entradas y salidas de sistema. Su tamaño refleja la vaguedad o incertidumbre, haciéndose más pequeña cuanto más preciso sea el fuzzy set. Estas funciones de miembro, nos permitirán tratar con objetos o cosas inexactas y ambiguas - como sería la calificación de las variables lingüísticas-, ya que a través de estas funciones es posible el desarrollo del proceso de fuzzificación.*

*Suponiendo que en un momento determinado del proceso el péndulo se inclina hacia la izquierda, produciendo un valor de  $\theta = -55^\circ$ . El procedimiento de fuzzificación para esta variable de entrada sería el siguiente:<sup>20</sup>*

- 1.- Localizar este valor en la gráfica de la variable*
- 2.- Trazar en este punto una línea vertical*
- 3.- Proyectar los puntos de cruce hacia el eje vertical*

*Los puntos obtenidos, son los grados de miembro que serán asignados a la variable de entrada ( $\theta = -55^\circ$ ).*

---

<sup>20</sup> En este ejemplo el proceso de fuzzificación solo se aplica a la variable  $\theta$ , pero tiene que ser aplicado a todas las variables de entrada del controlador.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

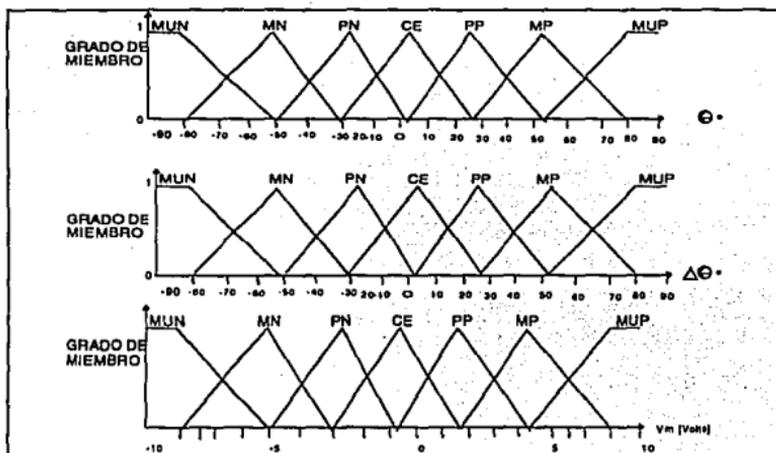


Figura 16. Gráficas de las variables  $\theta$ ,  $\Delta\theta$  y  $V_m$  que harán posible la aplicación de proceso de fuzzificación. A cada uno de estos triángulos se les da el nombre de funciones de miembro

En la figura 17 se muestra este procedimiento.

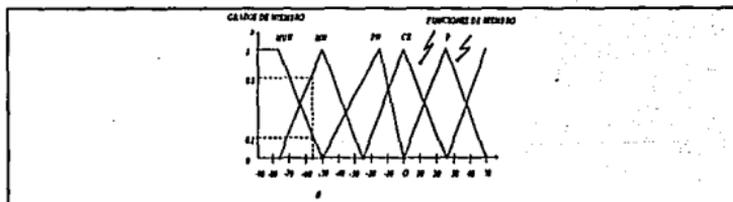


Figura 17. Proceso de fuzzificación.- Aquí un ángulo  $\theta = -55^\circ$  tiene un grado de miembro en el fuzzy set MUN (muy Negativo) de  $\mu = 0.2$  y en el fuzzy set MN (Medio Negativo) de  $\mu = 0.8$ .

Como se muestra en la figura 17, el ángulo  $\theta = -55^\circ$  tiene un grado de miembro en el fuzzy set MUN de  $\mu = 0.2$  y en el fuzzy set MN de  $\mu = 0.8$ ; lo que nos indica que el valor de  $\theta$  pertenece más al fuzzy set MN que al fuzzy set MUN. Por lo tanto  $\theta = -55^\circ$  será considerado como un valor que pertenece al fuzzy set MN y su grado de miembro resultante (0.8) será el procesado en los pasos posteriores de la metodología de diseño fuzzy.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

El grado de miembro o grado de verdad obtenido para la variable  $\Theta = -55^\circ$  con el proceso de fuzzificación, pudiera no ser convincente ya que ha surgido de un procedimiento gráfico; por lo tanto, es necesario comprobar el proceso de fuzzificación matemáticamente para probar lo contrario. En la figura 18a se muestra esta comprobación.

Existe una característica de la lógica difusa que se puede observar en la figura 17, es la siguiente: "LOS GRADOS DE PERTENENCIA DE UNA VARIABLE A FUNCIONES DE MIEMBROS COMPLEMENTARIAS, DEBEN DE SUMAR LA UNIDAD" (ver la figura 18b). Esta es la única restricción impuesta a la lógica difusa y es debida a que esta lógica trabaja con valores comprendidos en un intervalo de (0 a 1), por lo que no se deben de rebasar estos límites.

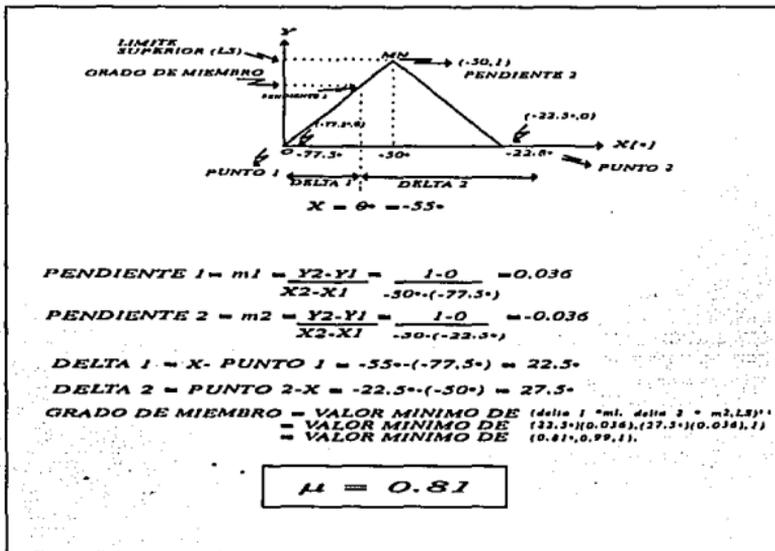


Figura 18a.- Cálculo del grado de miembro.- se puede comprobar que el grado de miembro obtenido en el análisis gráfico es aproximadamente igual al calculado matemáticamente. Por lo tanto ambos son confiables.<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Greg Viot: Fuzzy logic; concepts to constructs, AI EXPERT, November 1993. p

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY



FIGURA 18b.- Función de miembro y sus complementos.- Aquí se muestra la función de miembro MEDIO NEGATIVO, así como su complemento MUY NEGATIVO y POCO NEGATIVO; pero a la vez la función de miembro MEDIO NEGATIVO se convierte en complemento de las otras dos funciones de miembro. Un objeto pertenece a una función de miembro en cierta medida y a su complemento en otra cierta medida. Estas pertenencias parciales deben de sumar uno. Si -62 grados es en un 50 por ciento MUY NEGATIVO, será también en un 50 por ciento MEDIO NEGATIVO.

Por ejemplo el valor de  $\theta = -55$  grados fué 80 por ciento MEDIO NEGATIVO y un 20 por ciento MUY NEGATIVO, sumando ambas un 100 por ciento. Esto justifica el traslado de las funciones de miembro en el proceso de graficación.

- 5.- **PRODUCCION DE REGLAS DE CONTROL-** El objetivo es definir el comportamiento de las fuentes de control, esto implica escribir reglas de la forma **CONDICION-ACCION (SI-ENTONCES)** llamadas reglas fuzzy, que transforman las entradas en salidas.

Estas reglas son expresadas en un lenguaje apropiado que permite describir el comportamiento del proceso usando términos lingüísticos.

Una forma sencilla de representar los conocimientos que se tienen sobre el control del proceso, es através de la producción de reglas. Para producir dichas reglas, es necesario describir partes del problema con palabras; esto es hecho en base al sentido común, a la experiencia y al criterio del diseñador.

Es importante imaginar -en la arquitectura del sistema- como se lleva acabo el

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

control del proceso, tomando en cuenta; las características de las variables de control. Es como jugar a controlar el proceso, agotando en el juego, todas las posibilidades de control. Tomando en cuenta esto y apoyandonos en la figura 19, implementaremos la producción de reglas para el problema del péndulo invertido.

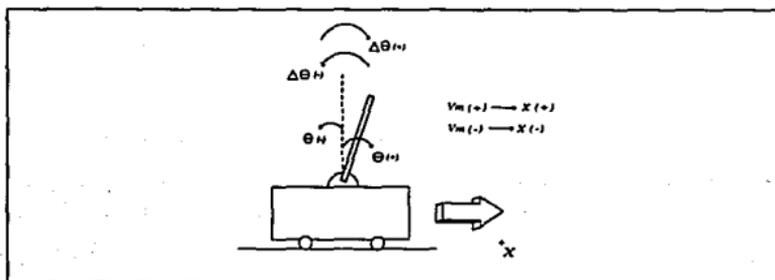


Figura 19.- Convención de signos para establecer las reglas de control del péndulo invertido. Las variables  $\theta$  y  $\Delta\theta$  son positivas de lado derecho del eje vertical y negativas del lado izquierdo. Con un voltaje positivo en el motor [ $V_m(+)$ ] el carrito se desplaza hacia la derecha del eje horizontal [ $X(+)$ ] y un voltaje negativo se desplazara hacia el lado contrario [ $X(-)$ ].

Por ejemplo, suponiendo que el péndulo se encuentra en posición vertical ( $\theta = 0$ ) pero tiene movimiento; en base a esta suposición, podríamos establecer algunas reglas de sentido común como las siguientes:

- 1.- Si el péndulo esta en posición vertical y esta casi inmovil, entonces el carrito no se movera.
- 2.- Si el péndulo esta en posición vertical y se mueve lentamente para la izquierda, entonces moveremos el carrito lentamente para la izquierda.
- 3.- Si el péndulo esta en posición vertical y se mueve moderadamente para la izquierda, entonces moveremos el carrito para la izquierda.
- 4.- Si el péndulo esta en posición vertical y se mueve rápidamente para la izquierda, entonces moveremos el carrito rápidamente para la izquierda.
- 5.- Si el péndulo esta en posición vertical y se mueve lentamente para la derecha, entonces moveremos el carrito lentamente para la derecha.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

- 6.- Si el péndulo está en posición vertical y se mueve moderadamente para la derecha, entonces moveremos el carrito moderadamente para la derecha.
- 7.- Si el péndulo está en posición vertical y se mueve rápidamente para la derecha, entonces moveremos rápidamente el carrito para la derecha.

Ahora suponiendo que el péndulo no se mueve ( $\Delta\theta=0$ ), tendríamos las siguientes reglas:

- 8.- Si el péndulo está inclinado un poco para la izquierda y está casi inmóvil, entonces moveremos el carrito hacia la izquierda lentamente.
- 9.- Si el péndulo está inclinado un poco para la izquierda y está casi inmóvil, entonces moveremos el carrito moderadamente para la izquierda.
- 10.- Si el péndulo está muy inclinado para la izquierda y está casi inmóvil, entonces moveremos el carrito rápidamente para la izquierda.
- 11.- Si el péndulo está inclinado un poco para la derecha y está casi inmóvil, entonces moveremos el carrito lentamente para la derecha.
- 12.- Si el péndulo está inclinado moderadamente hacia la derecha y está casi inmóvil, entonces moveremos el carrito hacia la derecha moderadamente.
- 13.- Si el péndulo está muy inclinado para la derecha y está casi inmóvil, entonces moveremos el carrito rápidamente para la derecha.

. . . . .  
. . . . .  
. . . . .  
. . . . .

Y así sucesivamente, hasta agotar las posibilidades de control.

Estas reglas de sentido común que empleamos para controlar el balance del péndulo, pueden ser convertidas en reglas fuzzy (SI-ENTONCES) de la siguiente manera:

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

Por ejemplo podemos relacionar lo dicho en las reglas 1 y 2 con las variables del sistema de la siguiente manera:

Regla 1:

Péndulo en posición vertical	IMPLICA QUE $\theta = \text{CERO}$
esta casi inmóvil el carrito	IMPLICA QUE $\Delta\theta = \text{CERO}$
el carrito no se moverá.	IMPLICA QUE $V_m = \text{CERO}$

Regla 2:

Péndulo en posición vertical  $\implies \theta = \text{CERO}$

se mueve lentamente para la izquierda  $\implies \Delta\theta = \text{POCO NEGATIVO}$

mover el carrito lentamente para la izquierda  $\implies V_m = \text{POCO NEGATIVO}$

Por lo tanto estas reglas fuzzy resultantes de la regla 1 y 2 serían las siguientes:

SI (  $\theta = \text{CERO}$  ) Y (  $\Delta\theta = \text{CERO}$  ) ENTONCES (  $V_m = \text{CERO}$  )

SI (  $\theta = \text{CERO}$  ) Y (  $\Delta\theta \text{ POCO NEG}$  ) ENTONCES (  $V_m = \text{POCO NEG}$  )

La implementación de reglas como estas, es el objetivo de este punto de la metodología de diseño fuzzy.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

Generalmente, el número de reglas fuzzy requerido para poder controlar un proceso, esta relacionado con el número de variables de control. El sistema del péndulo invertido; por ejemplo; tiene dos controles variables, el ángulo  $\theta$  y la velocidad angular  $\Delta\theta$ , cada una de estas variables fue dividida: dentro de siete regiones fuzzy como son "MUY NEGATIVO", "MEDIO NEGATIVO", "POCO NEGATIVO", "CERO", "POCO POSITIVO", "MEDIO POSITIVO" Y "MUY POSITIVO". Por lo tanto, hay un total de  $7 \times 7 = 49$  combinaciones de entrada, es decir, el sistema requiere de 49 reglas fuzzy para poder ser controlado eficientemente. Las 49 reglas fuzzy para el sistema del péndulo se muestran en la tabla 5.

Las reglas fuzzy establecidas para un sistema representan los conocimientos del diseñador o del operador del proceso; por lo tanto si algunas de estas reglas llegaran a ser no muy claras, no repercutiría en el funcionamiento del proceso ya que este conocimiento borroso sería removido o ocultado por el sistema. Esta es otra de las ventajas que ofrecen los controladores difusos.

Es por lo anterior que en algunos casos es posible utilizar menos reglas de las establecidas para controlar el proceso en estos casos se seleccionan usualmente solo las reglas relevantes. También esto es posible ya que el control fuzzy reproduce fielmente las habilidades humanas usando siempre descripciones del sistema.

- 6.- **PROCESO DE INFERENCIA.**- Es un proceso mediante el cual se formularan o deduciran "DECISIONES LOGICAS" a través de la "EVALUACIÓN DE REGLAS FUZZY" para determinar "SALIDAS" del sistema correspondiente. La formación de decisiones lógicas usadas para el proceso de inferencia, es muy importante y puede ser el componente más flexible en el sistema fuzzy.

Para gobernar el comportamiento del sistema del péndulo invertido, se establecieron un conjunto

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

Regla 1 : SI ( $\theta = CE$ ) Y ( $\Delta\theta = CE$ ) ENTONCES ( $V_m = CE$ )
Regla 2 : SI ( $\theta = CE$ ) Y ( $\Delta\theta = PN$ ) ENTONCES ( $V_m = PN$ )
Regla 3 : SI ( $\theta = CE$ ) Y ( $\Delta\theta = MN$ ) ENTONCES ( $V_m = MN$ )
Regla 4 : SI ( $\theta = CE$ ) Y ( $\Delta\theta = MUN$ ) ENTONCES ( $V_m = MUN$ )
Regla 5 : SI ( $\theta = CE$ ) Y ( $\Delta\theta = PP$ ) ENTONCES ( $V_m = PP$ )
Regla 6 : SI ( $\theta = CE$ ) Y ( $\Delta\theta = MP$ ) ENTONCES ( $V_m = MP$ )
Regla 7 : SI ( $\theta = CE$ ) Y ( $\Delta\theta = MUP$ ) ENTONCES ( $V_m = MUP$ )
Regla 8 : SI ( $\theta = PN$ ) Y ( $\Delta\theta = CE$ ) ENTONCES ( $V_m = PN$ )
Regla 9 : SI ( $\theta = MN$ ) Y ( $\Delta\theta = CE$ ) ENTONCES ( $V_m = MN$ )
Regla 10 : SI ( $\theta = MUN$ ) Y ( $\Delta\theta = CE$ ) ENTONCES ( $V_m = MUN$ )
Regla 11 : SI ( $\theta = PP$ ) Y ( $\Delta\theta = CE$ ) ENTONCES ( $V_m = PP$ )
Regla 12 : SI ( $\theta = MP$ ) Y ( $\Delta\theta = CE$ ) ENTONCES ( $V_m = MP$ )
Regla 13 : SI ( $\theta = MUP$ ) Y ( $\Delta\theta = CE$ ) ENTONCES ( $V_m = MUP$ )
Regla 14 : SI ( $\theta = PP$ ) Y ( $\Delta\theta = PP$ ) ENTONCES ( $V_m = PP$ )
Regla 15 : SI ( $\theta = PP$ ) Y ( $\Delta\theta = MP$ ) ENTONCES ( $V_m = MP$ )
Regla 16 : SI ( $\theta = PP$ ) Y ( $\Delta\theta = MUP$ ) ENTONCES ( $V_m = MUP$ )
Regla 17 : SI ( $\theta = MP$ ) Y ( $\Delta\theta = PP$ ) ENTONCES ( $V_m = MP$ )
Regla 18 : SI ( $\theta = MP$ ) Y ( $\Delta\theta = MP$ ) ENTONCES ( $V_m = MP$ )
Regla 19 : SI ( $\theta = MP$ ) Y ( $\Delta\theta = MUP$ ) ENTONCES ( $V_m = MUP$ )
Regla 20 : SI ( $\theta = MUP$ ) Y ( $\Delta\theta = PP$ ) ENTONCES ( $V_m = MUP$ )
Regla 21 : SI ( $\theta = MUP$ ) Y ( $\Delta\theta = MP$ ) ENTONCES ( $V_m = MUP$ )
Regla 22 : SI ( $\theta = MUP$ ) Y ( $\Delta\theta = MUP$ ) ENTONCES ( $V_m = MUP$ )
Regla 23 : SI ( $\theta = PN$ ) Y ( $\Delta\theta = PN$ ) ENTONCES ( $V_m = PN$ )
Regla 24 : SI ( $\theta = PN$ ) Y ( $\Delta\theta = MN$ ) ENTONCES ( $V_m = MN$ )
Regla 25 : SI ( $\theta = PN$ ) Y ( $\Delta\theta = MUN$ ) ENTONCES ( $V_m = MUN$ )
Regla 26 : SI ( $\theta = MN$ ) Y ( $\Delta\theta = PN$ ) ENTONCES ( $V_m = MN$ )
Regla 27 : SI ( $\theta = MN$ ) Y ( $\Delta\theta = MN$ ) ENTONCES ( $V_m = MN$ )
Regla 28 : SI ( $\theta = MN$ ) Y ( $\Delta\theta = MUN$ ) ENTONCES ( $V_m = MUN$ )
Regla 29 : SI ( $\theta = MUN$ ) Y ( $\Delta\theta = PN$ ) ENTONCES ( $V_m = MUN$ )
Regla 30 : SI ( $\theta = MUN$ ) Y ( $\Delta\theta = MN$ ) ENTONCES ( $V_m = MUN$ )
Regla 31 : SI ( $\theta = MUN$ ) Y ( $\Delta\theta = MUN$ ) ENTONCES ( $V_m = MUN$ )
Regla 32 : SI ( $\theta = PP$ ) Y ( $\Delta\theta = PN$ ) ENTONCES ( $V_m = PP$ )
Regla 33 : SI ( $\theta = PP$ ) Y ( $\Delta\theta = MN$ ) ENTONCES ( $V_m = PN$ )
Regla 34 : SI ( $\theta = PP$ ) Y ( $\Delta\theta = MUN$ ) ENTONCES ( $V_m = MN$ )
Regla 35 : SI ( $\theta = MP$ ) Y ( $\Delta\theta = PN$ ) ENTONCES ( $V_m = PP$ )
Regla 36 : SI ( $\theta = MP$ ) Y ( $\Delta\theta = MN$ ) ENTONCES ( $V_m = CE$ )
Regla 37 : SI ( $\theta = MP$ ) Y ( $\Delta\theta = MUN$ ) ENTONCES ( $V_m = PN$ )
Regla 38 : SI ( $\theta = MUP$ ) Y ( $\Delta\theta = PN$ ) ENTONCES ( $V_m = MP$ )
Regla 39 : SI ( $\theta = MUP$ ) Y ( $\Delta\theta = MN$ ) ENTONCES ( $V_m = PP$ )
Regla 40 : SI ( $\theta = MUP$ ) Y ( $\Delta\theta = MUN$ ) ENTONCES ( $V_m = CE$ )
Regla 41 : SI ( $\theta = PN$ ) Y ( $\Delta\theta = PP$ ) ENTONCES ( $V_m = PN$ )
Regla 42 : SI ( $\theta = PN$ ) Y ( $\Delta\theta = MP$ ) ENTONCES ( $V_m = PP$ )
Regla 43 : SI ( $\theta = PN$ ) Y ( $\Delta\theta = MUP$ ) ENTONCES ( $V_m = MP$ )
Regla 44 : SI ( $\theta = MN$ ) Y ( $\Delta\theta = PP$ ) ENTONCES ( $V_m = PN$ )
Regla 45 : SI ( $\theta = MN$ ) Y ( $\Delta\theta = MP$ ) ENTONCES ( $V_m = CE$ )
Regla 46 : SI ( $\theta = MN$ ) Y ( $\Delta\theta = MUP$ ) ENTONCES ( $V_m = PP$ )
Regla 47 : SI ( $\theta = MUN$ ) Y ( $\Delta\theta = PP$ ) ENTONCES ( $V_m = MN$ )
Regla 48 : SI ( $\theta = MUN$ ) Y ( $\Delta\theta = MP$ ) ENTONCES ( $V_m = PN$ )
Regla 49 : SI ( $\theta = MUN$ ) Y ( $\Delta\theta = MUP$ ) ENTONCES ( $V_m = CE$ )

Tabla 5.- Reglas para el problema del péndulo invertido.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

de reglas que tiene la forma de la declaración SI-ENTONCES. En donde el lado SI de una regla contiene una o más condiciones, llamadas "antecedentes", y el lado ENTONCES contiene una o más acciones, llamadas "consecuencias". Estas reglas podrán ser evaluadas a través del proceso de inferencia, como se muestra en la figura 20.

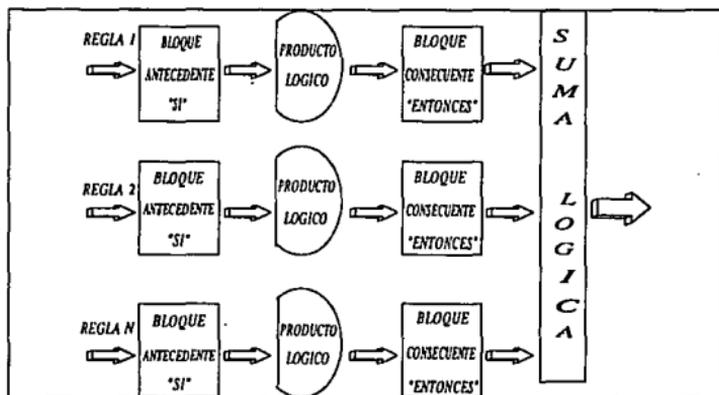


Figura 20.- Operación funcional del proceso de inferencia es compuesto de algunas reglas fúuzzy y una suma lógica. Las reglas son divididas dentro de condiciones (bloque antecedente) y conclusiones (bloque consecuente). La conclusión es satisficida, cuanto las condiciones son satisficidas.

Una forma fácil de ilustrar como se evalúan las reglas fúuzzy a través del proceso de inferencia mostrado en la figura 20, es a través de un caso específico del control del péndulo. Supongamos que para poder controlar el balance del péndulo invertido necesitamos solo 10 de las 49 reglas establecidas en la tabla 5, las cuales se han representado en la figura 21. Además suponiendo que en un instante dado en el tiempo, las variables de control  $\theta$  y  $\Delta\theta$  tienen los valores indicados por las líneas verticales en la figura 21. Estos valores de entrada son sobre puestos por encima de las funciones de miembro antecedente en la parte alta de las hileras de las gráficas. Las siguientes 10 hileras son gráficas representantes de los bloques antecedentes y consecuentes de las 10 reglas utilizadas; en donde se ve claramente que los antecedentes de las reglas, corresponden directamente a los grados de miembro calculados durante el proceso de fúzzificación para las entradas correspondientes.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

Trabajando con estos grados de miembros asignados en el proceso de fuzzificación, el proceso de inferencia, realiza dos operaciones muy importantes para poder evaluar las reglas y poder producir una salida fuzzy que responde a las entradas, estas son: el PRODUCTO LOGICO y la SUMA LOGICA.

**PRODUCTO LOGICO.**- Aunque este término es razonable y muy complejo, su calculo es muy simple.

El producto lógico de todos los grados de miembros es simplemente igual al valor mínimo de todos los grados de miembros involucrados.<sup>22</sup>

Así en la regla 1, el producto lógico de 0.8 de  $\Theta$  y 0.0 de  $A\Theta$  es simplemente 0.0. Este procedimiento es repetido, para cada una de las reglas, y es mostrado en la figura 21.

Este producto lógico es muy importante ya que a través de él podremos ajustar las funciones de miembro consecuentes. Por ejemplo en la regla 5 (Si el ángulo  $\Theta$  es cero y la velocidad angular  $\Delta\Theta$  es poco positiva, entonces la velocidad del motor  $V_m$  es poco positiva),  $\Theta$  tiene un grado de 0.8 de miembros en cero y  $\Delta\Theta$  tiene un grado de 0.7 de miembros un poco positivo; por lo tanto, el producto lógico es 0.7. Entonces, el nivel de la salida de la regla 5 -es decir PP- es ajustada o truncada en ese mismo nivel; esto es ilustrado con la parte sombreada del bloque consecuente PP -en la regla 5- en la figura 21. En la regla 6, la función es cortada por encima de 0.2. En las otras reglas, el grado mínimo es cero y la función de miembro consecuente es cortada completamente en la base. Estos cálculos pasan extremadamente rápido. Un instante más tarde, las dos entradas podrán tomar nuevos valores y el producto lógico tendrá que ser calculado otra vez.

**SUMA LOGICA.**- La suma lógica combina los resultados de las reglas. Esto es ilustrado en la parte baja de la figura 21. El área sombreada es el resultado, para los valores de entrada ( $\Theta = -3^\circ$  y  $\Delta\Theta = 30^\circ$ ) dados; estos resultados de las reglas después de todo serán procesadas posteriormente ya que hasta este punto el controlador fuzzy no podrá hacer una rápida decisión entre PP y MP. El área entera sombreada puede ser llamada la conclusión del proceso de inferencia.

---

<sup>22</sup> HJ Zimmermann.- Fuzzy SET-and its Application second, revised edition P-17 George J. Klir: Fuzzy SETS UNCERTAINTY AND INFORMATION, Prentice Hall, Capítulos I y II

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

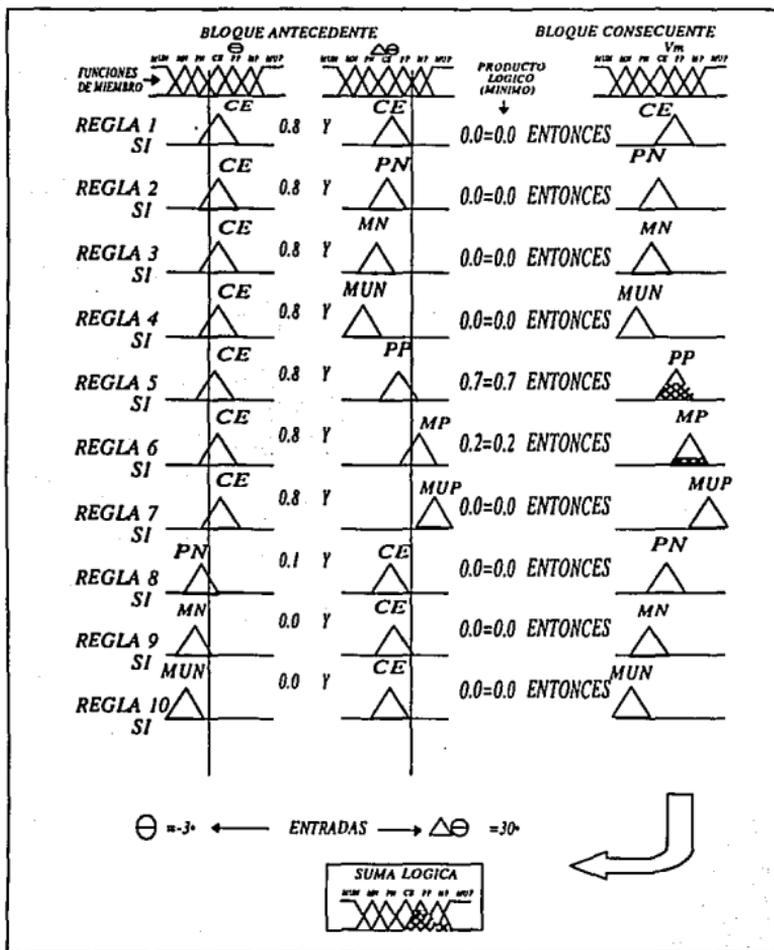


Figura 21. Determinación de la suma Lógica del bloque consecuente

En términos prácticos, podemos resumir el ejemplo ilustrado en este punto de la metodología, de la siguiente manera: si se considera que el péndulo está casi en posición vertical ( $\theta = -3^\circ \equiv \text{CERO}$ ) y que se mueve lentamente para la derecha ( $\Delta\theta = 30'$  = POCO POSITIVO), se activarán dos reglas (reglas 5 y 6) del sistema que intentarán hacer funcionar el motor - para mover el carricón hacia la derecha - con un voltaje que será en un 70 % "POCO POSITIVO" y en un 20 % "MEDIO POSITIVO" (suma lógica). El voltaje exacto será obtenido hallando el centro de masa, o centroide, para la suma de las curvas de salida que representan al régimen del motor; esto se realiza en el siguiente paso de la metodología, el PROCESO DE DEFUZZIFICACION.

**7.- DEFUZZIFICACION DE SALIDAS.** - Es la parte final de la metodología de diseño fuzzy. La defuzzificación es el proceso mediante el cual, el resultado obtenido en el proceso de inferencia; es transformado en un valor numérico concreto.

Aunque el área sombreada es la conclusión del proceso de inferencia (ver fig. 21), esta no puede ser utilizada directamente para el control físico de los dispositivos de salida del sistema del péndulo invertido, por lo tanto, tenemos que transformar dicha área, en un valor numérico utilizable para el sistema físico. En este ejemplo del péndulo invertido, esta salida será un solo valor para modificar la velocidad y el sentido del desplazamiento del carricón. Esto es hecho a través del proceso de defuzzificación.

Las técnicas más comunes de defuzzificación son mostradas a continuación:

**1.- METODO DEL CENTRO DE GRAVEDAD<sup>23</sup>.** - Consiste en calcular el centro de masa, o centroide, del área obtenida en el proceso de inferencia. Esta técnica consiste de varios pasos:

- Determina un punto central, sobre el eje x, para cada función de miembro de salida.
- Se toma en cuenta el grado de miembro de ajuste -obtenido con el producto lógico- para cada función de miembro.
- Se calculan las áreas de las funciones de miembros (áreas sombreadas).
- Finalmente la salida defuzzificada es derivada de un término promedio o término pesado de los puntos centrales del eje X y las áreas calculadas. Con las áreas calculadas sirviendo como peso.

Este método es ilustrado en la figura 22

---

<sup>23</sup> Greg vlot: fuzzy logic; concepto to constructs, AI EXPERT november 1993 p 28 y 30. Greg vlot: fuzzy logic in C, Dr Dobb's february 1993 p 44

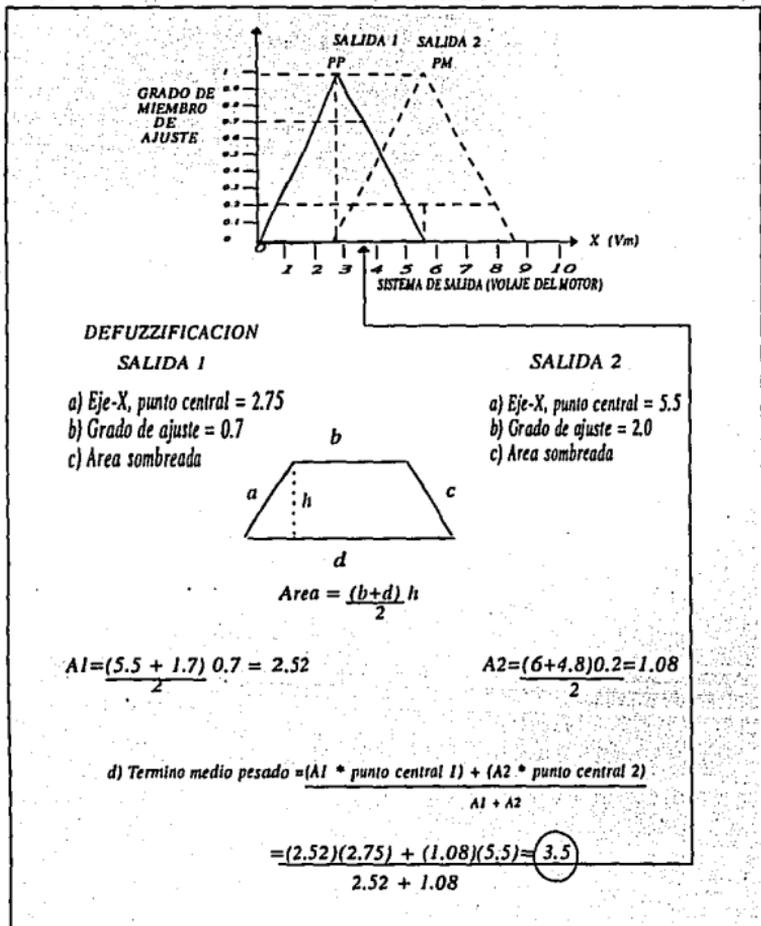


Figura 22. Defuzzificación de salidas a través de método centroidal

## DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY

2.- METODO DE LAS CARTAS UNICAS <sup>24</sup>.- Este método es usado para simplificar el proceso de defuzzificación. Una carta única es una FUNCIÓN DE MIEMBRO DE SALIDA representada por una sola línea vertical. Ya que la carta única interseca al eje-X en un punto, el cálculo del centro de gravedad se reduce solo al cálculo del término promedio o término pesado de los puntos centrales del eje X y los grados de ajuste como pesos. Este método es ilustrado en la figura 23

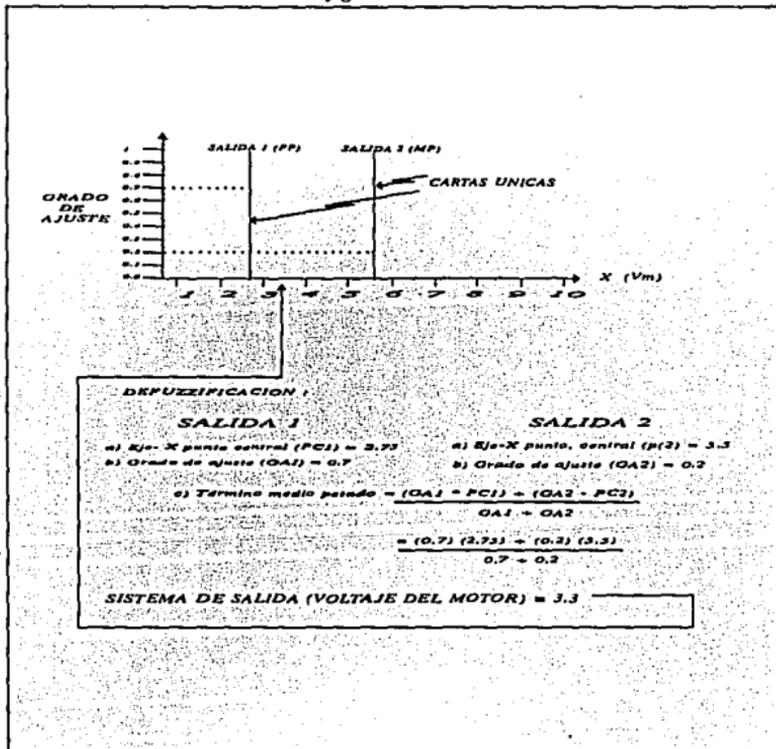


Figura 23.- Método de las cartas únicas.

<sup>24</sup> Greg Viot; fuzzy logic; concepts to constructs, AI EXPERT, november 1993 p 30,31

Los dos métodos de defuzzificación mostrados anteriormente son muy confiables y el diseñador puede escoger el que más le agrade. Ambos cumplen con el objetivo de transformar la curva de salida fuzzy (suma lógica) en un único valor numérico exacto. En este ejemplo el valor obtenido con la defuzzificación es ya un valor real de voltaje que tiene que proporcionar el controlador para activar el motor utilizado para controlar el movimiento del carrés. Por lo tanto, ya se ve claramente que cuando el péndulo se encuentra casi en posición vertical ( $\theta = -3^\circ$ ) y se mueve lentamente para la derecha ( $\Delta\theta = 30^\circ$ ); el controlador proporcionará una señal de voltaje de aproximadamente 3.5 volts. que hará girar en sentido horario al motor con una velocidad baja, provocando con esto que el carrés se desplace hacia el lado derecho un poco y logrando así el balance del péndulo.

### 2.4. FUZZY VS CONTROL CONVENCIONAL

En los puntos previos de este capítulo, se han tratado de introducir aspectos generales de los controladores convencionales; así como se ha logrado hacer un acercamiento detallado a lo que es el control con lógica difusa. Por lo tanto, estamos en la posición ideal de poder fijar nuestra atención en estas dos clases de control, para poder describir sus relaciones o estimar sus diferencias. Relaciones que permitirán subrayar la superioridad de los controladores difusos, sobre las convencionales.

#### Similaridades:

- \* Ambos controladores son usados para controlar el comportamiento de sistemas físicos.
- \* Ambos necesitan acceso a las variables perceptibles que representan el comportamiento del sistema físico dado.

#### Diferencias:

- \* En el control con lógica difusa no es necesario tener un modelo preciso del sistema o control.
- \* En control fuzzy, los objetivos son con frecuencia representados en un nivel por mucho trasladado a la operación del proceso; mientras que en el control convencional estos objetivos teóricos son generalmente representados como límites precisos en términos de las variables perceptibles, directamente o indirectamente.
- \* El control fuzzy es no-lineal, poco sensible a los cambios de los parámetros del sistema a controlar y presenta un alto rechazo al ruido.

## ***DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLADORES FUZZY***

---

- \* *En control fuzzy, el modelado de la planta esta implicito en la declaración del algoritmo de control.*
- \* *En control fuzzy, pueden implementarse fácilmente conocimientos del operador humano del sistema, expresados en términos lingüísticos.*
- \* *Gracias a su forma de representación del conocimiento, el control fuzzy, puede contemplar situaciones excepcionales del estado del proceso.*

## MODULOS FUZZY Y SUS APLICACIONES

---

### 3.1. INTRODUCCION

*Uno de los pasos principales para el diseño de controladores difusos, es la comprensión y definición del sistema en términos de las variables de entrada y salida. Generalmente un sistema de control mide un parametro y su razón de cambio como dos de sus entradas. Canon S.A. (Canon Inc) de Tokyo, en el auto-enfoque de su cámara de video H800, emplea un dispositivo de acoplo de carga (CCD) para ordenar la claridad de una imagen media en seis regiones de la pantalla, así determina si la imagen esta enfocada. Debido a que los lentes se mueven durante el enfoque, la camara también mide la razón de cambio del enfoque, y retarda los movimientos de los lentes para evitar exceder el enfoque óptimo. El controlador de Canon utiliza doce entradas: seis para medir la claridad instantanea para cada región de la pantalla y seis para medir la razón de cambio cuando la imagen llega enfocada en cada área. Hay una salida, la posición de los lentes de enfoque.*<sup>23</sup>

*Una ves que las variables son conocidas, pueden ser divididas en funciones de*

---

<sup>23</sup> Devin Self: Designing With fuzzy logic, IEEE SPECTRUM NOVEMBER 1990 P 42-43

*miembro. Por ejemplo, si la entrada es la temperatura, entonces los valores lingüísticos usados pueden ser frío, fresco, moderado, caluroso, y caliente. Típicamente, son utilizados de tres a cinco valores, asegurando una distribución simétrica de valores positivos y negativos al rededor de la mediana.*

*El método del estudio de la relación entrada/salida, define las funciones de miembro y las reglas de control, dependiendo del tipo de sistema a ser modelado. En el desarrollo de un modelo, el acercamiento más sencillo es el estudio de los sistemas controlados por humanos. Debido a que el humano piensa en términos de las funciones de miembro y usa variables lingüísticas espontáneamente, es más fácil actualmente empezar por la interrogación de la gente que con un modelo matemático -terminando así con el patrón de diseño de la ingeniería práctica. El mismo método puede ser aplicado a los sistemas físicos que, durante la automatización, todavía siguen reglas de tipo humano.*

*Después de que las reglas y las funciones de miembro han sido definidas, el último paso es probar el sistema para la salida apropiada. Si falla la prueba, las funciones de miembros y/o las reglas deben de ser ajustadas. En este punto las formas de las funciones de miembro son menos importantes, que su traslape, cuando al último determinemos las características de la transición entre las dos funciones. Varias interacciones de estas son hechas hasta que la respuesta del sistema caiga por debajo del nivel de error aceptable definido por el usuario.*

*La metodología de diseño con lógica difusa, es resumida en la figura 24; en donde, se muestran los elementos principales del diseño difuso y se identifica el flujo de información entre los bloques.*

*Como se puede observar en la fig. 24, el diseño de sistemas difusos implica tres módulos o procesos principales: fuzzificación, evaluación de reglas y defuzzificación; los cuales ya fueron tratados ampliamente en el capítulo anterior. Sin embargo, debido a su importancia en el diseño, es conveniente y a la vez necesario examinarlos un poco más - desde un punto de vista práctico- para lograr una mejor comprensión de los mismos.*

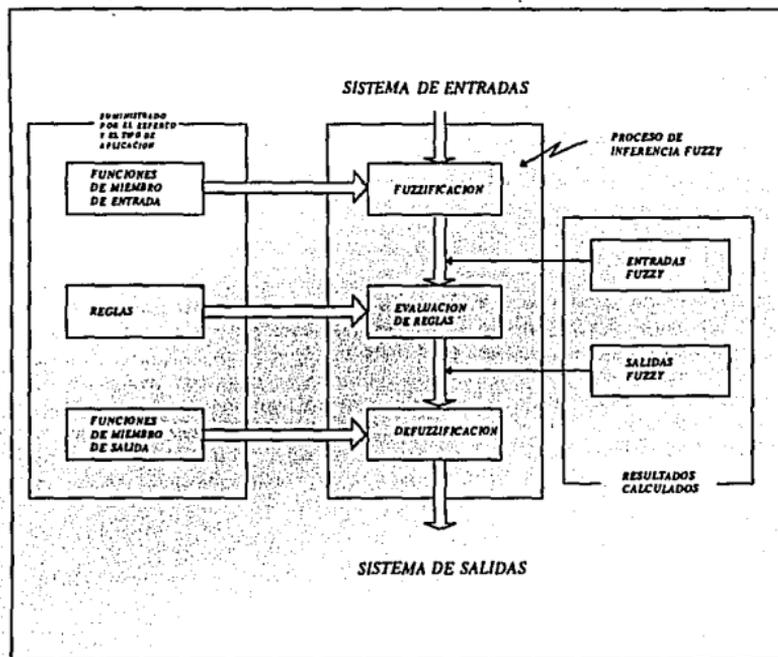


Figura 24.- Perspectiva total de un sistema con lógica difusa.

En este capítulo se introducen y analizan estructuras para el control difuso, considerando la importancia de los módulos principales y el comportamiento dinámico de los sistemas.

Se analizan y diseñan circuitos para la instrumentación de los módulos principales. En forma general, el objetivo de este capítulo, es proporcionar herramientas relacionando directamente las características del control difuso con el funcionamiento de los sistemas de

*control de lazo cerrado- para el diseño de controladores difusos estables y robustos.*

### **3.2. ESTRUCTURAS PARA EL CONTROL FUZZY**

*La proyección de los atributos observables de un proceso o de un sistema físico, dentro de sus atributos controlables; permite la aplicación de la lógica difusa como un medio de control directo (ver figura 25a). Estos sistemas generan las acciones de control de un conjunto de reglas de sentido común - establecidas por humanos expertos- que representan el conocimiento heurístico del proceso a ser controlado. Su estructura es mostrada en la figura 25b en donde  $AO_1, AO_2, \dots, AO_n$  son las variables del proceso a ser controlado y  $AC_1, AC_2, \dots, AC_n$  representan las variables de control generadas por una regla base<sup>26</sup> que esta definida por un conjunto de reglas de la forma:*

*Si  $AO_1$  es  $X_1$  y  $AO_2$  es  $X_2$  y...y,  $AO_n$  es  $X_n$  ENTONCES  $CA_1$  es  $Y_1$  Y  $CA$  ES  $Y_2$ ...*

*en donde  $X_i$  y  $Y_j$  ( $i, j=1, \dots, n$ ) son etiquetas lingüísticas (fuzzy sets) que definen regiones respectivamente en una serie de variaciones de  $AO_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) y  $AC_j$  ( $j=1, \dots, n$ ), en donde las reglas son validas. Por ejemplo:*

*Si  $AO_1$  es positivo-grande y  $AO_2$  es positivo-pequeño ENTONCES  $AC_1$  es positivo*

---

<sup>26</sup> REGLA BASE.- Terminología popular empleada para referirse al modelado de la relación entrada/salida como una regla o conocimiento base.

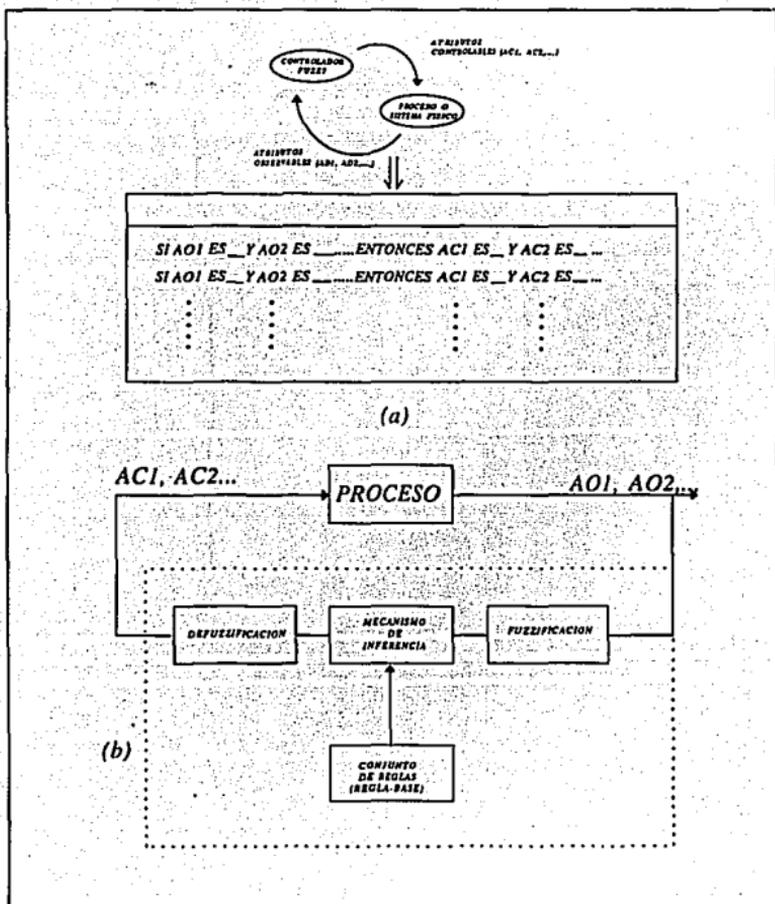


Figura 25. CONTROL DIRECTO FUZZY.-a) Paradigma básico de control  
b) Estructura de control.

El controlador difuso de la figura 25b consiste de un conjunto de reglas de control, un mecanismo de inferencia - en donde se simulan procedimientos hechos con decisiones humanas basadas en conceptos difusos y declaraciones lingüísticas -, y las interfases del proceso a ser controlado (fuzzificación para la entrada del controlador y defuzzificación para la salida del controlador). Esta estructura, así como las que se mencionan posteriormente, asumen que algunos conocimientos del proceso a controlar, pueden ser obtenidos fácilmente de los expertos. En realidad, el conocimiento aproximado sobre las relaciones dinámicas implicadas esta normalmente disponible desde el análisis y experimentación de los procesos hasta en los procesos complejos. El siguiente ejemplo ilustra el control directo difuso:

Se desea diseñar un controlador difuso que sea capaz de conducir marcha atrás (de reversa) un camión hasta un muelle de carga desde cualquier lugar de un estacionamiento. En la figura 26 se detalla el diagrama de simulación del camión y la zona de carga.

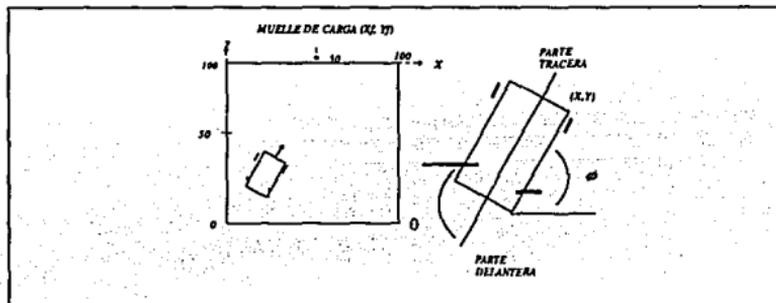


Figura 26. Diagrama de simulación camión.- Zona de carga

Como se puede observar en la figura, los tres estados variables  $\theta$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $Y$  determinan exactamente, la posición del camión  $\theta$  especifica el ángulo del camión con la horizontal. El par de coordenadas  $(x,y)$  especifican la posición de la parte trasera del camión en el plano.

## MODULOS FUZZY Y SUS APLICACIONES

El objetivo es hacer que el camión llegue al muelle de carga en un ángulo apropiado ( $\phi = 90^\circ$ ) y alineados en la posición  $(x,y)$  con respecto al muelle de carga  $(xf, yf)$ . Consideraremos sólo la marcha atrás del camión. La zona de carga estará definida por el plano  $[ 0, 100 ] \times [ 0, 100 ]$  y la zona de carga deseada estará dada por el par de coordenadas  $(xf, yf) = (50,100)$

Primeramente especificamos cada variable de entrada y de salida del controlador. Las variables de entrada son el ángulo del camión  $\phi$  y la posición  $x$  (coordenada  $x$ ). La variable de salida será la señal o ángulo de conducción  $\theta$ . En el análisis del problema se asumirá que existe suficiente espacio libre entre el camión y el muelle de carga así podremos ignorar la posición de camión con respecto al eje  $Y$  (coordenada  $y$ ). La serie de variables sería la siguiente.

$$\begin{aligned} 0 &\leq x \leq 100 \\ -90 &\leq \phi \leq 270^\circ \\ -30 &\leq \theta \leq 30^\circ \end{aligned}$$

Los valores positivos de  $\theta$  representan rotaciones en sentido horario del volante del camión. Valores negativos rotaciones en sentido Anti-horario.

A continuación especificaremos los valores de los fuzzy sets de las entradas y salidas. Los fuzzy sets representan numéricamente términos lingüísticos, el tipo de términos lingüísticos, que un experto puede utilizar para describir el comportamiento del sistema. Los valores escogidos para los fuzzy sets son:

ANGULO $\phi$	POSICION	ANGULO DE CONDUCCIÓN SEÑAL $\theta$
RB.- Derecha inferior	LE.- Izquierda	NR.- Negativo grande
RU.- Derecha superior	LC.- Izquierda-centro	NM.- Negativo medio
RV.- Derecha vertical	CE.- Centro	NS.- Negativo pequeño
VE.- Vertical	RC.- Derecha-centro	ZE.- Cero
LV.- Izquierda vertical	RI.- Derecha	PS.- Positivo pequeño
LU.- Izquierda superior		PM.- Positivo medio
LB.- Izquierda inferior		PB.- Positivo grande.

Las funciones de miembro pueden tener diferentes formas dependiendo de la preferencia o experiencia del diseñador.

En la práctica los ingenieros que manejan la teoría difusa han descubierto que las formas triangular y trapezoidal ayudan a capturar mejor el sentido de modelado de los números fuzzy y además simplifican cálculos. La figura 27 muestra las gráficas de las funciones. En esta figura, los fuzzy sets CE, VE, y ZE son más angostos que los otros fuzzy-set. Estos fuzzy sets angostos permiten un control más fino cerca del muelle de carga. En este ejemplo se utilizan fuzzy sets anchos para describir los puntos finales del arreglo de variables  $\phi$ ,  $x$ , y  $\theta$ ; esto nos permite tener un control aproximado del camión cuando este se encuentre lejos del muelle de carga.

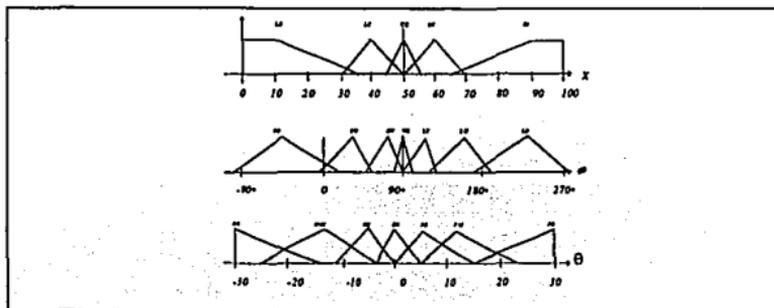


Figura 27.-Funciones de miembro para cada valor lingüístico fuzzy-sets. Para permitir un control finito, los fuzzy sets que corresponden a la cercanía del muelle de carga son más angostos que los fuzzy sets que corresponden a las zonas lejanas del muelle de carga.

A continuación especificaremos las "regla - base" difusa o también llamada banco de reglas de memoria asociativa difusa (FAM = Fuzzy Associative Memory). Las asociaciones difusas o "reglas" asocian los valores de control de los fuzzy sets de salida con fuzzy sets de entrada de valores de entrada-variables. Podemos escribir las asociaciones como pares de antecedentes-consecuencia o declaraciones SI-ENTONCES. En nuestro ejemplo el banco FAM contiene 35 reglas las cuales son mostradas en la figura 28. Por ejemplo la regla de la parte superior izquierdo del bloque (regla 1) corresponde a la siguiente asociación:

$$\text{IF } x = \text{LE AND } \phi = \text{RB, THEN } \theta = \text{PS}$$

## MODULOS FUZZY Y SUS APLICACIONES

La regla 18 indica que si el camión esta próximo a la posición de equilibrio, entonces el controlador no producirá señal para el ángulo de conducción positiva o negativa. Las reglas FAM en la matriz del banco - FAM refleja la simetría de el sistema controlador

	LE	LC	CE	RC	RI
RB	<sup>1</sup> PS	<sup>2</sup> PM	<sup>3</sup> PM	<sup>4</sup> PB	<sup>5</sup> PB
RU	<sup>6</sup> NS	<sup>7</sup> PS	<sup>8</sup> PM	<sup>9</sup> PB	<sup>10</sup> PB
RV	<sup>11</sup> NM	<sup>12</sup> NS	<sup>13</sup> PS	<sup>14</sup> PM	<sup>15</sup> PB
VE	<sup>16</sup> NM	<sup>17</sup> NM	<sup>18</sup> ZE	<sup>19</sup> PM	<sup>20</sup> PM
LV	<sup>21</sup> NB	<sup>22</sup> NM	<sup>23</sup> NS	<sup>24</sup> PS	<sup>25</sup> PM
LU	<sup>26</sup> NB	<sup>27</sup> NB	<sup>28</sup> NM	<sup>29</sup> NS	<sup>30</sup> PS
LB	<sup>31</sup> NB	<sup>32</sup> NB	<sup>33</sup> NM	<sup>34</sup> NM	<sup>35</sup> NS

Figura 28. Matriz banco.- Fam para controlar la marcha atrás del camión

Por otra parte, las técnicas de la lógica difusa pueden también ser aplicadas para el ajuste automático y supervisión de controladores convencionales tales como los controladores PID. En este caso el conjunto de reglas fuzzy proporcionan la adaptación del controlador convencional para diferentes condiciones de trabajo. La estructura es mostrada en la figura 29.

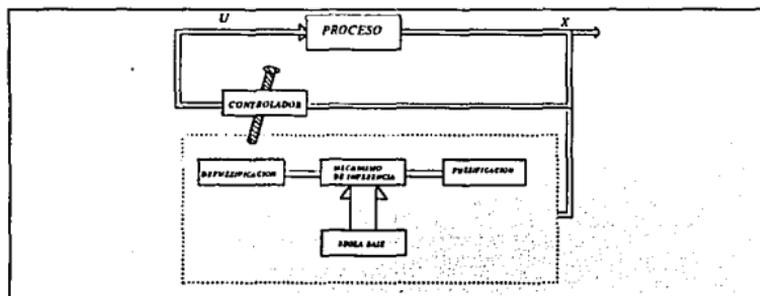


Figura 29. Supervisor difuso

Consideremos un controlador convencional definido por:

$$u = r(x, p)$$

en donde  $x$  representa nuevamente a las variables del proceso y  $p$  es un conjunto de parámetros del controlador. En este caso los componentes difusos consisten en un conjunto de reglas para deducir el valor apropiado de cada parámetro de control:

Si  $X_1$  es  $|x_1$ ,  $x_2$  es  $|x_2, \dots, x_n$  es  $|x_n$  ENTONCES  $P$  es  $|p$

en donde  $|x_i$  y  $|p$  son fuzzy sets que definen regiones en el intervalo de variación del parámetro  $p$  controlado.

Para combinar la lógica difusa con los algoritmos avanzados del control PID, por ejemplo, Omron Electronics Corporation, Inc. en su centro técnico a desarrollado un nuevo controlador de temperatura llamado ESAF<sup>27</sup> que tiene la habilidad de responder hasta en un 50% más rápido a las perturbaciones - implicadas en el proceso - que los métodos de control convencional. El ESAF es controlado mediante un programa basado en la lógica difusa que es ejecutado en tándem junto con los algoritmos PID, a pesar de todo el controlador no necesita programación especial. El programa difuso es programado en la unidad y opera automáticamente.

Trascendentemente, los controladores difusos con programas de control permiten a la unidad reaccionar en forma distinta dependiendo de la severidad de los disturbios externos. La 'ógica difusa monitorea a dos parámetros en la ejecución de este programa:

- . Magnitud de la desviación entre los valores del proceso y el punto fijado; y
- . Razón de cambio de la temperatura (en grados/segundos).

El controlador entonces compara estos valores en su regla-base para determinar la salida apropiada

---

<sup>27</sup> Nick Infelise, Omron Electronics, Inc. Technical Center, Schaumburg III: A Clear Vision of Fuzzy Logic p. 28 - 30

*El programa difuso es hecho de simples declaraciones SI-ENTONCES que están basadas en la comprensión de los operadores expertos del sistema bajo control. Tales "reglas fuzzy" pueden expresar ordenes con palabras comunes; además la programación es con frecuencia sencilla en comparación con los métodos tradicionales. Los siguientes ejemplos ilustran dos reglas del programa difuso:*

- 1.- Si la temperatura presente es más baja que la fijada y esta callendo rápidamente, ENTONCES aumenta grandemente la salida.*
- 2.- Si la temperatura presente es ligeramente más baja que la fijada y esta aumentando rápidamente, ENTONCES disminuye grandemente la salida.*

*El ESAF en realidad emplea tanto un avanzado algoritmo PID como un programa de control difuso. Sin embargo, el algoritmo PID es utilizado sólo durante el inicio del sistema y las operaciones de estado - fijo, debido a que el control difuso no afecta significativamente la salida del controlador en estos períodos.*

*Cuando un disturbio externo es detectado, tanto el programa difuso como el control PID se ejecutan en paralelo. El controlador aplica la diferencia entre la salida PID y la salida del controlador difuso para determinar la salida de control total. Cuando una desviación grande ocurre, la salida difusa trabaja para amplificar la salida de control. Cuando el proceso de temperatura es aproximadamente el establecido, el programa difuso suprime la salida PID para eliminar excedentes.*

### 3.3.- ARQUITECTURAS HARDWARE FUZZY

*En el segundo congreso de la Asociación Internacional de Sistemas Fuzzy (IFSA - 87), realizado en Tokyo en 1987, Takeshi Yamakawa -de la universidad de Kumamoto- presento sus propios chips en su experimento del péndulo invertido: un chip de reglas que implementaba la regla composicional de inferencia -mecanismo de inferencia- creada por Zadeh, y un chip defuzzificador que implementaba el calculo centroidal. El chip era analógico y podía funcionar en paralelo. La operación elemental utilizada en el mecanismo de inferencia, y además utilizado, en la defuzzificación, eran los máximos y mínimos aritméticos, que funcionaba mucho más rápido en dispositivos analógicos.<sup>28</sup>*

---

<sup>28</sup> Daniel G Schwartz and George J Klir: Fuzzy Logic flowers in Japan IEEE SPECTRUM, JULY 1992 p.34

Sin embargo, para el mundo el primer chip difuso, fue producido a mitad de los 70's por Masaki Togai -presidente de Togai Infralogic Inc., Irvine, California- y Watanabe -otro de los pioneros en los sistemas de control difusos- quienes implementaron justamente la aritmética máxima y mínima -frecuentemente utilizada en cálculos de fuzzy sets-, utilizando dispositivos digitales<sup>29</sup>

Tanto en el chip de Yamakawa como en el de Togai, el diseño del Hardware consiste básicamente en dos fases: la fase de sintonización - en donde se obtiene y ajustan las funciones de miembros y la fase de inferencia -en donde se deducen los resultados-. La especificación inicial de la aplicación consiste de un conjunto de reglas de la forma:

*SI A es pequeño ENTONCES B es bajo*

en donde PEQUEÑO y BAJO representan fuzzy sets. El conjunto de reglas obtenido se puede tomar como un tabla de verdad de multi-valores lógicos para poder asociar a las funciones de miembro con cada valor lingüístico. Por lo tanto, la especificación funcional de un controlador difuso es típicamente más simple que su homólogo booleano, una decena de reglas contra una gran tabla de verdad booleana. En algún sentido esta comparación es injusta ya que todas las dificultades de la lógica difusa están encaminadas a la especificación de las funciones de miembro, ya que típicamente son difíciles de obtener de manera exacta. Por consiguiente, el poder expresivo de la lógica difusa depende de métodos fuertes para construir funciones de miembros y la instrumentación de eficientes mecanismos de inferencia mediante hardware.

Hasta ahora los mecanismos de inferencia difusos -prácticos- han sido implementadas con software en computadoras digitales. Sin embargo, tal acercamiento es con frecuencia ineficiente en aplicaciones de control complejas y de tiempo real. Para implementar operaciones difusas en hardware existen dos aproximaciones principales: la digital y la analógica. La primera tiene la ventaja de utilizar - programabilidad y alta exactitud mientras que la segunda tiene la ventaja en velocidad, área de chip, y bajo consumo de energía. A continuación se presentan las arquitecturas para estos tipos de aproximaciones.

### **3.3.1.- Circuitos Analógicos Para la Instrumentación De Controladores Difusos**

Debido a que las señales difusas indican valores analógicos, es natural y esencial utilizar circuitos analógicos para la instrumentación de controladores difusos. En

---

<sup>29</sup> Daniel g. Schwartz and George J Klir: Fuzzy logic flowers in Japan, IEEE SPECTRUM, JULY 1992 P.34

comparación con los sistemas digitales, los dispositivos activos no sólo son utilizados como interruptores. Su funcionalidad no lineal es aplicada para implementar componentes de circuitos complejos. Esto permite reducir el número de dispositivos y disminuir el consumo de energía y el retraso de tiempo. Aunque las necesidades de precisión en los circuitos analógicos son más severas que en los circuitos digitales, la ambigüedad de la lógica difusa las cubre.

En la figura 30 se muestra un sistema de control basado en la inferencia fuzzy. Por simplicidad, asumiremos solo dos variables antecedentes y tres reglas. Así el sistema puede ser mostrado con bloques en la figura 31.

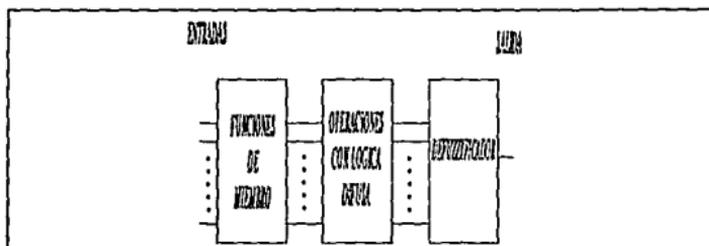


Figura 30.- Sistema de control con lógica difusa.

Siendo las variables antecedentes  $x$  y  $y$ , las funciones de miembro relacionadas con las tres reglas son  $M_1(x)$  y  $M_2(y)$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Si adoptamos el método del centro de gravedad como defuzzificador, entonces la salida  $G_o$  de este sistema de control puede ser definida como:

$$G_o = (W_1h_1 + W_2h_2 + W_3h_3) / (h_1 + h_2 + h_3)$$

en donde  $h_i = \text{Min}(M_{1i}(x), M_{2i}(y))$   $i = 1, 2, 3$

Esta ecuación muestra la necesidad de utilizar divisores. Sin embargo, si podemos fijar los valores  $(h_1 + h_2 + h_3)$  como unidades; o podemos llegar a los valores  $h_i / (h_1 + h_2 + h_3)$  directamente entonces los divisores no serán necesarios. Yamakawa solucionó este problema con circuitos normalizados con retroalimentación. En esta sección iremos también presentando los circuitos originales que generan los valores  $h_i / (h_1 + h_2 + h_3)$  directamente.

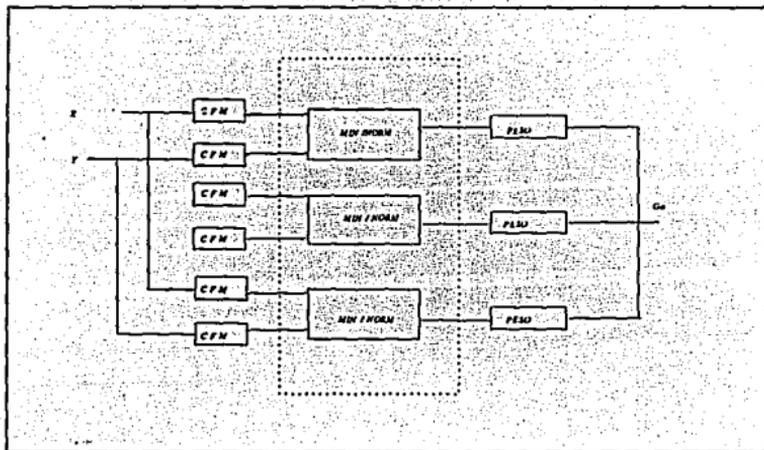


Figura 31. Circuito a bloques de un sistema de control con lógica difusa en donde:

CFM: Circuito de función de miembro.

MIN: Circuito de operación mínimo.

NORM: Circuito de normalización.

### A.- Circuito para la función de miembro. (CFM)

El circuito para las funciones de miembro es uno de los más importantes para los sistemas de control difusos. Este circuito es diseñado mediante un amplificador de trasconductancia para poder tener voltaje de entrada y corriente de salida. Debido a que los voltajes de entrada varían constantemente, pueden ser considerados como una red de entradas múltiples; de esta manera podremos conectar los circuitos a las funciones de miembro en paralelo como se muestra en la figura 31. Considerando la interfase entre el circuito de la función de miembro y el circuito MIN-Normalizado, el circuito de la función de miembro es diseñado para tener de salida-corriente, así que su salida puede ser conectada directamente al circuito MIN-Normalizado. La figura 32 muestra un circuito para la función de miembro utilizando circuitos diferenciales. El circuito consiste de dos pares diferenciales bipolares ( $Q_1 - Q_2$ ,  $Q_3 - Q_4$ ). Cada par diferencial consiste de dos transistores bipolares con el emisor acoplado por un resistor  $R_e$  y dos fuentes de corriente constantes ( $I_0$ ) y además tiene diferentes voltajes de compensación o ajuste (voltajes de offset) de  $V_{ref1}$  y  $V_{ref2}$ . La salida es completada con un espejo de corriente pnp ( $Q_5$ ,  $Q_6$ ).

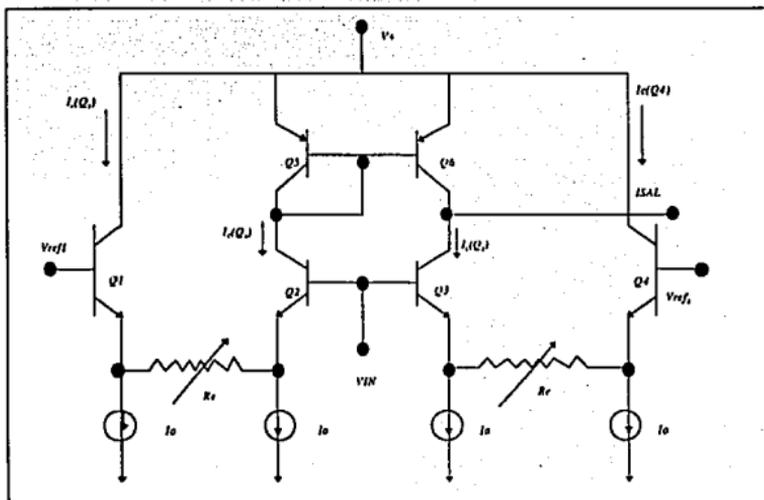


Figura 32. Circuito para función de miembro.

Por simplicidad, consideremos el caso cuando  $V_{ref1} \ll V_{ref2}$ . Si  $V_{in} \ll V_{ref1}$ , los transistores  $Q_2$  y  $Q_4$  estarán apagados (cortados) y la corriente de salida en el colector de  $Q_2$  es nula ( $I_{c(Q_2)} = 0$ ). Si  $V_{in} \equiv V_{ref1}$  (en modo común),  $Q_2$  pasará al estado de conducción,  $Q_3$  estará aun cortado ( $I_{c(Q_3)} = 0$ ), entonces  $ISAL = I_{c(Q_2)}$  y aumentará linealmente con  $V_{in}$  con una pendiente de  $g_m$  ( $g_m = \text{Transconductancia} = ISAL/V_{in}$ ) aproximadamente hasta que  $ISAL = 2I_0$  y permanecerá constante hasta que  $V_{in} \equiv V_{ref2}$ . Cuando  $V_{in}$  aumenta y se aproxima a  $V_{ref2}$ ,  $Q_3$  pasa al estado de conducción y la  $ISAL$  decrece linealmente con  $V_{in}$  con una pendiente de  $-g_m$  aproximadamente hasta cero y permanece constante, como se muestra en la figura

33. De esta manera, combinando las corrientes de las fuentes ( $I_0$ ), los resistores de los emisores ( $R_e$ ), y los voltajes de referencia ( $V_{ref1}$ ,  $V_{ref2}$ ); podremos diseñar salidas (funciones de miembro) de diferentes tipos y formas, como los mostrados en la figura 34. El circuito

en cualquier sistema de control difuso. Además, su velocidad de respuesta es también muy alta. Su retraso de tiempo solamente es de 100ns aproximadamente, lo cual es muy bueno para los sistemas de control difuso prácticos.

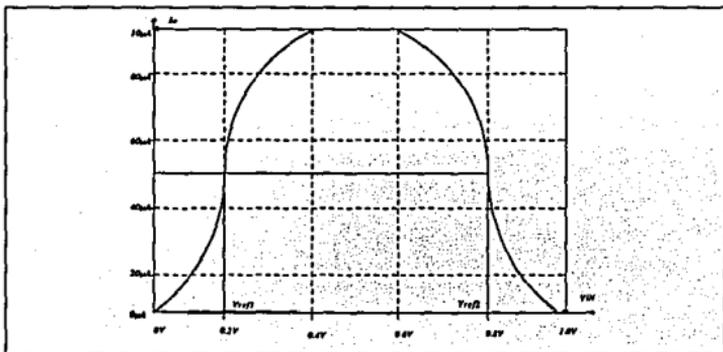


Figura 33. Relación entre los voltajes de referencia 1 y 2 ( $V_{ref1,2}$ ) y  $I_e$ .

### B.- Circuito para la operación mínima

El circuito para la implementación de la operación mínima se muestra en la figura 35. Los transistores  $Q_1$  y  $Q_2$  forman un espejo de corriente. Si  $I_{in1} > I_{in2}$ , la diferencia de las corrientes ( $I_{in1} - I_{in2}$ ) fluye a través de la base  $Q_3$ , y las corrientes de colector de  $Q_1$  y  $Q_2$  son iguales a la  $I_{in2}$ , y viceversa. Puesto que el transistor  $Q_3$  forma un espejo de corriente con  $Q_1$  y  $Q_2$ , la  $I_{sal}$  es igual a la corriente mínima de  $I_{in1}$  y  $I_{in2}$ . La configuración de este circuito es muy simple y práctica.

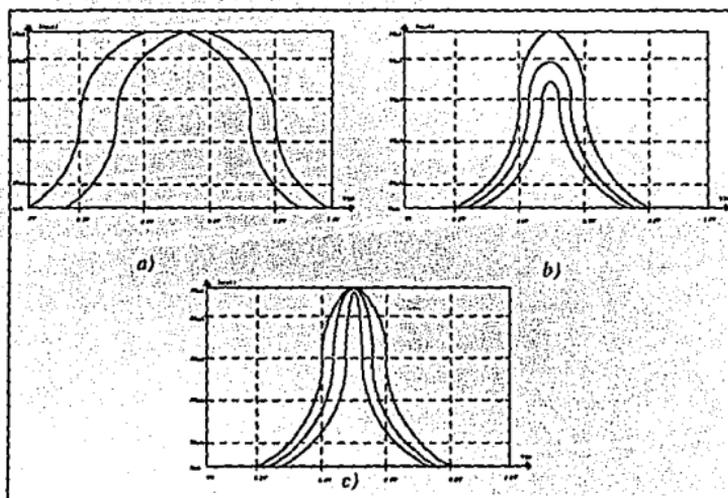


Figura 34. Funciones de miembro:

- (a).- Distribución.- Gaussiana y forma de escalera
- (b).- Con cambios de altura.
- (c).- Con cambios de anchura.

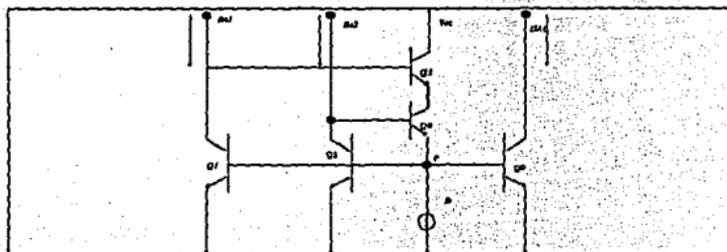


Figura 35. Circuito Mínimo

C. Circuito normalizado

La figura 36 muestra un circuito normalizado. La configuración del circuito es muy simple. La corriente en cada colector puede ser expresada como:

$$I_{ci} = (I_{mi}/(I_{m1} + I_{m2} + I_{m3})) I_o \text{ donde } i=1,2,3$$

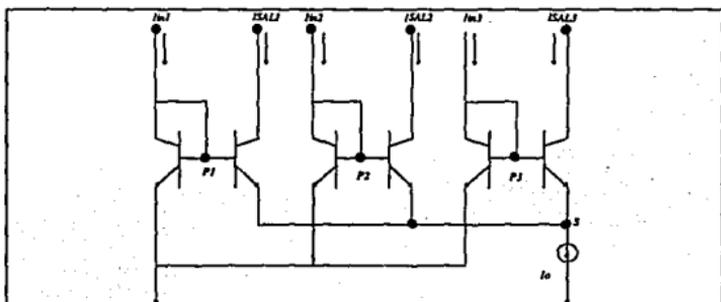


Figura 36. Circuito Normalizado

Explicaremos el circuito con detalle empleando tres entradas. Los voltajes de los nodos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> pueden ser expresados como sigue:

$$\begin{aligned} V_{p1} &= V_T \cdot \log I_1/I_i \\ V_{p2} &= V_T \cdot \log I_2/I_i \\ V_{p3} &= V_T \cdot \log I_3/I_i \end{aligned} \quad (1)$$

donde I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> y I<sub>3</sub> son las corrientes de entrada.

Por otra parte, las corrientes de colector (corrientes de salida) I<sub>o1</sub>, I<sub>o2</sub> y I<sub>o3</sub> también pueden ser expresadas como:

$$I_{01} = I_s \cdot \exp ((V_{p1} - V_j) / V_T)$$

$$I_{02} = I_s \cdot \exp ((V_{p2} - V_j) / V_T) \quad (2)$$

$$I_{03} = I_s \cdot \exp ((V_{p3} - V_j) / V_T)$$

en donde  $V_s$  es el voltaje del punto S. Utilizando las ecuaciones (1), (2) y  $I_{01} + I_{02} + I_{03} = I_0$  podemos obtener:

$$V_s = V_T \cdot \log \{ I_0 / (I_1 + I_2 + I_3) \} \quad (3)$$

De (1) y (3) podremos obtener la corriente de salida:

$$I_{01} = \frac{I_1}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot I_0$$

$$I_{02} = \frac{I_2}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot I_0$$

$$I_{03} = \frac{I_3}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot I_0$$

En este camino la corriente de salida es normalizada a  $I_0$ . En este caso, explicamos el circuito para solo tres corrientes de entrada, pero en general este circuito normalizado puede ser extendido a entradas múltiples directamente. Por lo tanto, desde un punto de vista general podemos derivar la siguiente expresión:

$$I_{oi} = \frac{I_{ni}}{\sum I_{ni}} \cdot I_0$$

donde  $I_{ni} = \text{Min} (I_{i1}, I_{i2}, \dots, I_{ik_i})$

$i = 1, 2, \dots, n$

$n = \text{número de reglas}$

$k_i = \text{número de variables antecedentes para la regla}$

Cabe mencionar que la salida del transistor  $Q_o$  en el circuito mínimo mostrado en la figura 35 puede ser suprimida cuando se combinen los circuitos mínimo y normalizado. Además, se puede observar claramente que con este circuito normalizado se pueden suprimir los divisores involucrados en los controladores. Por último si se combinan los circuitos mínimo y normalizados podemos manejar y desarrollar circuitos más compactos.

### 3.3.2.- Arquitectura de un mecanismo de inferencia fuzzy

En un sistema convencional basado en reglas, el procedimiento de inferencia relaciona las acciones (variables de entrada) con las precondiciones de las reglas, activando así a un conjunto de reglas iguales, derivando nuevas acciones para las consecuencias de las reglas activadas y repitiendo el ciclo. En la lógica difusa, continúa esencialmente el mismo ciclo excepto que todo llega a ser cuestión de grado. En otras palabras, cada regla relaciona las acciones dadas con un cierto grado de verdad. Sólo aquellos que no son iguales en todo (grado de igualdad = 0) no son activadas. Los resultados de las reglas son derivadas y combinadas para producir el grado de ajuste.

En esta sección proponemos un mecanismo de inferencia - propuesto por Zadeh en 1988- conveniente para la implementación con hardware. Esta basado en el concepto de implicaciones o reglas difusas y la composicional regla de inferencia. Una regla difusa es definida por la relación entre observación (o antecedente) y acción (o conclusión). Para un conjunto de reglas difusas la acción es deducida de una observación segura y la relación difusa que esta compuesta de las reglas.

Si A y B son subsets fuzzy representando etiquetas lingüísticas sobre el universo de discurso U y V respectivamente, entonces una regla de decisión de la forma de "IF A THEN B" es definida por funciones de miembro binarias de A y B así que:

$$\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = f \rightarrow (\mu_A(u), \mu_B(v); u \in U, v \in V) \quad (1)$$

en donde  $A \rightarrow B = \text{IF A THEN B} = \text{RELACION FUZZY}$

Más específicamente, suponiendo que  $A_1, A_2, \dots, A_N$  Son subset difusos de U y  $B_1, B_2, \dots, B_N$  son subset difusos de V, una relación difusa es definida por reglas para que:

Regla 1		IF $A_1$ THEN $B_1$
Regla 2	Else	IF $A_2$ THEN $B_2$
		⋮
Regla N	Else	IF $A_N$ THEN $B_N$

Entonces cada regla es combinada por el conectivo ELSE para producir una relación difusa R total

Sea  $R_i$  una relación difusa construida de la regla  $i$ , y valores lingüísticos  $A_i$  y  $B_i$ . el conectivo ELSE es denotado por la función FALSE entonces la relación total esta definida por:

$$\begin{aligned} \mu_R(u,v) &= \text{FALSE} \{ \mu_{i}(u,v) \} \\ &= \text{FALSE} \{ f_{\rightarrow}(\mu_{i}(u), \mu_{i}(v)) \text{ para } i=1, \dots, n \} \quad (2) \end{aligned}$$

El conectivo ELSE es interpretado como un conectivo OR en orden para derivar una relación difusa R total porque la relación R puede consistir de la regla 1, o (OR) regla 2 o (OR)... regla N, por lo tanto la relación R es denotada y definida como:

$$\begin{aligned} R &= \cup R_i \\ &= \max, f_{\rightarrow}(\mu_{i}(u), \mu_{i}(v)) \text{ para } i=1, \dots, n \quad (3) \end{aligned}$$

Suponiendo que tenemos un antecedente difuso  $A'$  y la relación total R, entonces la acción resultante  $B'$  es deducida por la regla composicional de inferencia<sup>30</sup>, es decir:

$$B' = A' \circ R \quad (4)$$

El valor de miembro de  $B'$  es calculado por el así llamado la "operación max - min" definida por:

$$\mu_{B'} = \max - \min (\mu_{A'}(u), \mu_R(u,v)) \quad (5)$$

Para responder a la discusión del procedimiento, proponemos una arquitectura de un mecanismo de inferencia difuso conveniente para la implementación con hardware

Consideremos la  $i$ -th regla de un conjunto de N reglas. Dado un antecedente (condición)  $A'$  y una  $R_i$ , la acción  $B'_i$ , es deducido y definida como sigue:

<sup>30</sup> H.J. Zimmerman: Fuzzy Set Theory - and its Applications second, revised Edition p. 146-148

$$B'_i = A' \circ R_i; A' \in U, B_i \in V, \text{ y } R_i \subset V \times V \quad (6)$$

$$\mu_{B'_i}(v) = \max_{u \in U} \min(\mu_{A'}(u), \mu_{R_i}(u,v))$$

$$= \min_{u \in U} \max[\min(\mu_{A'}(u), \mu_{A_i}(u)), \mu_{B_i}(v)]$$

$$= \min(\alpha_i, \mu_{B_i}(x)) \quad (7)$$

donde:  $\alpha_i = \max_{u \in U} \min(\mu_{A'}(u), \mu_{A_i}(u)) \quad (8)$

La operación dada por la ecuación (6) y la ecuación (7) es ilustrada en la figura 37. Entonces el máximo de  $B_1, B_2, \dots, B_N$ , determina la decisión resultante total (o acción)  $B'$ , es decir

$$B' = \cup_i B'_i \quad (9)$$

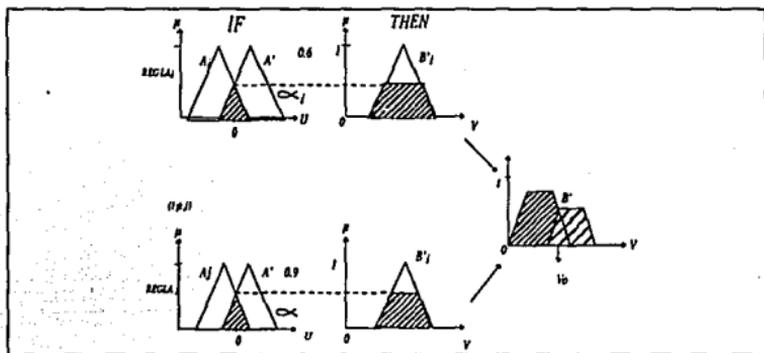


Figura 37.- Proceso de inferencia difuso.

La figura 38 muestra la arquitectura utilizada para instrumentar el mecanismo de inferencia difuso. Asumiremos que cada regla toma la forma:  $A_i$  y  $A'_i \rightarrow B_i$  (IF  $A_i$  es \_\_\_ and  $A'_i$  IS \_\_\_ THEN  $B_i$  IS \_\_\_). Es decir, cada regla tiene por lo menos dos antecedentes y una consecuencia. Las entradas son primero fuzzificadas, esto es, transformando números Crisp a números difusos. Los valores fuzzificados son  $A'_1$  y  $A'_2$ . Tanto el antecedente como la consecuencia de cada regla estarán explícitamente representados en un dispositivo de

## MODULOS FUZZY Y SUS APLICACIONES

memoria (memoria de reglas). Puesto que la implementación es estrictamente digital, ambas funciones de miembros son discretizadas a lo largo del dominio de las dimensiones "X" y "Y". En implementaciones prácticas, las dimensiones son descompuestas en 64 y 16 niveles, respectivamente. Por lo tanto cada subconjunto difuso es representado por  $64 \text{ (en X)} \times 4 \text{ (en Y)} = 256 \text{ bits}$ .

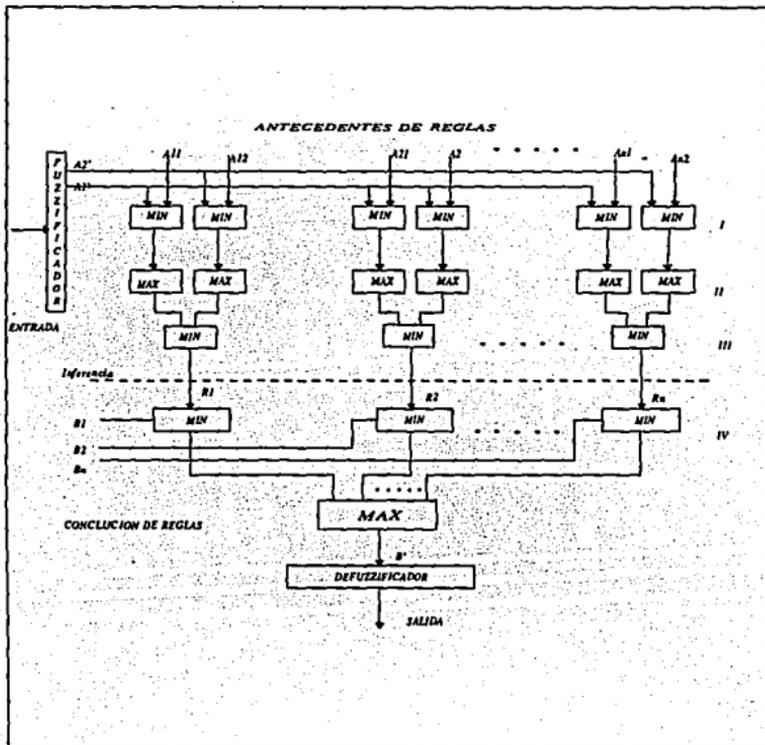


Figura 38.- Arquitectura del mecanismo de inferencia difusa.

En esta arquitectura, cada regla esta explícitamente repartida en trayectoria de datos. Cada trayectoria de datos consiste de dos vectores de unidades MIN (fila I en la fig. 38), dos vectores seriales de unidades MAX (fila II), y una unidad-escalar MIN escalar (fila III) y un vector de unidad MIN (fila IV). Si los antecedentes de las reglas contienen mas variables (en este caso, 2) más recursos de Hardware serán necesarios. Cada línea gruesa en la fig. 38 representa a un vector de 64 elementos; cada elemento solo puede tomar 16 diferentes valores (así 4-bit de ancho). Otras líneas son escalares. En los prototipos originales, estas unidades "vectores" son implementados como circuitos seriales con un contador controlando su acción. Al final, un vector grande -Unidad MAX- es necesario para combinar los resultados de las reglas individuales. Finalmente un circuito defuzzificador es necesario para convertir un número difuso en un número crisp, que entonces puede ser utilizado como la acción de control de salida. El camino para convertir un set difuso en un número crisp es a través de alguna clase de operación "promedio". Uno de los métodos más populares el Centro de Area (COA), que calcula el centro de gravedad de las funciones de miembro de los fuzzy subset resultantes. Dada una función de miembros  $\mu(x)$  que esta definido sobre el universo  $U$ , la salida "promedio" es:

$$Z = \frac{\int \mu(x) x dx}{\int \mu(x) dx}$$

Si bien este método a sido probado produciendo errores más bajos y estados más firmes que algunos otros métodos, es además computacionalmente costoso y requiere hardware extra de soporte.

### 3.4 APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA

Los trabajos pioneros de Togai, Watanabe y Yamacawa marcaron el comienzo del desarrollo de Hardware para la instrumentación de controladores difusos. Sus chip's (pastillas) diseñados para almacenar y procesar reglas difusas, despertaron el interés empresarial. La mayoría de las empresas de microprocesadores emprendieron proyectos de investigación de circuitos difusos, aunque los productos comerciales dependían en gran medida de los microprocesadores y microcontroladores comunes que los ingenieros programaban con unas pocas líneas de código de inferencia difusa. Así el mercado de pastillas específicamente diseñadas para la lógica difusa es todavía muy pequeño, pero el valor de los microprocesadores que lo incorporan ya sobre pasa los mil millones de dólares.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Bart Kosko y Saturo Isaka: Lógica borrosa, INVESTIGACION y CIENCIA, Septiembre, 1993 p. 63

## MODULOS FUZZY Y SUS APLICACIONES

Es a finales de los ochentas, cuando empiezan a aparecer procesadores difusos específicos. Omron introduce en 1989 en Japón el controlador difuso FZS000, prototipo realizado en torno al procesador analógico desarrollado por Yamakawa. El FZS000 se encarga del procesado de las reglas y la difuzificación, con una velocidad de 15 Mseg. por regla.

Togai Infralogic, Inc. desarrolla el procesador difuso digital FC110, y actualmente ofrece circuitos cuyo soporte material es el llamado "de aceleración computacional difusa" y que procesan hasta dos millones de reglas por segundo.

Los desarrollos de Togai han servido también de soporte para productos de otras empresas. Entre otras, Mitsubishi Heavy Industries, que los introduce en el sistema de control de sus nuevos acondicionadores de aire. El sistema es capaz de determinar las características térmicas de las habitaciones, el cambio de la temperatura preciso y el ajuste de temperatura y flujo de aire con objeto de minimizar los tiempos de enfriamiento y calentamiento, manteniendo la temperatura estable. Además de una notable estabilidad de la temperatura, superior a la obtenida por métodos convencionales, el nuevo sistema permite ahorrar alrededor de un 20 % de energía.

Actualmente, diversas empresas japonesas y coreanas construyen una serie de productos de consumo difusos, dotados de un control más preciso que los convencionales. Las lavadoras difusas ajustan el ciclo de lavado a la ropa colocada, modificando su proceso de lavado a medida que la limpieza progresa. Una lavadora difusa lava mejor que una máquina "boba", de ordenes fijos. En la más simple, un sensor detecta el nivel de turbulencia o claridad del agua de lavado, y el controlador estima el tiempo necesario para disolver una mancha. Algunas máquinas usan un sensor de carga, que efectúa cambios en la tasa de agitación o en la temperatura del agua; otras introducen burbujas para facilitar la disolución del detergente y de la suciedad. Con no más de diez reglas difusas, la lavadora puede exhibir una notable variedad de comportamiento.

En cámaras y videocámaras, la lógica difusa asocia datos de las imágenes a diversos ajustes de los lentes. El auto-enfoque de una de las primeras video cámaras difusas la Canon 11800, disponible desde 1990, actúa mediante trece reglas difusas. Para anular la inestabilidad de imagen que el temblor de la mano causa en sus pequeñas videocámaras

En la actualidad, la lógica difusa con frecuencia es muy utilizada para controladores; sin embargo, la tecnología esta encontrando su camino hacia otras aplicaciones:

**Computadoras.**- Empotrando ordenadores, pastillas (chips), sensores, procesador de señales, procesador de datos de información, desarrollo de software, y reconocimiento de habla.

*Transporte.- Componentes de automóviles (por ejemplo; sistemas de transmisión y frenado)*

*Militar.- Espacio - aéreo.*

*Industrial.- Robótica, reconocimiento de patrones y máquinas de visión.*

*Electrónica de consumo.- TV's, Cámaras y camcorders*

*Microelectrónica.- Máquinas y fabricación de plasmas-aguaafuerte.*

*Negocios.- Fabricación de decisiones, elevadores, sistema de calefacción y enfriamiento, máquinas copiadoras, y modelado empresarial.*

*Aparatos caseros.- Lavadoras, aire acondicionado y sistemas de calefacción.*

*Financiero.- Pronósticos, análisis, formación de decisiones, y valoraciones peligrosas.*

*Economía y Sociología.- Sistemas no-lineales.*

*Medicina y Ciencia de la Salud.- Herramientas de diagnóstico.*

*Mercadotecnia.- Herramientas de análisis y pronóstico.*

*En las tablas 5 y 6 aparecen unas pequeñas muestras de unos 30 desarrollos y aplicaciones de la lógica difusa en la industria, que cubren diversas áreas. Es de destacar el número importante de empresas del sector automovilístico, en aplicaciones como cajas de cambio automáticas, sistemas de amortiguamiento inteligentes, etc. así como el importante número de aplicaciones en procesos térmicos (control de hornos, sistemas de aire acondicionado y otros).*

### **3.5. DESARROLLO RECIENTE**

*Un proyecto de intriga, es un controlador sonoro existente para un helicóptero, desarrollado por Michio Sugeno en el Instituto Tecnológico de Tokio. El objetivo aquí es desarrollar un helicóptero que obedezca comandos sonoros similares a "rondar", "adelante", "izquierda", "hacia arriba o hacia abajo" y "descenso". El control de cada eje utiliza esencialmente algunas técnicas difusas para asegurar la estabilidad vertical, basándose en el péndulo invertido de Yamakawa.*

## MODULOS FUZZY Y SUS APLICACIONES

ORGANIZACION	APLICACION O DESARROLLO
Ishikawanna-Harima Heavy Industry	Software para control inteligente.
F.L. Smidth (Dinamarca)	Controlador difuso.
OC. Engineering	Software para control de procesos.
Obvi - Electronics	Controlador difuso (FOC-2001)
Torishi-Electronics	Controlador difuso (FZ 3000-6000).
Toshiba	Fuzzy control assembly system (IFCS).
Nisshin-Denki	Controlador difuso.
Fuji-Denki	Sistema de control difuso de uso general.
Micom	Estación de desarrollo en lógica difusa.
Heidem Sha	Controlador difuso de uso general.
OC-Engineering	Sistema de control para cementera.
Kawasaki Steel	Control de velocidad para laminados metálicos.
Daidan	Control de temperatura y humedad.
Nissan Denky	Control de sistemas de iones
Nkk	Sistema experto para el control de hornos.
Hitachi M. & Tokio Electric	Control de puesta en marcha.
Power	De centrales de potencia.
Mitsubishi Heavy Ind	Sistema de control de incineradores.
Mitsubishi Elec.	Ajuste de parámetros de PID.
Sharp	Sistema de control de aire acondicionado.
Tateishi Electric	Control de agarre en robots.
Toshiba	Automatic robot control.
Nagata Steel	Monitor para máquinas.
Nissan Aut	Sistema de control de crucero.
Hitachi Manufac	Sistema de control de elevadores.
Hitachi Manufac	Sistema de operación para trenes suburbanos.
Hitachi Japan Highway	Sistema de control del flujo de aire de túneles.
Fuji Heavy Industry	Control automático de velocidad para vehículos.
Fuji tech	Sistema de control de elevadores.
Fuji Elect	Movimiento bidimensional de robots.
Matsushita Elec.	Robots de limpieza domésticos.
Matsushita Home Appliances	Sistema de control de mezcla para lavadoras.
Mitsubishi Elec.	Sistema de control de elevadores.
Tateishi Elec. Kiusho Tech Unir	Computador difuso analógico.
Micom. Hasei Unir	Computador difuso digital.
Am. Togai Infralogic Inc.	Computador difuso digital.

Tabla 5.- Desarrollo y aplicaciones industriales de la lógica difusa<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Alfonso García Cerezo Dpto de Ing. de Sistemas y de L y S informaticos Universidad de vigo; APLICACIONES DE LA LOGICA BORROSA.

## MODULOS FUZZY Y SUS APLICACIONES

PRODUCTO	COMPAÑIA	PAPEL DE LA LOGICA DIFUSA
Control de elevadores.	Fujitec/Toshiba.	Evalúa el tráfico de pasajeros para reducir el tiempo de espera y aumenta la precisión del anuncio del carro.
Sistema de diagnóstico.	Maruman-Golf.	Selecciona el mejor club de golf para las personas.
Video camcorder.	Sony o Fisher/Canon.	Determina el mejor enfoque e iluminación cuando varios objetos están en la película.
Lavadora.	Matsushita.	Sensa cantidad y calidad de suciedad, tamaño de la carga y tipo de tejido, y ajusta el ciclo de lavado.
Aspiradora.	Matsushita.	Sensa condiciones del suelo y cantidad de polvo y ajusta la energía del motor de la aspiradora.
Calentador de agua.	Matsushita.	Ajusta elementos de la calefacción para corresponder a la temperatura y la cantidad de agua utilizada.
Aire acondicionado.	Mitsubishi.	Determina niveles de operación constantes óptimos para prevenir consumo de energía en ciclos de apagado.
Televisión.	Sony.	Ajusta brillo, color y contraste.
Computadora de mano.	Sony.	Interpreta escritura de entrada para acceso de datos.
Transmisión de automóvil.	Subary.	Sensa estilos de conducción y peso del motor para seleccionar la mejor razón de engranajes.
Programa de comercio de stuck.		Maneja cartera de acciones (stuck)

Tabla 6.- Productos que utilizan lógica difusa. <sup>33</sup>

Una serie de pilotos de helicópteros tomarón la decisión de que este manejo debería de ser totalmente manual ya que representaba un formidable problema de estabilidad. Pero fuera de esto automáticamente esta operación es en si un logro impresionante. Sugeno tiene realizadas todas las funciones para un modelo con rotor de un metro, que además funciona en un modelo de tres metros.

El progreso actual fue reportado en 1992 por IEEE en la conferencia internacional de sistemas fuzzy en San Diego California, realizada del 8 al 12 de marzo. <sup>34</sup>

<sup>33</sup> Devin Self: Designing With fuzzy logic, IEEE SPECTRUM NOVIEMBRE 1990 p.44

<sup>34</sup> Daniel G. Schwartz and George J. Klir: Fuzzy logic flowars in Japon, IEEE SPECTRUM July 1992 p. 34

### **3.6 HERRAMIENTAS FUZZY**

Actualmente, están disponibles una gran cantidad de herramientas para desarrollar y modelar sistemas de control difusos. CubiCalc, de Hyperlogic Corporation, de Escondido, California ha desarrollado una herramienta gráfica para sistemas difusos. Una aplicación basada en Windows -Microsoft-, permite al usuario introducir reglas en inglés utilizando cuantificadores como MUY, NO y ALGO. Las funciones de miembros son introducidas con un editor gráfico así que su forma puede ser especificada directamente. La salida del sistema puede ser visualizado en forma tabular o gráfica.<sup>35</sup>

Apronix's (San José, CA.) FIDE (Fuzzy Inferent Development Environment) te permite desarrollar aplicaciones basadas en lógica difusa. Corre bajo Windows en máquinas 386/486 y cuesta 1495 dólares. FIDE incluye un lenguaje de inferencia difuso, un medio ambiente standard de sistemas-fuzzy, un editor gráfico (con el que se dibujan las gráficas de las funciones de miembro), y un generador de código de tiempo real.

Otra compañía, FuziWare (Knoxville, TN), fabrica varios productos, incluyendo FuziCalc para Windows, FuziQuote, FuziCell, FuziChoice, y FuziCost. Estos sistemas son utilizados como sistemas de soporte de administración de decisiones para clientes, además de las técnicas de Software para implementar la lógica difusa como matemáticas difusas.<sup>36</sup>

Para una excelente introducción a la lógica difusa, puede ser considerado para leer -si es deseado- un equipo de educación -Kit de educación- realizado por Motorola Inc. que contiene un curso introductorio basado en una PC. Es una demostración de la versión de Apronix Inc's y desarrolla una inferencia difusa (FIDE), y una colección de herramientas para el desarrollo de sistemas difusos. La información adicional del Kit puede ser obtenida por escrito a Fuzzy logic, Box 600, Mail Drop F30, Avitin, Texas 78762.<sup>37</sup>

Otros vendedores de productos con lógica difusa incluyen los siguientes. Omron (Kyoto, Japan), Togai Infralogic (Irvine CA), National Semiconductor (Santa Clara, CA) y Neura Logic (Sanford, FL).

---

<sup>35</sup> AI EXPERT, NOVEMBER 1993 p. 12

<sup>36</sup> Janet J. Barron: Putting Fuzzy Logic into Focus; April 1993, BYTE p.111

<sup>37</sup> Earl Cox: Fuzzy Fundamentals; IEEE SPECTRUM OCTUBRE 1992 p. 61

---

## CONCLUSIONES

*La lógica difusa es una teoría que nos permitira descubrir nuevos horizontes plegados de aplicaciones nunca antes imaginadas.*

*Es una tecnología impaciente que esta esperando ser tomada, aprendida y explotada; para proporcionarnos beneficios jamás alcanzados con otras tecnologías.*

*La meta de la lógica difusa es simplificar aplicaciones complicadas y eliminar herramientas costosas, lenguajes complejos, procesos y cantidades enormes de matemáticas lógicas. Su gran simplicidad de implementación puede reducir diseños complejos hasta el punto de llegar a resolver problemas antes insolubles.*

*La lógica difusa compite con nuestra habilidad para razonar y hacer uso de datos aproximados para encontrar soluciones precisas. Así cuando los diseñadores carezcan de herramientas matemáticas que determinen el comportamiento de un sistema a los estímulos que reciba, puede ser que esta nueva teoría sea capaz de gobernar o de describir el sistema por medio de reglas "de sentido común" que se refieran a cantidades indefinidas.*

*En el presente trabajo se han introducido los conceptos básicos de la lógica y el control difuso, se ha presentado -por primera vez- una metodología de diseño sencilla y eficiente que aplicada con orden puede ahorrar tiempo y ayudar a evitar problemas en el desarrollo de sistemas difusos; además, se han introducido circuitos para la instrumentación de controladores difusos y se ha dado una panorámica general de la utilización de esta técnica en la industria.*

*En la actualidad se mantiene un claro dominio de la industria Japonesa, por encima del 80% del total del desarrollo y aplicaciones realizadas hasta el momento. Sin embargo, en el resto del mundo existe una gran renuncia para utilizar esta tecnología, la cual terminara hasta que alguien demuestre en el mercado mundial que ésta puede funcionar también como una PC. Cuando esto suceda la tecnología será tomada por los países como en Japón. En México por ejemplo, esta tecnología se hará popular cuando alguien demuestre la utilidad del control difuso en áreas donde otros métodos fracasan o no existen; y solo la gente que este bien preparada en este campo podrá hacerlo efectivo.*

*En México al igual que en otros países, la lógica difusa seguirá su camino lleno de críticas y obstáculos tecnológicos y financieros. Sin embargo mientras la gente se pone de acuerdo en si es o no conveniente la utilización de este tipo de control; debemos de desarrollar aplicaciones sobresalientes que nos ayuden a convencer a los demás para que se le de impulso a esta nueva tecnología aquí en México.*

## BIBLIOGRAFIA

- *Fuzzy Logic Flowers in Japan*  
Daniel G. Schwartz and George J. Klir.  
*IEEE Spectrum*, Juli 1992
- *Fuzzy Logic Finally Gains Acceptance in The U.S.*  
Richard Nass  
*Electronic Design*, June 25 1992
- *Putting Fuzzy Logic Into Focus*  
Janet J. Barron  
*Byte*, April 1993
- *Special Tools and Chips Make Fuzzy Logic Simple*  
Gary Legg  
*Edn-Technologic Feature: Integrated Cirwits*
- *Designing With Fuzzy Logic*  
Deyin Self  
*IEEE Spectrum*, Novemberf 1990
- *A Clear Vision of Fuzzy Logic*  
Nick Infelise  
*Omron Electronics, Inc. Technical Center, Schaumburg, III*  
*Control Engineering*, June 1992
- *Fuzzy Logic is Clearly Here to Stay*  
Frank J. Bartos  
*Omron Electronics, Inc. Technical Center, Schaumburg, III*  
*Control Engineering*, July 1992
- *Fuzzy Fundamentals*  
Earl Cox  
*IEEE Spectrum*, October 1992
- *Fuzzy Logic Basics: Instuitive Rules Replace Complex Math*  
David I. Brubaker  
*Edn-Design Feature*

- *Fuzzy Logic and its Application in Control Systems*  
Pat Murphy  
Omron Electronics, Inc Technical Center, Schaumburg Ill  
ISA 1991.
- *Fuzzy Logic In C*  
Greg Viot  
Dr Dobb's Journal, February 1993.
- *Fault-Tree Analysis By Fuzzy Probability*  
Hided Tanaka, L.T. Fan, F.S. Lai, and K. Toguchi  
IEEE Transactions on Reliability, vol R-32 No 6, December 1983
- *Fuzzy Methodologies For Interactive Multicriteria Optimization*  
L.F.B. Baptistella and Anibal Ollero  
IEEE-Transactions on Systems, Man, and Cybernetics  
Vol SMC-10, N.7, July 1980
- *Fuzzy Decision Analysis*  
Stephen R. Watson, Jonathan J. Weiss, and Michael I. Donnell  
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics  
Vol Sml-9, No 1, January 1979.
- *Fuzzy Sets and Decision Analysis*  
Anthony N.S. Freeling  
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics  
Vol SMC-10, No 7, July 1980.
- *Learning Rules For a Fuzzy Inference Model*  
Luis M. de Campos and Serafin Mora  
Dpto de Ciencias de la computacion E.I.A.  
Unibersidad de Granada Spain. Revisa January 1993
- *Knowledge-Based Networks in Classification Problems.*  
Kadrn Hirota  
Elsevier Science Publisher; March 1993
- *Ordering, Distance and Closeness of Fuzzy Sets*  
Laszlo T. Koczy  
Elsevier Science Publisher; April 1993

- *Implementing Fuzzy Expert Rules in Hardware*  
James M. Sibigtroth  
Artwork: Tib/West/Hans Neleman 1992
  
- *Design of a Fuzzy Controller With Normalization Circuits*  
Okihiko Ishizuka, Koichi Tannd. Zheng Tang and Hiroki Matsumoto  
IEEE Spectrum, 1992
  
- *Optimization of Fuzzy Logic Implementation*  
Tzi-Cker Chiveh  
IEEE Spectrum, 1991
  
- *Analysis and Design of Analog Cmos Building Blocks for integrated Fuzzy Inference Cirwits*  
Takahiro Inove, Fumid Veno, Tetsvo Motomura, Ryoko Matsud, and Osamu Setoguchi  
IEEE Spectrum, 1991
  
- *Advance Fuzzy Logic Control Technologies in Automotive Applications.*  
C. Von Altrock, B. Krause and H. J. Zimmermann  
IEEE Spectrum, 1992, February.
  
- *An Applications of Fuzzy Logic and Dempster-Shafer Thedry to Failure Detection and Identification*  
H. Kang J. Cheng J. Kim and C. Vachisevanos  
IEEE Spectrum, July 1991
  
- *Intelligente Fire Warning System Applying Fuzzy Theory*  
Shinji Nakanishi, Junji Nomura, Takashi Kurio and Mayumi Kaneda.  
IEEE Spectrum, September, 1991
  
- *Fuzzy Logic*  
Edgar Sanches Sinencio  
Artificial Neural Networks, ART 1.13, 1992
  
- *Perfurmance Evaluation of a Seif-Tuning Fuzzy Controller*  
Walter C. Daugherity, Balaji Rathakrishan and John Yen  
Texas A & M University, Tecnical Report, March 1992
  
- *Introduction to Fuzzy Control*  
Reza Langari and John Yen

ESTA TERCIA NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Texas A & M University, December 2, 1992

- *Fuzzy Systems Are Universal Approximators*  
Li-Xin Wang  
IEEE February 1992
- *Knowledge Representation in Fuzzy Logic*  
Lotfi a Zadeh  
IEEE, 1989
- *Application of a Fuzzy Logic Controller to the Inverted Pendulum Problem*  
Ivan Berrios, Vance Q. Harral and Oscar Moreira-Tamayo  
Texas A & M University ME/CS 689 Design Project  
Spring, 1993
- *Logica Borrosa*  
Bart Kosko y Satdru Isaka  
Investigación y Ciencia, Septiembre, 1993
- *Control Difuso: Aplicaciones Muy Diversas*  
Laura Tremusa  
Automatica e Instrumentación, Noviembre 1991
- *Aplicaciones Actuales de la Logica Borrosa*  
Alfonso Garcia Cerezo  
L. y S. Informatica, Universidad de Vigu
- *Fuzzy Sets Theory and its Applications*  
H. J. Zimmermann  
Kluwer Academic Publishers
- *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*  
George J. Klir and Tina A. Folger  
Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Sersey 07632
- *Fuzzy Logic*  
Daniel Mcneil and Paul Friberger  
Simon & Schuster
- *Fuzzy Expert Systems*

*Abraham Kandel*  
**CRC PRESS.**

- *Fuzzy Control Systems*  
*Abraham Kandel and Gideon Langhdiz*  
**CRC PRESS.**

- *Neural Networks and Fuzzy Systems*  
*Bart Kosku*  
*Prentice Hall, Englewood Clifs, NJ 07632*