CAPITULO 1

INTRODUCCION.

En los últimos años hemos sido testigos del vertiginoso avance de las computadoras que están llegando a ser, cada vez más, parte de la vida diaria. Muchas de las actividades de nuestra sociedad actual han sido mejoradas o estimuladas por la introducción de las computadoras. Actualmente no importa lo que se haga, los sistemas de procesamiento de información están involucrados. Sin embargo, una parte importante de la automatización son "las redes y las comunicaciones de datos" las cuales son los instrumentos usados para conectar computadoras/terminales para el procesamiento e intercambio de información. Es decir, se ha producido una sinergia entre la informática y las comunicaciones de datos tan grande, que ha estado produciendo cambios tan dramáticos e impactantes.

Por otro lado, el gran avance en las computadoras ha despertado y estimulado, uno de los sueños que, durante mucho tiempo; el ser humano más ha anhelado: llegar a construir máquinas que puedan pensar y actuar por sí mismas. Sin embargo a pesar de los esfuerzos realizados esto no ha sido posible; pero las computadoras actuales han dado grandes esperanzas de poder alcanzar esta meta. Sin embargo, a pesar de los múltiples esfuerzos y de profundas y tenaces investigaciones, poco se ha avanzado. Pero ha pesar de todo, el anhelo y los esfuerzos continúan, fortaleciendo a la ciencia de la inteligencia artificial.

Debido a la introducción de computadoras para reforzar los sistemas de información en múltiples y diversas áreas de la actividad humana, y en especial la sinergia que se está produciendo entre la informática y las comunicaciones, este anhelo de inteligencia se está transmitiendo hacia estas áreas con paso firme y constante. Actualmente nos encontramos con la necesidad de incrementar la inteligencia no sólo de las computadoras en sí, sino también de los sistemas de información en general, y especialmente de los diversos procesos que se llevan a cabo o que son automatizados por medio de computadoras. Para lograr el propósito anterior, se han creado un sinnúmero de teorías y técnicas inteligentes, algunas de las cuales son las redes neuronales, los algoritmos genéticos y la lógica difusa.

Las técnicas indicadas anteriormente, se diferencian de las técnicas tradicionalmente usadas en que tratan de imitar el proceso del razonamiento humano. Se ha señalado que las computadoras no razonan como lo hacen los cerebros. Las computadoras razonan en pasos claros con declaraciones que son cadenas de ceros o unos. Nosotros razonamos con términos vagos del sentido común tales como "el aire está frío", o "la velocidad es alta" o "él es joven". Estos hechos oscuros o difusos son solamente verdaderos o falsos en cierto grado para 0 y 1. Los cerebros trabajan con estos patrones difusos con facilidad y las computadoras no pueden trabajar con esto en absoluto. La lógica y la ingeniería difusa es un intento por cambiar esto. Su objetivo básico es proporcionar un medio para que la computadora pueda manejar estos conceptos difusos.

Los investigadores han llegado a la misma conclusión: las computadoras no logran simular el razonamiento de los humanos porque estas están facultadas para trabajar con matemáticas precisas, mientras el mundo real está lleno de imprecisión e incertidumbre. Y han enfrentado este dilema desde dos puntos de vista. Uno es asumir que el problema está en el método de control, y por tanto la solución es aplicar más matemática. El otro punto de vista consiste en aceptar que la matemática es el problema, y es allí donde aparece la lógica difusa. En efecto, la lógica difusa encuentra que en el mundo real son muy escasos los conjuntos no difusos o convencionales. Este es el asunto sobre el cual nos ocuparemos en esta Tesis.

1.1.- El objetivo de esta Tesis.

El objetivo principal al escribir esta Tesis, es estudiar las aplicaciones de la lógica difusa en las telecomunicaciones de datos; por lo tanto, este proyecto de Tesis constituye una propuesta que pretende presentar los fundamentos de la lógica difusa en general y las aplicaciones realizadas en el campo de las telecomunicaciones de datos en particular. Esta ciencia, es relativamente nueva, y su investigación ha experimentado un impulso sin precedentes en los últimos años, de tal manera que ha crecido tanto a un nivel teórico como en aplicaciones prácticas, desarrollándose numerosas aplicaciones de esta técnica.

Esta Tesis pretende dar no solo una introducción a la teoría de la lógica difusa, sino también dar una estimación del valor y utilidad prácticas de esta técnica así como mostrar y discutir diversas aplicaciones realizadas en el campo de las telecomunicaciones de datos, y realizar una comparación con las aplicaciones ya existentes.

1.2: ¿Porqué lógica difusa?

Al momento de empezar a leer esta Tesis, la primera pregunta que podría surgir de la mente de los lectores podría ser algo como ¿porqué escribir una Tesis acerca de la lógica difusa? Esta pregunta puede ser válida si se considera la cantidad de libros y publicaciones existentes que estudian la ciencia de la lógica difusa; sin embargo, muy pocos de ellos se enfocan a las aplicaciones específicas; y en especial, contados son las publicaciones que se enfocan a las aplicaciones sobre las telecomunicaciones de datos. Por otro lado, los principales motivos que me llevan a escribir esta Tesis sobre lógica difusa son primeramente el interés personal en las cuestiones referentes a la inteligencia artificial, temas que desde hace mucho tiempo han acaparado mi atención y mi tiempo, y que considero un área científica que promete mucho, aunque hasta hoy pocas expectativas se hayan cumplido.

Además, la lógica difusa presenta un enorme atractivo en especial, atractivo que está basado en lo controvertido de los conceptos que involucra el estudio de la lógica difusa, como lo son la incertidumbre, la verdad parcial y el razonamiento con información vaga o incompleta; conceptos que representan un enorme reto para todo investigador o persona interesada en su estudio. Por consecuencia, la lógica difusa significa una revolución para el pensamiento occidental, tan acostumbrado a pensar en forma aristotélica o bivalente, y el gran paradigma

que esta revolución de enfoque puede crear, o está creando en la forma de ver y representar el pensamiento humano y la realidad.

Por último, los grandes logros que la lógica difusa ha obtenido en aplicaciones prácticas a pesar de la adversidad que ha encontrado su aceptación entre la comunidad científica. En los últimos años recientes la lógica difusa ha llegado a ser una de las herramientas estándares para los ingenieros, científicos y profesionales no solamente de la inteligencia artificial, quienes la han aplicado en sistemas expertos, control, robótica y reconocimiento de patrones; sino también para cualquier profesional que desee implementar una técnica que mejore sus implementaciones tradicionales en casi cualquier área que se pueda imaginar.

1.3: ¿Qué contiene esta Tesis?

Como ya mencionamos anteriormente, esta Tesis pretende realizar un estudio de la teoría de la lógica difusa en general, y de las aplicaciones con lógica difusa en particular, destacando aquellas aplicaciones realizadas en el campo de las telecomunicaciones de datos. Para poder lograr este objetivo, empezaremos estableciendo la necesidad de introducir la inteligencia en los diversos procesos relacionados con las comunicaciones de datos, esto se llevará a cabo en el capítulo 2. Daremos enseguida una breve reseña sobre el origen y evolución de esta ciencia, esto será realizado en el capítulo 3.

Después daremos una introducción a la teoría de la lógica difusa, señalando los principios teóricos sobre los que descansa, esto será llevado a cabo en el capítulo 4. Enseguida realizaremos una estimación del valor y utilidad prácticas de esta técnica, mostrándola como una técnica factible y apropiada para diversos objetivos lo cual realizaremos en el capítulo 5. Una vez realizado todo lo anterior, finalmente podremos mostrar y discutir diversas aplicaciones ya realizadas en el campo de las telecomunicaciones de datos, y llevar a cabo un estudio comparativo con las aplicaciones ya existentes realizadas con técnicas tradicionales, esto será llevado a cabo en el capítulo 6. Para terminar, el capítulo de las conclusiones acerca del contenido de esta Tesis, el cual contiene comentarios generales y sugerencias para trabajos posteriores.

1.4: Contribución académica.

Esta Tesis está basada en el trabajo realizado por el autor al investigar el material científico disponible así como las tendencias tecnológicas contemporáneas, aunque las ideas expuestas en esta Tesis ya han sido expresadas con anterioridad, este documento constituye un trabajo original en el sentido de la recopilación, redacción y orden lógico de presentación de la información e ideas contenidas en este documento. Además, se presentan algunas simulaciones matemáticas que acompañan este proyecto, con el objetivo de dar una visión de la forma en que trabajan algunas de las técnicas expuestas.

Por último, tenemos la confianza de que esta Tesis contribuya a estimular el estudio e investigación tanto de la inteligencia artificial en general, como de la lógica difusa en particular, de tal forma que pueda ser creada una base teórica lo suficientemente robusta y plena que sirva de plataforma para mejorar diversas aplicaciones tanto de las ciencias de cómputo como de las telecomunicaciones, expandiendo así los métodos y técnicas inteligentes a otras áreas de automatización y control.

CAPITULO 2
LAS COMUNICACIONES DE DATOS.

Durante la década de los 1970s a 1980s se llevó a cabo una mezcla entre las ciencias de cómputo y de las comunicaciones de datos, hecho que ha cambiado radicalmente la tecnología, productos y compañías; de tal manera que actualmente se ha creando una nueva industria, sobre la base de la combinación de la computación y las telecomunicaciones. Aunque las consecuencias de esta revolucionaria mezcla todavía se están produciendo, por lo que cualquier investigación en el campo de las comunicaciones de datos debe de ser hecha dentro de este contexto. Es decir, lo que se innove en una, influirá a la otra y viceversa. Por lo tanto, las investigaciones acerca de la inteligencia artificial, desarrolladas alrededor de la ciencia de la computación, también están alcanzando a las comunicaciones de datos, encontrando diversas aplicaciones.

Por lo anterior, en este capítulo vamos a establecer algunos de los términos y principios generales de las comunicaciones de datos, los elementos que conforman un modelo de comunicaciones y los aspectos y tareas que involucra un sistema de comunicación; una vez mostrado lo anterior, estableceremos la necesidad de implementar la inteligencia en los procesos que tienen lugar en las comunicaciones de datos, veremos algunas de las técnicas usadas para lograr tal efecto, y señalaremos el lugar que la lógica difusa ocupa en la ciencia de la inteligencia artificial y del soft-computing.

2.1 La importancia de la información.

En cualquier entidad, ya se considere a un individuo o a una organización; existe una necesidad de información tanto para sus funciones de control como de comunicación, y sobre la base de esta, dicha entidad podrá generar patrones, pensamiento y aprendizaje. Para que esto pueda ser llevado a cabo, la información debe de ser creada, procesada y representada en un medio ambiente de sistemas biológicos y sociales interconectados. Por lo tanto, debe de existir un mecanismo de administración de información. La meta básica de este mecanismo de la administración de información es enganchar los recursos y las capacidades de información de una entidad (individuo u organización) a fin de habilitarla para aprender y adaptarse a su medio ambiente cambiante.

Este proceso de aprendizaje empieza cuando la información es creada por las acciones de la entidad (conducta adaptable). Estas acciones interactúan con aquellas de otras entidades y sistemas para modificar el medio ambiente, generando nuevos mensajes e información. Aquí se introduce entonces una *identificación de las necesidades de información*, en donde las entidades (miembros u organizaciones) reconocen lo volátil del medio ambiente, y buscan información acerca de sus características salientes a fin de ser capaces de comprender la situación, y tener la información necesaria para tomar decisiones y resolver problemas. Las necesidades de información son definidas por los requerimientos sujeto - materia así como

contingencias determinadas por situaciones, algunas clases de problemas son mejor manejados con la ayuda de ciertos tipos de información.

Una vez identificadas las necesidades de información de una entidad, surge entonces el proceso de la adquisición de información, la cual es manejada por las necesidades de información, y debe de consignar adecuadamente esas necesidades. Planear para la adquisición de información ha llegado a ser una función compleja. La fragmentación del esfuerzo humano en bolsas de especialización ha llevado a una proliferación de servicios y fuentes de información que proveen a estos nichos de mercados. Al mismo tiempo, aumentan las organizaciones que requieren de tratamiento a profundidad de aspectos seleccionados que son estratégicos para su crecimiento y supervivencia. Las fuentes existentes tienen que ser constantemente evaluadas, las fuentes nuevas tienen que ser estimadas, y el apareamiento de las fuentes a las necesidades tienen que ser regularmente reexaminadas.

Una vez que una entidad procede a la adquisición de información, entonces surge el aspecto del almacenamiento y organización de la información, el objetivo es crear una memoria de la entidad que sea el depósito activo de mucho del conocimiento y de la experiencia de dicha entidad. El volumen de datos producidos y coleccionados por una entidad necesita estar en una estructura dada de forma que refleje los intereses y los modos de uso de la información de una entidad (tanto a un nivel individual como de organización). La tecnología de información puede aumentar la eficiencia y la confiabilidad de las actividades operacionales de una entidad. Las políticas de administración de información integrada aseguran que la información significativa con respecto al pasado y presente de una entidad sea preservada y hecha disponible para el aprendizaje de tal entidad.

Después de que la información es adquirida y organizada, esta información adquirida y la información de la memoria deben de ser empacadas en dos diferentes niveles que son: los servicios y los productos de información los cuales deben de ser enfocados a grupos de usuario diferentes y de acuerdo a las necesidades de información en la organización. Esto no significa reempacar pasivamente los datos de entrada. Los servicios y productos de información tienen que agregar valor al realzar la calidad de información y mejorar lo apropiado entre la información y las necesidades o preferencias de los usuarios.

Enseguida, surge el aspecto de la distribución de información cuya meta es aumentar el uso de información compartida. El uso de información compartida en forma extendida cataliza el aprendizaje de una organización. El compartir información también crea nuevas penetraciones y conocimiento acerca de problemas o situaciones difíciles. A los usuarios finales se les debe de dar la mejor información disponible para realizar su trabajo, y la información debe de ser entregada a través de canales y modos que concuerdan bien con los patrones de trabajo de los usuarios.

El uso de información es la creación y aplicación del conocimiento a través de procesos de interpretación y toma de decisiones. El uso de la información para la interpretación involucra la construcción social de la realidad, y la representación y entrega de información y debe de soportar la interacción multinivel del discurso social. El uso de información para la toma de decisiones involucra la selección de alternativas, y provisión de información y el contenido debe de acomodar la cinética y naturaleza no lineal del proceso de decisión.

El concepto de la administración de información como un ciclo de actividades de información interrelacionadas a ser planeadas, diseñadas y coordinadas, proporciona una perspectiva basada en procesos que complementa las visiones más convencionales de la administración de información como administración de tecnología de información o administración de recursos de información. El modelo del proceso de la administración de información debe de abarcar la cadena total de valores de la información, empezando con la identificación de las necesidades de información, moviéndose a través de la adquisición de información, organización y almacenamiento, productos y servicios, distribución, y cerrando el ciclo con el uso de la información.

Los marcos de administración de información no siempre incluyen uso de información e identificación de necesidades. Aunque el análisis de necesidades puede ser uno de los procesos más descuidados de la administración de información, la calidad de la información que el usuario recibe es altamente dependiente de que tan bien las necesidades han sido comunicadas. Similarmente, el uso de la información es un componente esencial, debido a que el entendimiento de como la información es usada (o no usada) para tomar decisiones, solucionar problemas, o interpretar situaciones, es esencial para un mejoramiento continuo de los otros procesos de administración de información.

2.2 La necesidad de la comunicación.

La comunicación de la información es el proceso por el cual la información de diferentes fuentes es diseminada y compartida. Una distribución más amplia de la información puede redituar muchas consecuencias positivas: el aprendizaje de una organización llega a ser más general y más frecuente; la recuperación de la información llega a ser más probable; y nueva información puede ser creada al juntar pedazos sueltos. La comunicación y el compartir información es una pre-condición necesaria de la percepción e interpretación.

El objetivo de la comunicación es compartir información, y el objetivo de compartir es habilitar la información de múltiples fuentes y procesada por múltiples usuarios para ser sintetizada para generar ideas más profundas. De hecho, las *diferencias* en la información de distintos lugares es procesada para crear una cualitativamente nueva clase de información: la información con profundidad. Es decir, una "profundidad" extra puede siempre ser obtenida al combinar información de múltiples descripciones que son reunidas y codificadas de diferentes formas.

La comunicación de información puede inducir la creación de nuevo conocimiento. Ya que la comunicación puede superar la barrera entre las fuentes de información y los usuarios, creándose retroalimentaciones que permiten complementar, mejorar o aumentar un determinado conocimiento.

Tanto las personas como las organizaciones, van adquiriendo experiencias y conocimientos relacionadas con diversos temas o asuntos, y esta información puede ser transmitida a otros en forma oral o escrita. Quienes la reciben, además de escucharla o leerla, pueden crear nuevos

mensajes, responder a preguntas, añadir comentarios, sugerir interpretaciones, discutir tópicos especiales y así por el estilo. Múltiples perspectivas, representaciones y discusiones son probables que surjan y que reflejen los diferentes conocimientos y experiencias de aquellos quienes la reciben. Las diversas discusiones pueden ser resumidas produciendo un nuevo conocimiento o interés especial. Los resúmenes de las diversas discusiones originadas por una nueva información pueden ser nuevamente comunicados, o empacados en nuevos productos de información. Empezando así, una vez más, todo el proceso anteriormente descrito.

2.3: Aspectos que involucra la comunicación.

A continuación vamos a incluir una breve descripción de un modelo general de comunicaciones, indicando las principales partes de que se compone. Indicando a grandes rasgos en que consiste cada una de ellas, para después introducir los desafíos y tareas técnicas que involucra todo el modelo de comunicaciones.

2.3.1: Un modelo básico de comunicaciones.

El propósito fundamental de un sistema de comunicaciones es intercambiar datos entre dos partes. Como ejemplo de esto se tiene la comunicación entre una estación de trabajo y un servidor sobre una red telefónica pública. Otro ejemplo es el intercambio de señales de voz entre dos teléfonos sobre la misma red. Los elementos claves del modelo son:

Fuente: este dispositivo genera los datos a ser transmitidos; ejemplos son los teléfonos y las computadoras personales.

Transmisor: usualmente, los datos generados por un sistema fuente no son transmitidos directamente en la forma en la cual fueron generados. En su lugar, un transmisor transforma y codifica la información de tal forma que produce señales que pueden ser transmitidas a través de alguna clase de sistema de transmisión. Por ejemplo, un módem toma un flujo de bits digitales desde un dispositivo enlazado tal como una computadora personal y transforma ese flujo de bits a una señal analógica que puede ser manejada por la red telefónica.

Sistema de Transmisión: este puede ser una sola línea de transmisión o una red compleja conectando el fuente y el destino.

Receptor: el receptor acepta la señal desde el sistema de transmisión y lo convierte a una forma que pueda ser manejada por el dispositivo destino. Por ejemplo, un módem aceptará una señal análoga viniendo de una red o línea de transmisión y la convierte a un flujo de bits digital.

Destino: toma los datos de entrada desde el receptor.

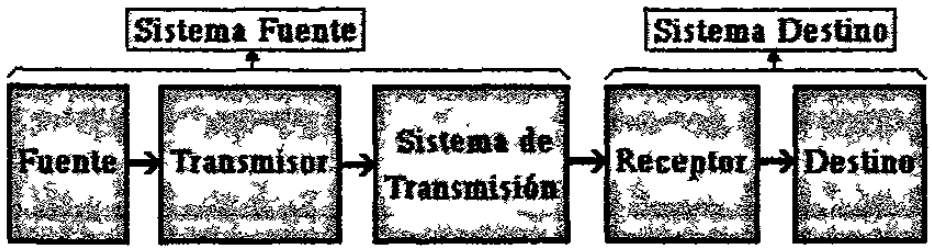


Figura 2.1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación.

2.3.2: Tareas realizadas en un sistema de comunicaciones.

La sencilla descripción anterior acerca de un modelo de comunicaciones, oculta una abundante complejidad técnica, para tener una idea del alcance de esta complejidad a continuación señalaremos algunas de las tareas clave que deben de ser realizadas dentro de un sistema de comunicaciones de datos. Las lista de tareas que vamos a presentar no es absoluta, sino más bien arbitraria, existen mucho más elementos que pueden ser agregados, mezclados o realizados en diferentes niveles dentro del sistema, sin embargo, la consideramos apropiada como introducción.

a) la utilización del sistema de transmisión: se refiere a la necesidad de hacer un uso eficiente de las facilidades de transmisión que están típicamente compartidas entre un número de dispositivos de comunicación. Varias técnicas son usadas para permitir la capacidad total de un medio de transmisión entre un número de usuarios.

b) La interfase: para que un dispositivo pueda comunicarse debe de tener una interfase con el sistema de transmisión.

c) La generación de señal: se requiere para la comunicación, la señal debe de tener ciertas propiedades tales como forma e intensidad, de tal manera que sea capaz de ser propagada a través del sistema de comunicación y que sea interpretada como datos en el receptor.

d) La sincronización: el receptor debe de ser capaz de determinar cuando empieza una señal y cuando termina. Y debe de saber la duración de cada elemento de señal.

e) La administración de intercambio: si los datos son intercambiados en ambas direcciones en un periodo de tiempo, las dos partes deben de cooperar. Para esto, ciertas convenciones deben de ser decididas, estas convenciones pueden incluir si los dispositivos pueden transmitir simultáneamente o deben de turnarse, la cantidad de datos a ser enviados a la vez, el formato de los datos, y que hacer en caso de contingencias como la aparición de errores.

f) La detección y corrección de errores: en todos los sistemas de comunicaciones existe un potencial de presencia de errores, las señales transmitidas pueden ser distorsionadas en cierto grado antes de alcanzar su objetivo.

g) El flujo de control: se requiere para asegurar que el fuente no sobrecargue al destino al enviar datos más rápido de lo que puede ser procesado y absorbido.

h) La dirección y la ruta: cuando una facilidad de comunicación es compartida por más de dos dispositivos, el sistema fuente debe de indicar de alguna forma el destino deseado. El sistema de transmisión debe de asegurar que solamente el sistema destino reciba los datos. Y además se debe de elegir el camino a través de la red del sistema de transmisión.

i) La recuperación: las técnicas de recuperación son necesarias en situaciones donde el intercambio de información es interrumpido debido a una falla en algún lugar del sistema. Su objetivo es ser capaz de resumir la actividad en el punto de la interrupción o por lo menos restaurar el estado del sistema a las condiciones antes del inicio del intercambio de información.

j) El formato de los mensajes: se refiere a la forma en que los datos deben de ser intercambiados o trasmitidos y debe de ser en mutuo acuerdo entre transmisor y receptor.

k) La seguridad: se debe de asegurar que solo el receptor reciba los datos, y asegurar que los datos recibidos por el receptor no sean modificados a través de su transitar por el sistema de comunicación y asegura que los datos vengan realmente del supuesto transmisor.

l) La administración de red: se necesita para configurar el sistema, monitorear su estado, reaccionar ante fallas y sobrecargas, y planear inteligentemente el crecimiento futuro.

2.3.3 Expandiendo el modelo de las comunicaciones de datos.

En su forma más simple, las comunicaciones de datos tienen lugar entre dos dispositivos directamente conectados por algún tipo de medio de transmisión. Sin embargo, esto con frecuencia es impráctico por alguna de las siguientes causas:

a) Los dispositivos a conectar están muy apartados, y resultaría extraordinariamente caro establecer un enlace directo entre ambos dispositivos.

b) Existen numerosos dispositivos, cada uno de los cuales puede requerir un enlace con cada uno de los otros dispositivos, lo cual resultaría también excesivamente caro establecer un enlace para cada par de dispositivos.

La solución a este problema es unir cada dispositivo a una red de comunicaciones, estas redes de comunicaciones están clasificadas generalmente en dos grandes categorías:

1) Redes de área amplia: son aquellas que cubren una amplia área geográfica.
2) Redes de área local: su alcance geográfico es pequeño o reducido.

Con esto, las tareas realizadas dentro de un sistema de comunicaciones se complican aún más, por lo que resulta indispensable introducir diferentes técnicas para mejorar cada una de las actividades involucradas en las comunicaciones de datos. que hemos mencionado.

Como se puede ver, de la simple idea de un sistema de comunicaciones de datos, se pasa a una lista formidable de tareas necesarias para que tal sistema funcione y tenga lugar. Estas tareas pueden y han sido mejoradas mediante técnicas de inteligencia artificial, para lograr una mejor eficiencia y aprovechamiento de los recursos disponibles. Una de esas técnicas es la lógica difusa, cuyas aplicaciones analizaremos y estudiaremos a lo largo de esta Tesis.

En las siguientes secciones de este capítulo, daremos una breve reseña de la inteligencia involucrada en las comunicaciones y de la inteligencia artificial en general; los motivos que dieron origen a esta y otras técnicas, y el lugar que ocupa la lógica difusa dentro de la inteligencia artificial.

2.4 La inteligencia en las comunicaciones de datos.

Las tecnologías de comunicación soportadas por computadora tienen un valor agregado. Hacen posible intercambiar la información en forma muy rápida, simple y confiable, tal que la información es automáticamente almacenada y está lista para su procesamiento o transferencia inmediata. La implicación práctica es que los canales de información entre localidades lejanas llegan a ser tan flexibles y directas que nos recuerdan los nervios, que conectan y controlan las diferentes partes de un organismo.

Además, en las comunicaciones, existe el aspecto de un control incrementado sobre la información. Esto es especialmente obvio con las herramientas de información que ofrecen alguna clase de inteligencia adicional al usuario, con las siguientes características:

1) todo lo derivado de la inteligencia artificial y de sus campos relacionados, tales como sistemas expertos, aprendizaje de máquinas y redes neuronales, donde ciertos procesos cognitivos son automatizados y entonces llevados al usuario.

2) las diferentes herramientas que ofrecen mejores formas para organizar y representar la información o el conocimiento, por ejemplo, permitiendo que el usuario construya modelos útiles. Esta categoría incluye todos los tipos de simulación (v.g. la realidad virtual), las herramientas de representación del conocimiento, el hipertexto y multimedia, las bases de datos y la recuperación de información.

Las dos características anteriores, de inteligencia y modelaje son mezcladas en lo que puede ser llamado el "conocimiento estructurado": el uso de programas de computadoras que reorganizan modelos a fin de hacerlos más adecuados, más correctos, más simples, más ricos, y más fácil de usarlos.

2.5 Técnicas inteligentes empleadas en las comunicaciones.

En esta sección, nos concentramos en dar una visión de lo que ha sido la inteligencia artificial, sus orígenes, las vicisitudes de su desarrollo y el estado actual en que se encuentra.

2.5.1: Inteligencia Artificial.

Cuando las computadoras hicieron su aparición, y los científicos se dieron cuenta de que podían realizar algo más que simples cálculos aritméticas, se produjeron grandes esperanzas de haber encontrado al fin un medio ideal para crear inteligencia, y estas esperanzas se vieron fortalecidas por los primeros éxitos obtenidos; los años comprendidos de 1952 a 1969 fueron de intensa investigación y de grandes expectativas.

Sin embargo, mientras los científicos estaban inmersos en un gran optimismo, la realidad mostraba otra cara. Ciertamente que tomando en consideración lo primitivo de las computadoras y de las herramientas de programación, los éxitos fueron muchos y considerables, sin embargo, también eran muchos los obstáculos a los que se debía de enfrentar la investigación, lo que daba por resultado que los métodos que se demostraban que funcionaban en varios ejemplos sencillos, fallaban rotundamente cuando se utilizaban en problemas más variados o de mayor complejidad.

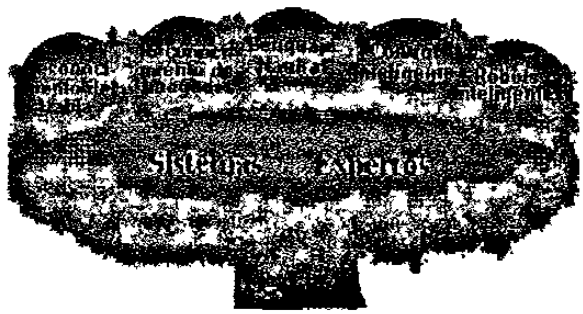


Figura 2.2: Arbol de aplicaciones de la inteligencia artificial

Entre los obstáculos que se tenían, podemos contar primeramente, los que estaban en los antiguos programas los cuales tenían poco o nulo conocimiento del asunto o materia de estudio de que trataban, y lograban resultados gracias a sencillas manipulaciones sintácticas.

En segundo lugar, otro de los obstáculos que enfrentó, fue lo intratable de muchos de los problemas que se estaban tratando de resolver. El esquema general para abordar un problema consistía en presentar las características básicas de un problema y someterla a una prueba de serie de pasos hasta que se encontraran la combinación ideal que produjera el resultado deseado. Sin embargo, esto no es factible, ya que en las investigaciones se trabajan con ambientes sencillos, con pocas condiciones y objetos, pero en los casos prácticos, ocurre todo lo contrario, el ambiente es complejo, las condiciones son múltiples y los objetos son variados.

Finalmente, podemos mencionar un último obstáculo, el cual se derivó de las limitaciones inherentes a las estructuras básicas que se utilizaron en la generación de conducta inteligente. Estos obstáculos frenaron el impulso inicial de la investigación en inteligencia artificial, pero no lograron acabar con ella, sino que al contrario, la fortalecieron al obligar a los científicos a rediseñar sus métodos de trabajo e investigación y a buscar nuevos caminos.

Muchos de aquellos primeros investigadores llegaron a una misma conclusión: las computadoras no logran simular el razonamiento de los humanos porque estas están facultadas para trabajar con matemáticas precisas, mientras el mundo real está lleno de imprecisión e incertidumbre. Y enfrentaron este dilema desde dos perspectivas diferentes. La primera es asumir que el problema está en el método de control, y por tanto la solución es aplicar más matemática. La otra perspectiva consiste en aceptar que las matemáticas es el problema y no la solución, y por lo tanto es necesario crear métodos alternativos. Dentro de los nuevos métodos para abordar la imprecisión presente en el mundo real sobresalen los algoritmos genéticos, el razonamiento probabilístico y la lógica difusa. Es decir, la lógica difusa surge como una alternativa a los métodos matemáticos de control tradicionales para poder representar la incertidumbre implícita en el mundo real.

La lógica difusa construye verdades inciertas dentro de los esquemas complejos del razonamiento formal. Es una nueva rama de la inteligencia de máquinas que trata de hacer que las computadoras razonen con nuestro sentido común incierto. La lógica difusa significa razonar con estos conceptos vagos. En la práctica puede significar calcular con palabras.

Esta nueva técnica, nacida formalmente en 1965, ha resurgido en los primeros años de los 1990s, con una gran cantidad de investigaciones, y las aplicaciones actuales incluyen una gran variedad de áreas, una de las cuales es la comunicación de datos, tema a lo que enfocamos nuestros esfuerzos y nuestra atención. Para terminar con este capítulo, incluimos una breve reseña del soft-computing, nombre actual que se está proponiendo para catalogar a los métodos de inteligencia que manejan la incertidumbre.

2.5.2: El Soft-computing.

El soft-computing difiere de la computación convencional (hard-computing) en que, a diferencia de esta, aquella es tolerante a la imprecisión, incertidumbre y la verdad parcial. De hecho, el modelo para el soft-computing es la mente humana. El principio guía del soft-computing es: Explotar la tolerancia para la imprecisión, la incertidumbre y la verdad parcial para alcanzar soluciones maleables, robustas y a bajo costo.

En esta coyuntura, los principales componentes del soft-computing son la lógica difusa, la teoría de redes neuronales y el razonamiento probabilístico, con las recientes incorporaciones de las redes de creencia, algoritmos genéticos, teoría del caos y partes de la teoría del aprendizaje. Lo que es importante notar es que el soft-computing no es una mezcla de lógica difusa, redes neuronales y razonamiento probabilístico. En su lugar, es una sociedad en la cual cada uno de los socios contribuye con una metodología distinta para consignar problemas en su campo. En esta perspectiva, las principales contribuciones de la lógica difusa, las redes neuronales y el razonamiento probabilístico se complementan en lugar de competir.

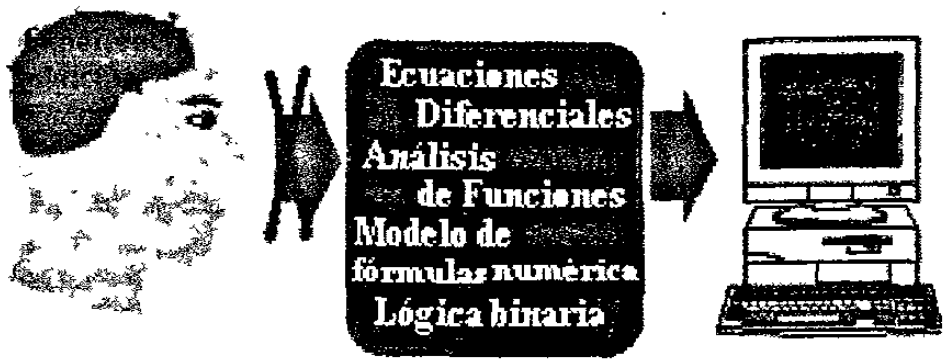


Figura 2.3: El soft-computing intenta modelar la mente humana.

Las técnicas del soft-computing están basadas en el intento de entender la vida, tratando de abstraer los principios dinámicos fundamentales involucrados en los fenómenos biológicos, y recrear estas dinámicas en otros medios físicos, tales como las computadoras; haciéndolas accesibles a nuevas clases de pruebas y manipulación experimental. El soft-computing es una reciente área de investigación, cuyas principales características son el trato con el concepto de "evolución", es decir, iniciar con ejemplos primitivos para mejorarlos a través de la adaptación al medio ambiente; y segundo es la "conducta no determinística" y la "incertidumbre" que permiten tratar con los problemas del medio ambiente el cual también es probabilístico y complejo.

CAPITULO 3
EL ORIGEN DE LA LOGICA DIFUSA.

3.1: Breve reseña de la lógica tradicional.

En esta sección trataremos de dar una exposición de los orígenes de la lógica difusa, para esto comenzaremos definiendo que es la lógica y de que asuntos se ocupa, posteriormente expondremos los orígenes de la lógica tradicional de la cual se originó la lógica difusa, resaltando los conceptos y objeciones que paulatinamente fueron generando el origen de las primeras ideas de la lógica difusa.

3.1.1: ¿Qué es la lógica?

La lógica es el estudio de los métodos y principios usados para distinguir los razonamientos correctos de los incorrectos, y ha sido definida a menudo como la ciencia de las leyes del pensamiento. Esta definición, aunque ofrece un indicio acerca de la naturaleza de esta ciencia, no es correcta ya que el pensamiento es estudiado por otras ciencias tales como la psicología. Además, la lógica no estudia todas las clases de pensamientos, solo los pensamientos que involucran razonamientos.

Otra definición común de la lógica es aquella que la considera como la ciencia del razonamiento. Esta definición es mejor, pero no es todavía adecuada. El razonamiento es un tipo especial de pensamiento en el cual se realizan inferencias, o sea se derivan conclusiones a partir de premisas. Pero a la lógica solo le interesa la corrección del proceso del razonamiento una vez que ha terminado. Su problema es averiguar si la conclusión a la que se ha llegado deriva de premisas usadas o afirmadas. La distinción del razonamiento correcto y del incorrecto es el problema central de la lógica Los métodos y las técnicas de la lógica han sido desarrolladas esencialmente para aclarar esta distinción. La lógica se interesa por todos los razonamientos sin tomar en cuenta su contenido.

3.1.2: El origen y evolución de la lógica.

La lógica como ciencia tuvo su origen en la antigua Grecia, se considera como al fundador indiscutible de la lógica a Aristóteles, quien estudió y sistematizó a la lógica en el conjunto de tratados llamado "Organon". La mayor parte de las tesis expuestas en este libro pertenecen a la llamada "lógica formal o tradicional". Aristóteles es el primer filósofo que investiga la estructura de la ciencia, esto es, la doctrina de las formas del pensar científico. Ya los sofistas y Sócrates habían hecho mención acerca de la esencia de la actividad científica, y sus agudas observaciones los habían conducido al problema de separar las formas del proceso cognoscitivo de su contenido variable.

Aristóteles compila y elabora todo un sistema con todos los ensayos dispersos previos a él. Aristóteles llega a esta perspectiva poco a poco, en relación progresiva con el desarrollo de su doctrina entera. Los escritos del Organon (tratados lógicos) surgieron al filo de reflexiones sobre el uso y sentido del lenguaje en sostenido contacto con los sofistas y retóricos de la época. Poco más tarde la doctrina va tomando un sentido conceptual.

En la época culminante de su concepción lógica, Aristóteles afirmaba la idea de vincular los principios lógicos con la naturaleza del saber científico. Por esta razón, se puede afirmar que la lógica aristotélica tiene una triple función:

a) La lógica es una metodología: se enfoca en mostrar el camino a través del cual se puede alcanzar el conocimiento científico.
b) La lógica es una propedéutica: tiene el carácter de instrumento o requisito para la adquisición del conocimiento.
c) La lógica es una epistemología: tiene por objeto tratar los problemas del conocer científico y por lo tanto, indagar la cuestión de la verdad.

3.1.3: La lógica de Aristóteles.

La lógica de Aristóteles se ocupa fundamentalmente de tres temas básicos que son:

1) El concepto: que se ocupa del estudio de las representaciones mentales.
2) El juicio: que se ocupa de las afirmaciones de un concepto con respecto a otros.
3) El razonamiento: consiste en obtener nuevos conocimientos a partir de otros.

Figura 3.1: Aristóteles.

Tal parecía que con Aristóteles la lógica había quedado definitivamente establecida y concluida, sin mucho que agregar. Durante mucho tiempo así fue considerado, y todavía en la actualidad para muchos esta lógica de tres valores es todavía el cauce por el cual transitan, incluyendo a la lógica matemática moderna.

Después de Aristóteles, su lógica recibió algunos pequeños influjos, los estoicos y epicúreos cultivaron la lógica de juicios. La Edad Media estudió intensamente la lógica aristotélica y cuenta con afinidad de cultivadores de la lógica, pero sin grandes aportaciones. Sobresale el nombre de Pedro Hispano quien escribió en el siglo XIII las súmulas lógicas, donde deja establecido el uso de las cuatro vocales para designar los juicios según su cantidad y cualidad así como los nombres de los silogismos en cada figura.

Posteriormente en el siglo XIV Raimundo Lulio escribió su Ars Magna, en la cual pretende colocar a la lógica como la ciencia universal y base de toda la filosofía, pues mediante combinaciones lógicas de ciertas nociones quería deducir todo el contenido filosófico. Esta fallida pretensión fue vista como el ideal a alcanzar por los filósofos de la Edad Media.

3.1.4: Las críticas a la lógica de Aristotéles.

La lógica aristotélica parecía eterna e inmutable, sin embargo, incluso durante en vida del propio Aristóteles, su sistema de lógica recibió severas críticas. Heráclito ya había señalado que las cosas podrían ser simultáneamente verdaderas y no verdaderas. Pero fue Platón el primero en señalar que existía una tercera región (más allá de Verdadero y Falso) donde estos opuestos "se confundían", esbozando ligeramente los fundamentos de lo que llegaría a ser la lógica difusa; sin embargo no pudo establecer las suficientes bases para demostrar sus argumentos.

Durante el Renacimiento surgieron grandes críticas para todo el sistema filosófico aristotélico, y su sistema de lógica no fue la excepción. En la edad moderna, Francisco Bacon en su Novum Organum, se opone al método silogístico y pretende colocar al método inductivo como la base del conocimiento científico.

Posteriormente Descartes también critica a la lógica y a la filosofía aristotélica. Objeta que la lógica no sirve para lograr eficazmente nuevos descubrimientos, y por eso establece sus cuatro reglas metódicas para alcanzar tal meta. Asimismo, Leibniz establece la idea de un cálculo logístico que debería de usar símbolos para representar a los pensamientos y sus relaciones. Por este motivo se le considera el precursor de la lógica simbólica.

Desde mediados del siglo XIX las investigaciones matemáticas hicieron ver la posibilidad de una aplicación de sus métodos al terreno de la lógica. Poco a poco se fue ampliando esta ciencia auxiliada por un lenguaje simbólico semejante al de las matemáticas. Sin embargo, la lógica matemática o simbólica no trata con cantidades o números sino con procesos deductivos (cálculo) aplicables tanto a las matemáticas como a cualquier otro terreno científico. Este prescindir del contenido de los procesos para insistir en la estructura del pensamiento y en sus reglas deductivas es lo que se llama formalismo en la lógica, y es esto el lazo de unión con la lógica aristotélica. Por lo anterior, la lógica simbólica no es un rechazo de las tesis aristotélicas, sino una ampliación y profundización gracias a un lenguaje mucho más profundo.

A principios de 1900s, Lukasiewicz fue el primero en proponer una alternativa sistemática a la lógica de dos valores (*bivalencia*) de Aristóteles. Describió una lógica de tres valores, la cual puede mejor ser traducida como el término "posible", y le asignó un valor numérico entre Verdadero y Falso. Knuth, un antiguo estudiante de Lukasiewicz propuso una lógica de tres valores aparentemente omitida por Lukasiewicz, la cual usaba un rango integral de [-1, 0 +1] en lugar de [0, 1, 2]. Sin embargo, esta alternativa fracasó en su intento por ganar aceptación, y ha pasado a una oscuridad relativa.

Figura 3.2: Jan Lukasiewicz

3.2: Breve reseña de la lógica difusa.

En esta sección expondremos el origen y evolución de la lógica difusa, para esto empezaremos discutiendo las ideas básicas que dieron como resultado el origen de la lógica difusa, después expondremos la historia de su desarrollo y evolución, por último se discutirán algunos puntos que generan polémica con respecto a la validez de la lógica difusa.

3.2.1: El origen de la lógica difusa.

La lógica difusa o vaga tiene una larga historia en las matemáticas y en la filosofía. Empezó con la intuición de que no todas las declaraciones son verdaderas o falsas en un mismo grado. Algunas pretenden ser más verdaderas que otras y por tanto la verdad es una cosa de grados. Esto significa que la vieja ley o axioma del tercero excluido no se aplican excepto en el caso límite. La lógica difusa extiende esta lógica vaga o *continua* al razonamiento con conceptos o conjuntos vagos. Esto requiere una nueva álgebra de conjuntos para los conceptos vagos. El álgebra de conjuntos difusos permite que las palabras aparean conjuntos difusos. Y permite que los enunciados aparean reglas difusas o asociaciones entre conjuntos difusos. Las reglas se combinan para formar sistemas o aparea la entrada de un campo a un rango de salida. La

mayoría de las aplicaciones difusas dependen de un sistema difuso y no solo de un índice en escala gris o difusa de algún término.

Lo difuso empezó como vaguedad a finales del siglo diecinueve. El filósofo pragmático Charles Sanders Pierce parece ser el primer lógico que ha tratado con la vaguedad. Decía que "la vaguedad no es más distante en el mundo de la lógica que la fricción en mecánica". Afirmaba que un concepto es vago solo en caso de que tenga límites oscuros. Por ejemplo, el concepto de montaña es vago debido a que no sabemos con claridad dónde termina una montaña y empieza una colina.

El lógico Bertrand Russell fue el primero en identificar la vaguedad en el nivel de la lógica simbólica. Afirmaba que un concepto A es vago si y solo si no cumple con la ley de Aristóteles del tercero excluido: si y solo si A o no A no se puede sostener. Las declaraciones de la lógica o matemáticas obedecen la ley de Aristóteles: "1+1=2" es 100% verdadera y 0% falsa. Pero las declaraciones de hechos son vagas y tienen valores de verdad entre estos extremos binarios. "La hierba es verde" puede ser verdadera solo en un 80% y entonces "la hierba no es verde" es verdadera en un 20%. Russell fue el primero en observar esta disparidad entre los hechos grises de la experiencia y la matemáticas binaria y entonces los buscó también en las mismas matemáticas.

Figura 3.3: Bertrand Russell.

Russell revisó la paradoja del sorites del antiguo filósofo griego Zeno para mostrar que la inducción no era binaria: ¿Estoy calvo? No. Arranco un cabello. ¿Estoy calvo ahora? No. Si se mantiene arrancando y preguntando no se encuentra que arrancar un cabello lleve del estado calvo a no calvo. Se será si se arrancan todos o la mayoría de los 100,000 cabellos de la cabeza. Cada arrancada de cabello aumenta el grado de calvicie y disminuye la fuerza de la cadena inductiva. La inferencia final vaga de no calvicie tiene el valor de verdad cercano a cero que viene de multiplicar un número grande de valores entre 0 y 1. Esto no afectaría una inferencia binaria pura debido a que multiplicaría una cadena de unos. Implicaría que se es todavía 100% no calvo aún después de que se ha arrancado todo el cabello.

Russell revisó una paradoja más profunda en las mismas matemáticas cuando trabajó con Alfred North Whitehead en los primeros volúmenes de los Principia Mathematica. Encontró la antigua paradoja del mentiroso de Creta. El cretense dice que todos los cretenses mienten. ¿Miente o dice la verdad? Si él miente entonces dice la verdad y por lo tanto no miente. Si no miente entonces el dice la verdad y por lo tanto miente. Ambos casos llevan a la contradicción de A y no A.

Russell encontró la misma paradoja en la teoría de conjuntos. El conjunto de todos los conjuntos es un conjunto. Así que es un miembro de sí mismo. Pero muchos conjuntos no son miembros de sí mismos. El conjunto de manzanas no es un miembro de sí mismo ya que sus miembros son manzanas y no conjuntos. ¿Pero que acerca del conjunto de todos los conjuntos que no son miembros de sí mismos? ¿Es un miembro de sí mismo? Si lo es entonces no lo es. Y si no lo es entonces lo es. Aquí A y no A son tomados no en el mundo gris de las cosas sino en el sistema formal de las matemáticas binarias.

Russell al principio estableció su "teoría de tipos" para prohibir tales paradojas pero las paradojas todavía emergieron en otras formas a pesar de la prohibición. Existe algo profundamente contra intuitivo acerca de negar que el conjunto de todos los conjuntos no es en sí mismo un conjunto como muchos hemos hecho al llamarle "clase". Russell reconoció en su artículo de 1923: "La vaguedad implica que tenemos que relajar, si no rechazar, la ley de Aristóteles del tercero excluido si queremos tratar con las paradojas y explicar la vaguedad de las declaraciones de objetos". La lógica difusa formalmente empezó con este artículo de 1923.

Las paradojas motivaron mucho de los primeros trabajos en la lógica difusa o vaga así como lo hizo el principio de incertidumbre con la mecánica cuántica. El lógico polaco Jan Lukasiewics hizo el siguiente gran avance después de Russell. En los años 1920s Lukasiewics trabajó en la primera lógica multivalor o difusa. En un artículo de 1973 en "la filosofía de la ciencia" el filósofo cuántico Max Black aplicó lógica multivalor a una lista o conjuntos de objetos y trazó las primeras curvas de conjuntos difusos. Estos conjuntos son tales que cada objeto x obedece o pertenece a A y no A en cierto grado y así son propiamente vagos o difusos. Black siguió el trabajo de Russell y llamó a los conjuntos vagos. Kaplan y Schott definieron las operaciones min y max para definir una álgebra de conjuntos difusos así como otros lógicos en los 1950s.

Figura 3.4: Lotfi Zadeh.

En 1965 Lotfi Zadeh de la Universidad de California en Berkeley publicó el documento: "Conjuntos Difusos". Este documento fue el primero en usar la palabra difusa para denotar la "vaguedad" en la literatura técnica. No sólo ha persistido sino que ha reemplazado grandemente el término anterior de vago. El documento de 1965 de Zadeh aplicó la lógica de Lukasiewics a cada objeto en un conjunto para elaborar una álgebra completa de conjuntos difusos y para extender el teorema de separación convexa del reconocimiento de patrones. Existe alguna controversia aquí debido a que Zadeh no hizo referencia a los trabajos de Lukasiewics ni de ninguno de los otros lógicos multivalores quienes desde hace tiempo habían definido los conceptos vagos y los operadores acertados (min, max y 1-x) en el corazón de la teoría de conjuntos. Esto con frecuencia ha llevado a la percepción de que la lógica multivalor empezó con los conjuntos difusos a pesar de tener más de medio siglo de prioridad. Todavía Zadeh efectuó la segunda ola de la investigación multivalor bajo el estandarte y el lenguaje de la lógica difusa y lo hizo casi sin ayuda. La IEEE lo premió con su medalla de honor en 1995 por su trabajo en conjuntos difusos, y es reconocido como el "padre" de la lógica difusa.

A mediados de los años 1970s Ebrahim Mamdani del Queen Mary College en Londres, fue el primero en aplicar conjuntos difusos a sistemas en la forma de un sistema difuso basado en reglas. Mamdani diseñó un sistema difuso para controlar una máquina de vapor y usó un sistema difuso que difiere solamente en detalle de los sistemas difusos usados actualmente. El trabajo de Mamdani marcó el inicio de la ingeniería difusa.

3.2.2: El desarrollo de la lógica difusa.

De muchas maneras, la lógica difusa ha sido una revolución esperando acontecer por más de treinta años. Originada de los primeros documentos de los años 1960s de Lotfi Zadeh, la lógica difusa resuelve varios conflictos que aparecen cuando la lógica se aplica al medio ambiente del mundo real. El problema, de acuerdo a Zadeh, fue que la lógica tradicional permite solamente dos valores de verdad, los binarios 1 o 0, también variablemente llamados verdadero o falso, encendido o apagado, y si o no. Estos valores discretos solamente proporcionan dos niveles de membresía, o un elemento es miembro del conjunto o no es miembro. No existe intermedio. Este es el primer principio de la lógica tradicional: la ley del tercero excluido (equivalente a la ley de no contradicción que dice que una cosa no puede, tanto ser y no ser miembro de un conjunto).

Pero aunque la ley del tercero excluido suena incontrovertible, todos los ingenieros saben que no es así en los eventos del mundo real. Por ejemplo, una válvula puede con frecuencia estar casi cerrada y el fluido pasando a través de ella levemente. Un auto se detiene gradualmente. Y así. Los eventos del mundo real pueden raramente ser clasificados con conjuntos bien definidos sin ambigüedad. El mundo real no es negro o blanco. En su lugar, toma un número infinito de valores para los cuales la lógica tradicional no tiene lugar.

Solamente en situaciones de procesamiento de datos puros donde la exactitud absoluta es deseada, por ejemplo, cuando tratamos con dólares y centavos la lógica tradicional meticulosamente supera el problema. Cuando tratamos con objetos del mundo real, para controlar o modelar eventos en tiempo real, cuando se interactúa con gente real y en varias

otras situaciones la lógica tradicional simplemente no es buena ni apropiada. El mundo real no está pre-empacado en paquetes binarios discretos y los ingenieros que los fuerzan a estas categorías están haciendo su trabajo innecesariamente difícil, de acuerdo a Zadeh.

A su vez, Zadeh razonaba, que los ingenieros necesitaban una lógica difusa que reflejara la naturaleza aproximada del mundo real, y la cual podría ser afinada a cualquier grado deseado de precisión. Empezó con una definición de la lógica difusa: "la lógica del razonamiento aproximado con razonamiento [tradicional] preciso como el caso límite". Así los conjuntos discretos de la lógica tradicional pueden ser también representados en la lógica difusa, aunque como sus extremos. Esto es reflejado en una ley generalizada de la ley del tercero excluido para la lógica difusa que proporciona el termino medio requerido por los eventos del mundo real, esto es, grados de membresía.

Los grados de membresía es una conceptualización que permite que los objetos naturales del mundo sean directamente representados como son, mientras que todavía es capaz de procesar sus datos con formas generalizadas de las reglas de la lógica. Por ejemplo, los grados de membresía permiten a un tomate ser parcialmente un vegetal aunque sus características también lo hacen parcialmente no vegetal (una fruta). Permite que un ornitorinco sea parcialmente un mamífero y parcialmente no lo sea. Permite que rangos como lento a rápido, pequeño a grande y ligero a pesado sean directamente representados, en lugar de cuantificarlos artificialmente solamente para ser capaz de procesar sus datos.

La lógica difusa también tiene un gran impacto en la inteligencia artificial, Zadeh pretende que la inteligencia artificial ha fallado en gran parte debido a que a sido forzada a usar herramientas que eran demasiadas precisas para la tarea. Los sistemas expertos de la inteligencia artificial están compuestos de cientos o miles de reglas if-then precisas. Pero con la lógica difusa estas reglas podrían ser reducidas en por lo menos un grado de magnitud, es lo que Zadeh pretende. Es decir, pretende moldear las condiciones difusas del mundo real con reglas altamente precisas.

Similarmente, a los ingenieros con frecuencia se les pide resolver problemas del mundo real con herramientas de la lógica tradicional que son demasiado tediosas y requieren de mucho trabajo. De acuerdo a Zadeh, muchas soluciones de ingeniería son demasiadas precisas que llevan un gasto innecesario de tiempo por los ingenieros y costos innecesarios en el producto final. Para muchos problemas de ingeniería, una alta precisión es innecesaria, particularmente cuando las máquinas están realizando tareas humanas.

Por otro lado, es curioso que aunque la lógica difusa fue inventada en los Estados Unidos por el profesor Lotfi Zadeh de la Universidad de California en Berkeley, solamente ha sido desarrollada completamente en China y Japón. Estos rivales históricos están combinando sus recursos para aventajar al occidente en aplicaciones de lógica difusa.

La semilla de la lógica difusa que ha germinado recientemente en el Oriente fue plantada por los documentos prolíficos de Zadeh que iniciaron en los años 1960s. Aquellos documentos son los que originalmente movieron la curiosidad de los japoneses. E iniciaron sus trabajos teóricos. Expresaron sus desarrollos en la lógica difusa al producir un continuo flujo de documentos consignando las diversas implicaciones de la teoría, una técnica común

especialmente en un país desarrollado donde el espacio para laboratorios es escaso. Estos documentos llamaron la atención de laboratorios japoneses bien equipados formados para una buena implementación de diversas tecnologías.

En Japón las aplicaciones de lógica difusa han sido desarrolladas para mejorar tecnologías de usuario final, desde un metro sin conductor en Sendai hasta una cámara de enfoque difuso de Minolta que puede encontrar sujetos donde sea en un marco dado. Japón aplicó la lógica difusa para resolver problemas que son difíciles para una computadora convencional, resultando en más de 100 aplicaciones actualmente trabajando. Por desgracia, debido a que sus fundamentos teóricos son limitados, muchos de estos sistemas japoneses fueron trabajos de ingeniería de fuerza bruta que son pesados y caros. Los chinos están llenando muchas de las grietas teóricas olvidadas para permitir que los japoneses conmuten a tecnologías implementadas a alta velocidad y bajo costo.

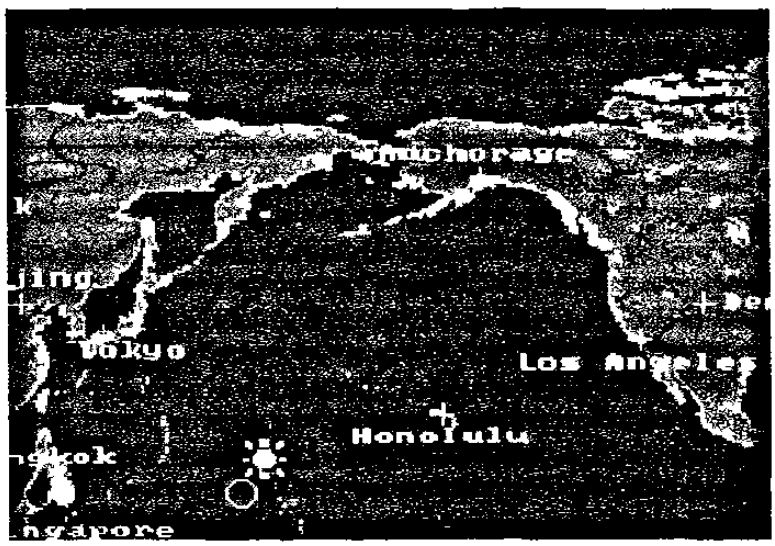


Figura 3.5: Area geográfica de desarrollo de la lógica difusa.

China puede parecer un lugar improbable para que la lógica difusa prospere. Pero los matemáticos, y su peculiar extrañeza, han llevado un gran interés por las investigaciones de lógica difusa allí. Se estima que existen casi 30 institutos de investigación de lógica difusa en cada una de las provincias de China. Y se estima que existen más de 10,000 investigadores de lógica difusa en China, y por lo menos 1,000 de esos 10,000 están actualmente publicando documentos en revistas eruditas a través de China. El complemento de los enfoques chino y japonés ha sido muy benéfico.

Y debido al enorme éxito de las aplicaciones realizadas por los japoneses, la lógica difusa ha iniciado una camino seguro y sostenido de crecimiento, llamando la atención del país que la vio nacer y que casi ignoró su presencia: los Estados Unidos. Las universidades y numerosos centros de investigación norteamericanos han enfocado el centro de sus investigaciones al desarrollo y aplicaciones de la lógica difusa. Lo mismo está ocurrido en países de Europa Occidental, principalmente Alemania, donde la lógica difusa también ha experimentado un

crecimiento admirable. Por todo lo anterior, la lógica difusa se está perfilando no solo como una ciencia teórica, sino que es vista como una poderosa técnica para modelar problemas y encontrar soluciones más amenas y prácticas.

La lógica difusa está todavía en auge en Japón, el número de solicitudes de patentes está aumentando exponencialmente. Las aplicaciones más importantes, sin embargo, tratan con aplicaciones simples de control difuso. En Japón la investigación difusa está ampliamente soportada con un enorme presupuesto. En Europa y en los Estados Unidos se están haciendo los esfuerzos para nivelarse con el tremendo éxito japonés.

Aunque las primeras aplicaciones fueron altamente exitosas, y otras primeras pruebas de lógica difusa fueron impresionantes, los investigadores e ingenieros en Europa y los U.S.A. erraron al no aprovechar desde sus inicios esta tecnología. De hecho, la lógica difusa encontró resistencia significativa de muchos de los principales científicos en el mundo occidental. Numerosos factores contribuyeron a la falta de interés en la lógica difusa. Estos incluían las connotaciones negativas en el nombre por sí mismo y el hecho de que los conceptos difusos no tienen paralelo con las técnicas de control convencional.

Los japoneses, sin embargo, rápidamente adoptaron las técnicas de la lógica difusa y empezaron exitosamente a vender muchas aplicaciones comerciales innovadoras. Para Septiembre de 1990, había aproximadamente 389 patentes difusas en Japón. Además, de acuerdo con la oficina de marcas y patentes de los U.S.A., los japoneses tomaron 30 de las 38 patentes difusas en los U.S.A. producidas en Diciembre de 1990. Los productos ahora ofrecidos por las compañías japonesas que utilizan tecnología de lógica difusa incluyen máquinas lavadoras, cámaras fotográficas, televisores, aires acondicionados, hornos de microondas, ollas a presión para el arroz, cámaras con enfoque difuso, copiadoras, elevadores, lavaplatos, mezcladores químicos, traductores de idiomas, tostadores, y muchos sistemas para automóviles tales como controles para frenos antibloqueo, sistemas de suspensión, transmisiones automáticas y máquinas mezcladoras de aire y combustible.

No es sorpresa, que la lógica difusa esté ahora disfrutando de un resurgimiento en Europa y en los Estados Unidos. Los investigadores corporativos y las aplicaciones comerciales todavía están rezagados con respecto a los Japoneses pero la brecha parece ser estrecha. Los intereses de investigación han crecido inmensamente en los últimos 10 años y parece que la investigación dedicada a la lógica difusa, y a las capacidades tecnológicas de la lógica difusa, continuará creciendo rápidamente en el futuro previsible.

CAPITULO 4
TEORIA DE LA LOGICA DIFUSA.

Una de las principales limitaciones de la lógica de primer orden, es que casi nunca tienen acceso a toda la verdad acerca de su ambiente. Por lo que, prácticamente en casi todas las situaciones a las que nos enfrentamos; incluso las más sencillas, se tendrán preguntas a las que no se tenga una respuesta categórica. En consecuencia se debe de actuar en condiciones de incertidumbre. Esta incertidumbre que se presenta en casi todas las áreas de la actividad humana es el concepto sobre el cual se enfoca el estudio de la lógica difusa. En este capítulo trataremos de presentar una exposición general sobre la lógica difusa como un requisito para poder entender las aplicaciones que se presentarán más adelante.

4.1. Panorama general.

Nuestra cultura está tan acostumbrada a pensar en términos de correcto o incorrecto, y nos puede parecer que la lógica difusa no es una herramienta completamente confiable para el uso de la ciencia. Sin embargo, si examinamos detenidamente los conceptos propuestos dentro del sistema de la lógica difusa, se nos revela el hecho de que es un enfoque intuitivo para tratar con situaciones del mundo real. La mayoría de las situaciones reales no son discretas ni determinísticas, y no pueden ser descritas precisamente. La descripción completa de un sistema real con frecuencia requerirá de muchos más datos y detalles que lo que un humano podría reconocer, procesar y entender simultáneamente. Estas propiedades de la vida generalmente la hacen muy difícil para crear modelos precisos de hechos a través de los métodos matemáticos convencionales. Las situaciones del mundo real son intuitivamente no lineales, complejas e inciertas, por lo que generalmente, nuestra información acerca de ellas es imprecisa.

Se puede imaginar dos espacios diferentes, en uno, el problema existe y en el otro existen los métodos de solución y las herramientas matemáticas. Si estos dos espacios se traslapan, aunque no sea un caso frecuente y realista, es muy deseable, ya que la solución será alcanzada si está al alcance de las herramientas disponibles. Sin embargo, si tal traslape no existe, aparecen dos alternativas: o transformar el problema al espacio solución o buscar una solución en el espacio problema. El primer intento acaba en técnicas de linealización, simplificación de suposiciones y métodos similares los cuales transforman el problema a una forma la cual pueda ser manejada con las herramientas disponibles. En el último enfoque, o se transforman las herramientas que probablemente lleven a una solución del espacio solución al espacio del problema o se intenta formular nuevas herramientas en el espacio problema. La lógica difusa puede ser percibida como una herramienta en el espacio problema con una imagen en el espacio solución.

La lógica difusa no es una teoría muy bien desarrollada como la teoría de sistemas lineales, pero es más prometedora para el futuro, al tratar con problemas de la vida real. Sin embargo, la forma en que es presentada suena muy natural y la forma en que maneja los problemas hacen de la lógica difusa muy aplicable en muchas áreas. Las bases de la lógica difusa están ampliamente presentadas en la literatura, y es presentada generalmente sobre una base comparativa con lo que la lógica discreta dice y con lo que la lógica difusa propone. Aquí las bases de la lógica difusa serán explicadas siguiendo una tendencia similar. Se debe de estar consciente que cubrir la teoría completa de la lógica difusa es imposible dentro de las limitaciones de una Tesis. Sin embargo, el material de introducción que va a ser presentado a continuación será suficiente como una base para las aplicaciones de la lógica difusa a presentar. Para información más detallada tanto de la lógica difusa y sus aplicaciones en diferentes áreas, se deben de consultar las referencias indicadas.

4.2. Conceptos fundamentales.

En este capítulo presentaremos los conceptos fundamentales, los cuales forman la piedra angular sobre los cuales descansa toda la estructura de la teoría de la lógica difusa, estos conceptos son: la incertidumbre y el concepto de verdad difusa.

4.2.1 La incertidumbre y el razonamiento lógico.

Como mencionamos al principio de este capítulo, la incertidumbre está presente en muchas situaciones de las actividades humanas, esta incertidumbre es producto de lo incompleto o lo inexacto del conocimiento acerca de las características de un ambiente de estudio. La incertidumbre modifica completamente la forma de acción y la toma de decisiones lógicas, por lo que es necesario tener un método adecuado para enfrentarla. De los diferentes estudios realizados al respecto, la incertidumbre puede ser clasificada en dos tipos básicos que son:

- El primer tipo de incertidumbre es debido a la falta de información, por lo que el estado futuro de un sistema no puede ser conocido o determinado completamente. Este tipo de incertidumbre es cuantitativo y tiene un carácter *estocástico* y ha sido manejado por la teoría de la probabilidad y la estadística.

- El segundo tipo de incertidumbre es la vaguedad con respecto a la descripción del significado semántico de los eventos, fenómenos o declaraciones en sí mismas. Este tipo de incertidumbre es de tipo cualitativo.

La salida de un evento estocástico es o verdadera o *falsa*. Sin embargo, en la situación donde un evento en sí mismo no está bien definido, la salida puede ser dada por una cantidad diferente de verdadero (uno) o falso (cero). Esto es, la salida en presencia de la vaguedad puede ser cuantificada por un *grado de creencia*.

En la mayoría de las ciencias se ha tenido preferencia por la probabilidad y la estadística como modelo matemático para representar la incertidumbre, y en especial porque han manejado básicamente la incertidumbre del primer tipo, mientras que el segundo tipo de incertidumbre, aparece cuando se trata de representar los conceptos cualitativos del pensamiento humano.

La lógica difusa trata de presentar un modelo matemático para manejar el segundo tipo de incertidumbre, es decir, cuando los conceptos son vagos y no se tiene certeza de cual sea el grado de verdad de dicho concepto, o su definición no proporcione una base para obtener un valor numérico preciso.

4.2.2: El concepto fundamental de la lógica difusa.

Con respecto al punto anterior, podemos deducir que la lógica difusa tiene como fundamento el concepto de verdad parcial, es decir, los valores entre "completamente verdadero" y "completamente falso"; la lógica difusa difiere de la lógica clásica en que las declaraciones no son ya bi-valores: verdadero o falso, encendido o apagado. Sabemos que en la lógica tradicional un objeto toma un valor de cero o uno; en la lógica difusa, una declaración puede asumir cualquier valor real entre 0 y 1, representando el grado para el cual un elemento pertenece a un conjunto dado.

Figura 4.1: El concepto fundamental de la lógica difusa.

La lógica difusa entonces puede ser considerada como un super conjunto de la lógica convencional (lógica de Boole), y no debe de ser considerada como una simple teoría, sino más bien como una metodología que permite generalizar cualquier teoría específica de una forma discreta a una forma continua (difusa).

La lógica difusa es un enfoque matemático para resolver problemas. Se distingue por producir resultados exactos de datos vagos o imprecisos, y es especialmente útil en computadoras y aplicaciones electrónicas. Ya que mientras que el cerebro humano puede razonar con incertidumbres, imprecisiones y juicios; las computadoras solo pueden manipular valores precisos. La lógica difusa es un intento por combinar estas dos técnicas. Intenta introducir el manejo de la vaguedad para producir resultados precisos.

4.2.3: El concepto de verdad difusa.

Debido a que la lógica difusa considera una graduación continua de valores de verdad variando desde completamente falso hasta completamente verdadero, entonces definimos la verdad de una declaración o valor como la *confianza* o el *grado* que tenemos de que la declaración o valor sea correcto. Esta verdad es medida numéricamente con valores que van desde cero (completamente falso) hasta uno (completamente verdadero) incluyendo, por supuesto, todos los valores intermedios (verdad parcial).

El concepto anterior de verdad parcial puede ser extendido para evaluar la verdad de la combinación, relación o comparación de declaraciones basadas en este concepto de verdad difusa. Por ejemplo, se podría evaluar la verdad de la combinación de dos declaraciones: A AND B, o también A OR B; lo cual produce resultados diferentes a los obtenidos con la lógica de primer orden. Estos conceptos y operaciones serán mejor explicados más adelante y con mayor detenimiento en la sección dedicada a la teoría de conjuntos difusos.

Es difícil ver en este momento la importancia práctica de estas reglas simples de la lógica por sí mismas. Sin embargo, la mayor parte del razonamiento de Occidente tiene su fundamento en la lógica; *estas reglas simples pero nuevas de la lógica tienen gran impacto en los patrones de razonamiento.* Y es con patrones de razonamiento la forma en que estamos más interesados en construir sistemas; y especialmente son los patrones del razonamiento humano generador de la vida real lo que se está tratando de emular. La lógica difusa nos da las herramientas teóricas para hacer esto.

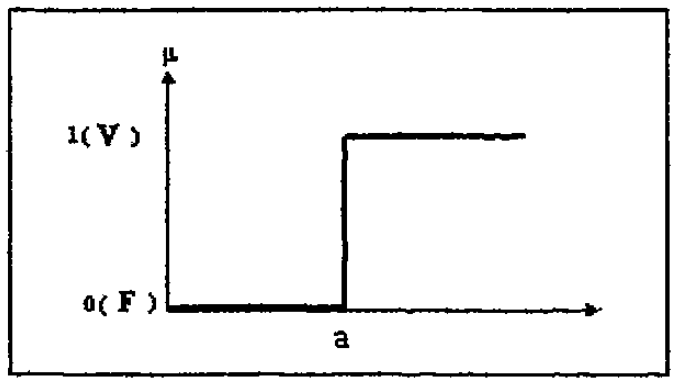


Figura 4.2: Concepto de verdad discreta.

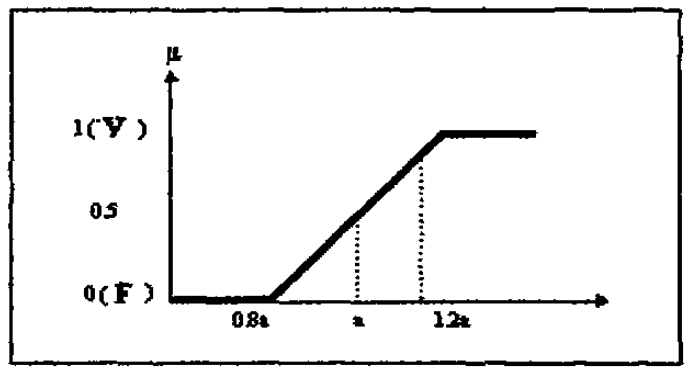


Figura 4.3: Concepto de verdad difusa.

4.3: Teoría de conjuntos difusos.

A continuación, vamos a presentar una breve exposición de la teoría de conjuntos, necesaria para la plena comprensión de esta Tesis. Primero comenzaremos exponiendo algunos conceptos básicos sobre la teoría de conjuntos clásica, de la cual se desprende la idea de los conjuntos difusos, después definiremos lo que es un conjunto difuso, y algunas de sus propiedades y características.

4.3.1: Conceptos preliminares.

En las matemáticas, el concepto de *conjunto* es muy simple, pero muy importante. Un conjunto es simplemente una colección de cosas. Las cosas pueden ser cualquier cosa que se quiera: números, nombres de autos, nombres de personas. Las cosas o pertenecen al conjunto o no pertenecen, similar a la idea en la lógica de que las declaraciones son o verdaderas o falsas.

En matemáticas clásicas estamos familiarizados con los llamados *conjuntos discretos*. La membresía $\mu_A(x)$ de A como subconjunto del universo X, es definida como:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, \text{ sí } x \in A \\ 0, \text{ sí } x \notin A \end{cases}.$$

A continuación veamos un ejemplo:

Primero consideremos el conjunto *X* de los números reales entre 0 y 10 lo llamaremos Conjunto Universal. Ahora definamos un subconjunto *A* de *X* de todos los números reales que están en el rango entre 5 y 8.

$$A = [5,8]$$

Ahora veremos la función característica del conjunto *A*. Esta función asigna un número entre 1 y 0 para cada elemento en *X*, y depende de si el elemento es un subconjunto de *A* o no. Este resultado se ve mejor en la siguiente gráfica:

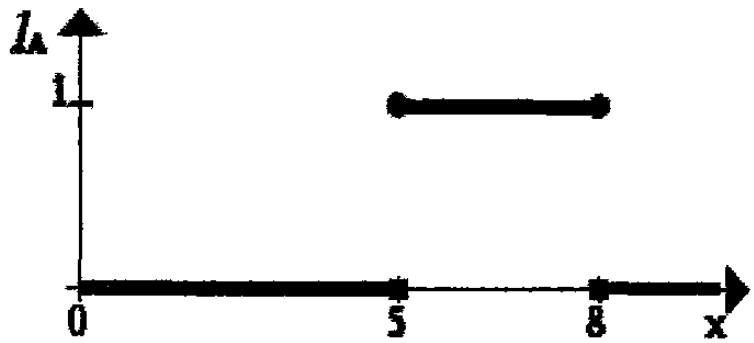


Figura 4.4: Representación clásica de un conjunto.

Podemos ver que cada elemento tiene asignado un valor (0 o 1). *Los Elementos del Conjunto A* tienen asignados el valor de 1 porque pertenecen a ese conjunto, y cada elemento que tiene asignado el número 0 es *un elemento que no esta en el conjunto A.*

Este concepto es suficiente para aplicaciones en muchas áreas. Pero necesitamos buscar soluciones a situaciones donde la flexibilidad es necesaria. Consideremos el siguiente ejemplo:

Consideremos el conjunto de la gente joven, formalmente se puede denotar así:

$$B = \{Conjunto\ de\ personas\ Jóvenes\}$$

Entonces, en general, se toma como limite inferior las edades que arrancan en 0 años. El rango superior es definido para un primer caso como 20 años, es una primera consideración el rango superior de 20 años. Entonces tenemos en *B* un intervalo frágil o discreto, así:

$$B = [0,20]$$

Ahora la pregunta es la siguiente: ¿Una persona con 20 años de vida es joven?.

En esta representación vemos claramente que cuando se tienen 20 años, se considera una persona joven, pero lo que no está claro es lo que ocurre un día después de los 20 años, ¿será considerada una persona vieja? Obviamente este es un problema estructural, pero mover el límite superior de 20 a otro punto arbitrario generaría el mismo problema.

Figura 4.5: Representación gráfica del conjunto difuso de la edad.

La interpretación de los números asignados entre 0 y 1 en la gráfica muestra el grado de pertenencia de cada elemento al universo. Si esta en 1 significa que el elemento pertenece al conjunto B, y si esta en 0 significa que el elemento no pertenece al conjunto B. Para concretar aquí tenemos la gráfica del primer ejemplo: Si tengo 25 años de edad soy 50 % Joven. Esta es la idea de un conjunto difuso

La lógica difusa establece la idea de un conjunto difuso, definiendo a un conjunto difuso como aquel en el cual los objetos pueden pertenecer para diferentes grados, llamados *grados de membresía o confianza.* El grado de membresía o confianza de pertenecer a un conjunto difuso también puede ser valorado como un número que varía desde cero (absolutamente falso) hasta 1 (absolutamente verdadero) incluyendo los valores intermedios (verdad parcial); o puede emplearse una escala similar. Un conjunto difuso representa la aplicabilidad del elemento a un conjunto. Es decir, un elemento puede no ser totalmente representativo de un conjunto dado, pero tienen al menos alguna similitud con el concepto que el conjunto representa.

Esta idea simple de diferentes grados de membresía en un conjunto difuso es extremadamente útil ya que permite utilizar palabras descriptivas; tales como cerca, casi, aproximado, donde el grado de membresía representa nuestra confianza de que este descriptor sea verdadero para cualquier elemento que consideremos. El uso de palabras descriptivas nos permite usar el lenguaje ordinario al describir cosas en una forma precisa. Es decir, podemos asignar variables lingüísticas a un conjunto difuso para representar un concepto completo.

4.3.2: Definición de un conjunto difuso.

La interpretación original de un conjunto difuso proviene de una generalización del concepto clásico de subconjunto ampliado a la descripción de nociones "vagas" e "imprecisas". Esta generalización se realiza como sigue:

1.- La membresía de un elemento a un conjunto es un concepto "difuso".

2.- Dicha membresía puede ser cuantificada por un grado. Dicho grado se conoce generalmente como "grado de membresía" de dicho elemento con respecto al conjunto y toma un valor en el intervalo de [0,1].

De una forma más precisa podemos definir un conjunto difuso como sigue: Un conjunto difuso A sobre un universo de discurso Ω es un conjunto de pares:

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

Donde $\mu_A(x)$ es el grado de membresía de x con respecto al conjunto A. Existen varias notaciones para el concepto del conjunto difuso, dependiendo de la naturaleza del universo de discurso sobre el que definimos un conjunto difuso. Las más importantes son:

a) Dado un universo de discurso finito: $\Omega = \{ x_1, x_2, ..., x_n\}$ entonces un conjunto difuso A se puede denotar como:

$$A = \mu_1/x_1 + \mu_2/x_2 + ... + \mu_n/x_n$$

donde μ_i representa el grado de membresía de x_i con $i = 1, 2, ... , n$.

b) Dado un universo de discurso finito: Ω, un conjunto difuso A sobre Ω se puede representar como:

$$\int \mu_A(x) / x$$

donde $\mu_A(x)$ es el grado de membresía de x.

4.3.3: Propiedades de los conjuntos difusos.

Existen ciertas características o propiedades que son comunes a los conjuntos difusos, a continuación presentaremos algunas de ellas, solamente las necesarias para poder entender el resto de este capítulo.

- Igualdad de conjuntos difusos: Dos conjuntos difusos A y B definidos sobre un conjunto universo Ω, se dicen que son iguales, denotado como A = B, si y solo si:

$$\forall x \in \Omega, \mu_A(x) = \mu_B(x)$$

- Inclusión de un conjunto en otro: Dados dos conjuntos difusos A y B definidos sobre un conjunto universo Ω, decimos que A está incluido en B, denotado como $A \subseteq B$; si y solo si:

$$\forall x \in \Omega, \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

- Soporte de un conjunto difuso: El soporte de un conjunto difuso A definido sobre un conjunto universo Ω es un subconjunto que satisface la siguiente expresión:

$$\mathrm{Supp}(A) = \{ x \in \Omega \mid \mu_A(x) > 0 \}$$

  Si el soporte resulta en un conjunto finito, entonces es llamado soporte compacto.

- Núcleo de un conjunto difuso: El núcleo de un conjunto difuso A definido sobre un conjunto universo Ω es un subconjunto de dicho universo que satisface la siguiente expresión:

$$\mathrm{Core}(A) = \{ x \in \Omega \mid \mu_A(x) = 1 \}$$

- Altura de un conjunto difuso: La altura de un conjunto difuso A definido sobre un conjunto universo Ω se define como:

$$\mathrm{Hgt}(A) = \sup_{x \in \Omega} \mu_A(x) = 1$$

- Conjunto difuso normalizado: Un conjunto difuso A definido sobre un conjunto universo Ω se dice que está normalizado si y solo si:

$$\exists x \in \Omega, \mu_A(x) = 1$$

  esta definición implica que hgt(A) = 1. Si la altura es menor que uno, hgt(A) < 1; entonces el conjunto difuso es llamado subnormalizado.

Gráficamente podemos mostrar el núcleo, altura y soporte de un conjunto difuso en la siguiente figura:

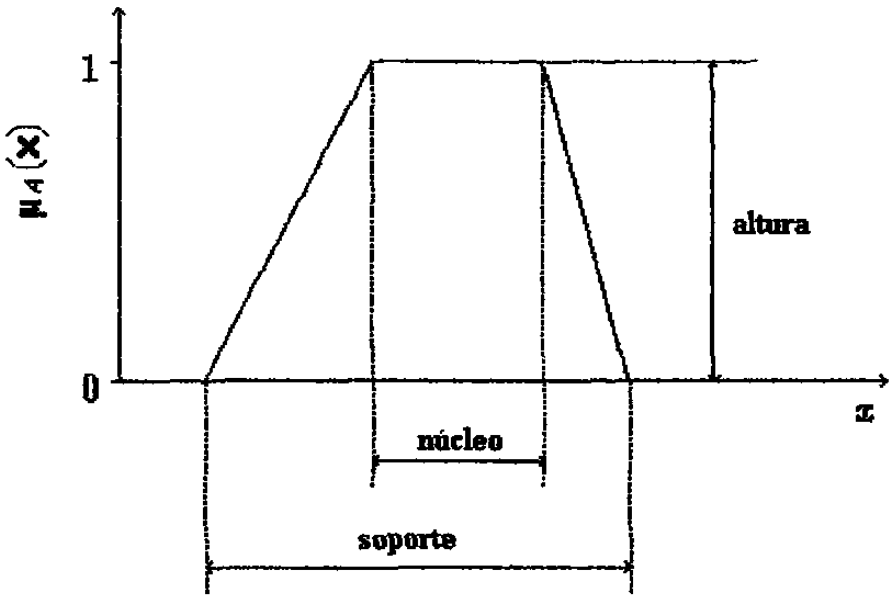


Figura 4.6: Características de los conjuntos difusos.

Los elementos de x donde se cumpla que $\mu_A(x) = 1/2$, son llamados puntos de cruce. Aquí podemos distinguir el α-corte de un conjunto difuso y que está definido como:

$$\alpha\text{-corte}(A) = \{ x \in \Omega \mid \mu_A(x) \geq \alpha \}$$

Un α-corte de un conjunto difuso es con frecuencia llamado conjunto plano. Similarmente, un α-corte fuerte puede es definido por:

$$\bar{\alpha}\text{-corte}(A) = \{ x \in \Omega \mid \mu_A(x) > \alpha \}$$

4.3.4: Números e intervalos difusos.

El miembro principal y básico de la lógica difusa es el número difuso. El concepto de número difuso fué introducido por Zadeh con el propósito de analizar y manipular valores numéricos aproximados. Este concepto ha sido refinado a través del tiempo. Aquí definiremos a un número difuso simplemente como un número ordinario cuyo valor preciso es un poco incierto, y consiste de un rango de valores que se aproximan o se alejan del valor entero de este número. Aquí, por ejemplo, tenemos un número difuso: el dos difuso.

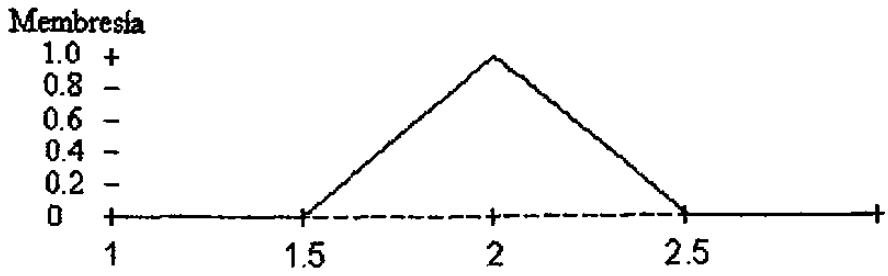


Figura 4.7: Representación gráfica del número dos difuso.

En la lógica difusa, el rango de valores posibles para un número difuso, tiene asignado generalmente un nivel de confianza (grado de verdad), representado por valores entre 0 y 1. Así, nuestra confianza de que los números 1.5 o menores pertenezcan al 2 difuso es cero, como lo es para nuestra confianza de que los números 2.5 o mayores pertenezcan al 2 difuso. Nuestra confianza de que el 1.6 pertenezca al 2 difuso es 0.2; para 1.7 es 0.4; y así sobre la confianza de 1 para 2. Para los números más grandes de 2, la confianza declina conforme el número se incrementa, siendo 0.8 para 2.1, 0.6 para 2.2, y así sobre la confianza cero para 2.5.

Sin embargo, podemos definir más formalmente a un número difuso como un tipo especial de un conjunto difuso. Para que un conjunto difuso F es un número difuso debe de reunir las siguientes características:

a) el conjunto difuso es convexo.
b) el conjunto difuso está normalizado.
c) la función de membresía del conjunto difuso es continua en algunas partes.
d) el núcleo del conjunto difuso consiste de un solo valor.

Una forma muy conveniente de describir los números difusos es usar palabras modificadoras. Por ejemplo, el dos difuso mostrado en la figura anterior podría ser completamente especificado por "aproximadamente 2". Otras palabras modificadoras disponibles son "casi", "cerca" y "crudamente", con incertidumbres progresivamente más grandes. Estas palabras son llamadas *compensaciones* en los círculos matemáticos difusos.

Con los números difusos, podemos hacer comparaciones aproximadas. Es bastante posible, por ejemplo, preguntar si la edad de una persona es aproximadamente igual o cerca de 30. Este es con frecuencia muy útil cuando nuestros datos son imprecisos, o cuando no queremos la rigidez de aceptar una persona de 30 años de edad pero rechazamos a uno de treinta años más un día de edad.

Las operaciones matemáticas tales como la adición, sustracción, etc. pueden ser ampliadas para usar números difusos por medio del principio de extensión, el cual será explicado en la siguiente sección. Por último, además de los números difusos se pueden considerar también los intervalos difusos. Un intervalo difuso es un conjunto difuso con las mismas restricciones definidas para los números difusos, con la excepción de que el núcleo no está restringido a ser solamente un punto. Como ejemplo tenemos el siguiente intervalo: de casi 2 a casi 7.

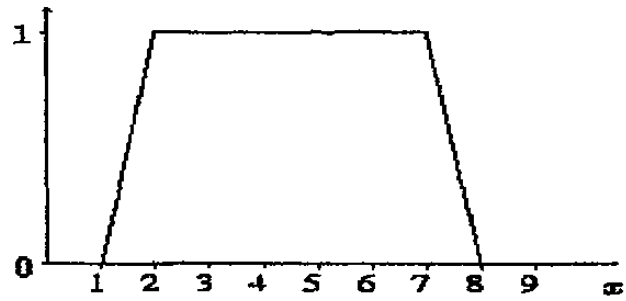


Figura 4.8: Representación gráfica del intervalo difuso casi 7.

La función de membresía tanto de un número como de un intervalo difuso está dada en la siguiente definición:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} r_M(x) & si & x \in [m-a, m] \\ \alpha_M & si & x \in [m, n] \\ s_M(x) & si & x \in (n, n+b] \\ 0 & \text{en otro caso} & \end{cases}$$

Donde:

r_M y s_M son elementos del universo R $\rightarrow$ [0,1], r_M es creciente, s_M es decreciente; $r_M(m) = \alpha_M = s_M(n)$, $\alpha_M \in (0,1]$ y a, b, m y n $\in$ R.

Al elemento α_M se le conoce como la altura del número o intervalo difuso, al intervalo [m,n] se le conoce como intervalo modal y a los números a y b se les llama holguras izquierda y derecha

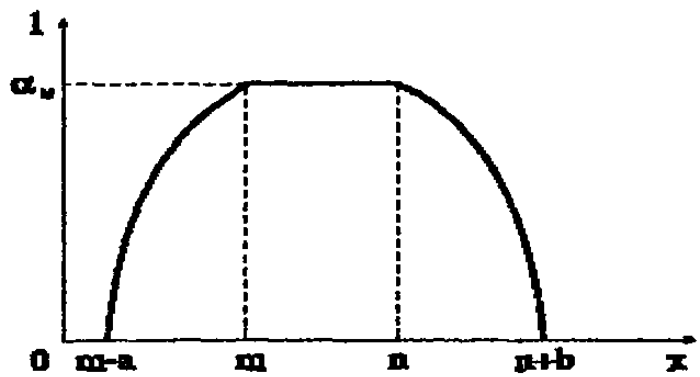


Figura 4.9: Representación gráfica de un intervalo difuso.

4.3.5: El principio de extensión.

Este principio propuesto por Zadeh, es uno de los elementos más importantes de la teoría de conjuntos difusos; y proporciona un método general que permite extender conceptos matemáticos no difusos para el tratamiento de cantidades difusas. Este principio se define como sigue:

Sea f: x → y (con universos arbitrarios) y sea "A" un subconjunto difuso de "x" entonces la imagen de "A" a través de f es un conjunto difuso de "y" cuya función de membresía está dada por: $B(y) = \sup [\, A(x) \text{ y } | y = f(x) \,]$.

Gracias al principio de extensión es posible extender las operaciones aritméticas clásicas para que puedan tratar con números difusos. Así, las cuatro operaciones fundamentales quedan extendidas como sigue:

- **Adición extendida:** Dadas dos cantidades difusas A_1 y A_2, la función de pertenencia de la suma viene dada por la expresión:

$$\mu_{A_1 \oplus A_2}(y) = \sup\{\min(\mu_{A_1}(y - x), \mu_{A_2}(x))/x \in \Re\}$$

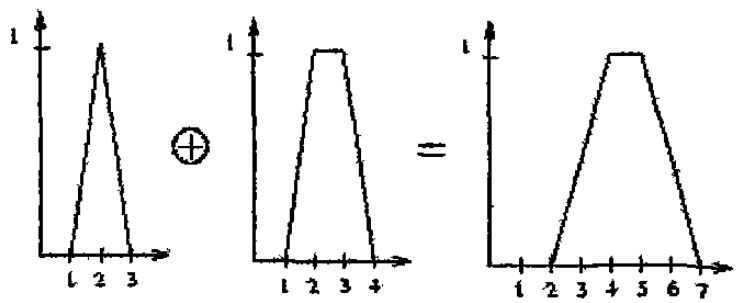


Figura 4.10: Gráfica de la suma de dos números difusos.

- **Sustracción extendida:** Dadas dos cantidades difusas A_1 y A_2, la función de pertenencia de la resta viene dada por la expresión:

$$\mu_{A_1 \ominus A_2}(y) = \sup\{\min(\mu_{A_1}(y + x), \mu_{A_2}(x))/x \in \Re\}$$

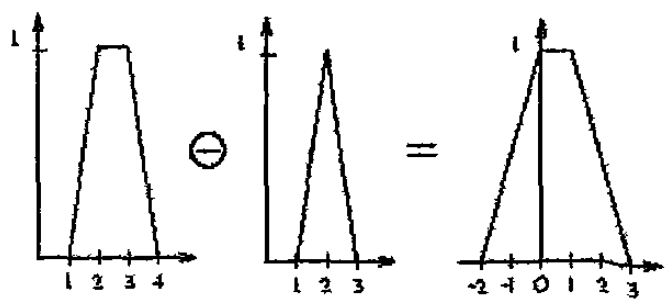


Figura 4.11: Gráfica de la sustracción de dos números difusos.

- **Producto extendido:** El producto de dos cantidades difusas A_1 y A_2, se obtiene por la función:

$$\mu_{A_1 \otimes A_2}(z) = \begin{cases} \sup\{\min(\mu_{A_1}(z/y), \mu_{A_2}(y))/y \in \Re - \{0\}\} & si\ z \neq 0 \\ \max(\mu_{A_1}(0), \mu_{A_2}(0)) & si\ z = 0 \end{cases}$$

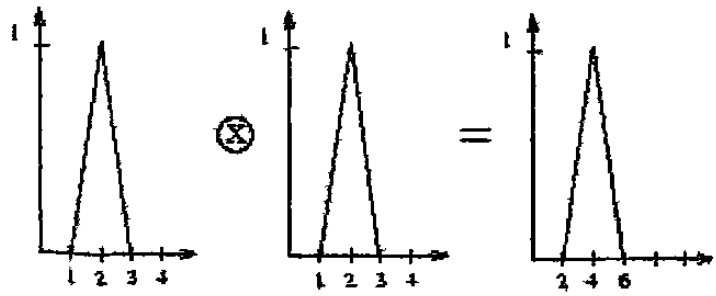


Figura 4.12: Gráfica de la multiplicación de dos números difusos.

- **Cociente extendido:** La división de dos cantidades difusas se define mediante la siguiente expresión:

$$\mu_{A_1 \div A_2}(z) = \sup\{\min(\mu_{A_1}(y.z), \mu_{A_2}(y))/y \in \Re\}$$

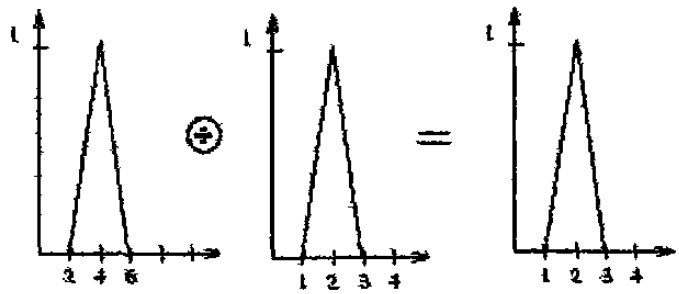


Figura 4.13: Gráfica del cociente de dos números difusos.

4.3.6: Representaciones de conjuntos difusos.

En la teoría de conjuntos difusos la mayoría de las operaciones están definidas para universos continuos. Las definiciones incluyen operaciones sobre conjuntos discretos como casos especiales. En la práctica los conjuntos difusos son almacenados en la memoria de computadoras por estructuras de datos y las operaciones sobre conjuntos difusos están implementados por algoritmos de computadoras. Ya que la mayoría de las aplicaciones de la teoría de conjuntos difusos están basadas en computadoras, es necesario considerar las diversas representaciones de conjuntos difusos. Se pueden distinguir diversos tipos de representaciones de conjuntos difusos.

- **Representación funcional:** este tipo de representación de conjuntos usa descripciones funcionales para representar conjuntos difusos:

$$\mu_A(x) = f(x)$$

El uso de funciones para representar conjuntos difusos plantea varias dificultades en la práctica, cuando se realizan combinaciones con otros conjuntos difusos. El uso de símbolos de cálculo solamente está limitado a casos simples debido a la complejidad de las operaciones. Aunque es posible "almacenar" operaciones en forma simbólica, los resultados de la operación no pueden ser derivados simbólicamente y una aproximación del resultado de una operación tiene que ser hecha. Por lo anterior es necesaria la representación discreta de conjuntos difusos.

- **Representación por pares ordenados:** define un conjunto difuso de la siguiente forma:

$$\mu_A(x) = \mu_1/x_1 + \mu_2/x_2 + \ldots + \mu_n/x_n.$$

Esta representación es natural para los conjuntos difusos sobre dominios discretos.

- **Representación a nivel de conjunto:** describe un conjunto difuso por sus niveles de conjuntos (α-cortes).

$$\mu_A(x) = \sup_{\alpha \in (0,1]} \alpha\text{-corte}\,(\mu_A(x))$$

4.3.7: Funciones de membresía.

El problema de construir una función de membresía que adecuadamente capture los significados de los términos lingüísticos empleados en una aplicación en particular (así como, el problema de determinar los significados de las operaciones asociadas) no pertenece a la teoría de conjuntos difusos, sino en general al área de la "adquisición del conocimiento". Sin embargo, mencionaremos en forma general las diversas formas en que pueden ser obtenidas.

Una función de membresía caracteriza la incertidumbre en los conjuntos difusos, y son necesarias para poder definir y operar los conjuntos difusos. Para construir la función de membresía de un conjunto difuso involucra:

- El dominio del conocimiento específico de interés.
- Uno o varios especialistas en este campo.
- Un ingeniero de conocimiento que obtiene el conocimiento de interés del especialista y expresa el conocimiento en términos de proposiciones involucrando variables lingüísticas.

Esto es, el conocimiento que representa a una función de membresía es obtenido a través de la interacción entre el ingeniero de conocimiento y los especialistas:

- El ingeniero intenta obtener el conocimiento en términos de proposiciones expresadas en lenguaje natural.

- Intenta determinar el significado de cada término lingüístico usado. (Es en esta práctica donde las funciones de membresía son construidas).

Existen en la literatura numerosos métodos para construir funciones de membresía que están basados en el juicio del especialista. Estos, pueden ser clasificados en:

- **Directos**: Los especialistas proveen respuestas para preguntas de varias especies que explícitamente pertenecen a la construcción de la función de membresía.

- **Indirectos**: Los especialistas dan respuestas a preguntas más simples y más fáciles de responder y menos sensibles en diversas direcciones del juicio subjetivo, que pertenecen a la construcción de la función de membresía.

Sin embargo, no solamente a través del conocimiento de un especialista es que se pueden construir funciones de membresía, existen métodos más formales y automatizados para llevar a cabo esta tarea, a continuación mencionaremos algunos de ellos:

- **Intuición:** simplemente se derivan las funciones de membresía a través de la inteligencia y entendimiento innatos. La intuición involucra conocimiento semántico y contextual sobre los problemas; así como valores de verdad de tipo lingüístico.

- **Inferencia:** usamos conocimiento para la realización del razonamiento deductivo, esto es; deseamos deducir o inferir una conclusión, dado un cuerpo de hechos y conocimientos.

- **Orden de clasificación:** asociamos preferencias hechas por un individuo, un comité u otros métodos de opinión que pueden ser usados para atribuir valores de membresía para una variable difusa.

- **Redes neuronales:** es una técnica que procura construir un programa inteligente usando modelos que simulan las neuronas del cerebro. Aquí se genera un proceso de aprendizaje para obtener la función de membresía a través de datos de muestra.

- **Algoritmos genéticos:** aquí las funciones de membresía y sus formas son codificadas y existe una función de evaluación que es usada para adaptar cada función de membresía a nuevas situaciones.

- **Razonamiento inductivo:** se realiza con el objetivo de agrupar más óptimamente los parámetros correspondientes para la salida de clases. Se basa en el esquema ideal que describe una relación de entrada y salida para una base de datos bien definida. El objetivo da inducción es descubrir una ley que tenga validez objetiva y aplicación universal.

Por lo anteriormente expuesto, las funciones de membresía pueden tomar diversas formas, sin embargo, existen algunas funciones que son más usadas en las aplicaciones, estas son:

a) Función de membresía triangular: una función de membresía triangular está formada por tres parámetros: **a, b** y **c.** Como se muestra en la siguiente figura:

$$\text{triangulo}(x,a,b,c)=\max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a},\frac{c-x}{c-b}\right),0\right).$$

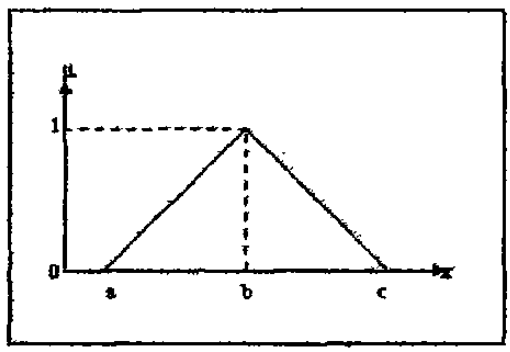


Figura 4.14: Función de membresía triangular.

b) Función de membresía gaussiana: una función de membresía gaussiana está definida por dos parámetros: **c** y σ, donde **c** determina el centro y σ determina el ancho de la función de membresía, como en la siguiente figura:

$$\text{gaussiana}(x,c,\sigma)= e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$$

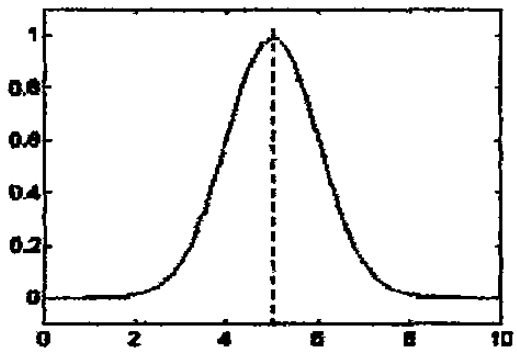


Figura 4.15: Función de membresía gaussiana.

c) Función de membresía trapezoidal: una función de membresía trapezoidal está definida por cuatro parámetros: **a, b, c** y **d** como se muestra en la siguiente figura:

$$\text{trapezoide}(x,a,b,c,d)=\begin{cases} 0, & x\le a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a\le x\le b \\ 1, & b\le x\le c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c\le x\le d \\ 0, & d\le x \end{cases}$$

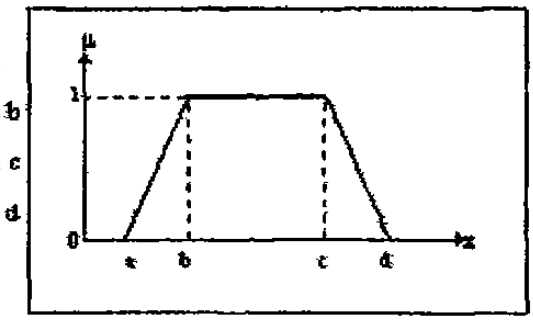


Figura 4.16: Función de membresía trapezoidal.

Es obvio que la función de membresía trapezoidal se reduce a una función de membresía triangular para el caso en que **b** es igual a **c**.

d) Función de membresía de campana: una función de membresía de campana está definida por tres parámetros: **a**, **b** y **c**.

$$\text{campana}(x,a,b,c) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}$$

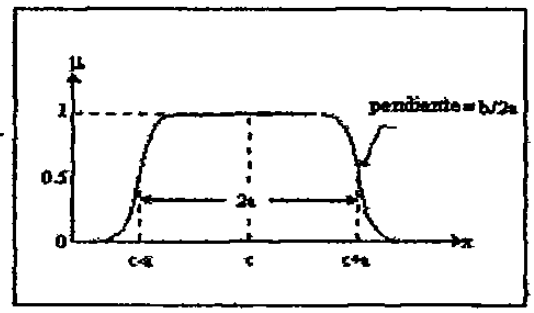


Figura 4.17: Función de membresía de campana.

e) Función de membresía sigmoide: una función de membresía sigmoide está definida por dos parámetros, **a** y **c**, donde **a** determina la pendiente en el punto de cruce **x=c**.

$$\text{sigmoide}(x,a,c) = \frac{1}{1+e^{-a(x-c)}}$$

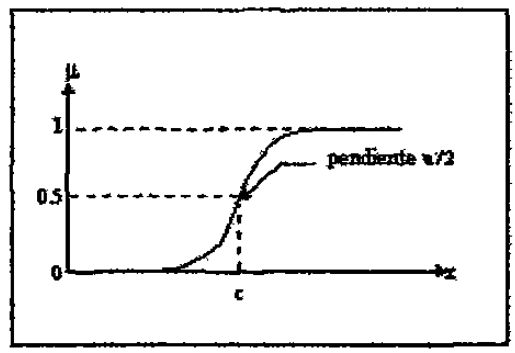


Figura 4.18: Función de membresía sigmoide.

4.4: Variables lingüísticas.

La importancia de la teoría de conjuntos difusos es que nos proporciona instrumentos teóricos de gran poder para representar y manipular conceptos expresados en lenguaje natural, los cuales son predominantemente vagos y además dependen del contexto. Por ejemplo, los conceptos tales como barato y caro dependen tanto del contexto como de la opinión del comprador. El concepto de distancia larga tiene diferentes significados para los contextos de andar a pié, en carro o en avión.

Es decir, conceptos tales como barato, caro, largo, corto, alto, bajo, etc; pueden ser representados y manipulados en forma de conjuntos difusos. La función de membresía asignada a tales conjuntos difusos, describiría el comportamiento de tales conceptos y las operaciones sobre dichos conjuntos difusos describirían las relaciones entre dichos conceptos.

4.4.1 Modificadores lingüísticos.

Los modificadores lingüísticos pueden ser usados para modificar el significado de un conjunto difuso. Por ejemplo, el modificador lingüístico "*muy*" puede ser usado para cambiar el significado de "*grande*" a "*muy grande*". Varios autores han estudiado los modificadores lingüísticos para los conjuntos difusos, también conocidos como "cercos" o "separadores" (hedges). Ejemplos de separadores son: muy, ligeramente, más o menos, etc. Generalmente, el estudio de los separadores toma dos enfoques principales que son:

- Separadores de poder:
- Separadores de cambio:

A continuación trataremos de explicar en que consiste cada uno de ellos.

4.4.2: Separadores de poder.

Los separadores de poder operan sobre grados de membresía y están representados por:

$$m_p(A) = \int_X \mu_A^p(x)/x$$

Donde "m" es el conjunto difuso que representa a un modificador lingüístico y "p" es un parámetro específico asignado a un modificador lingüístico en especial que modifica la función de membresía, con un rango de membresía unitario, $\mu_A(x) \in (0,1]$. Es decir, existen valores establecidos de "p" para cada modificador lingüístico; por ejemplo, se asigna 2 para "muy", y 1/2 se asigna para "más o menos", etc.

Gráficamente esto puede verse de la siguiente manera:

$$\mathbf{muy}(A) = \int_X \mu_A^2(x)/x$$

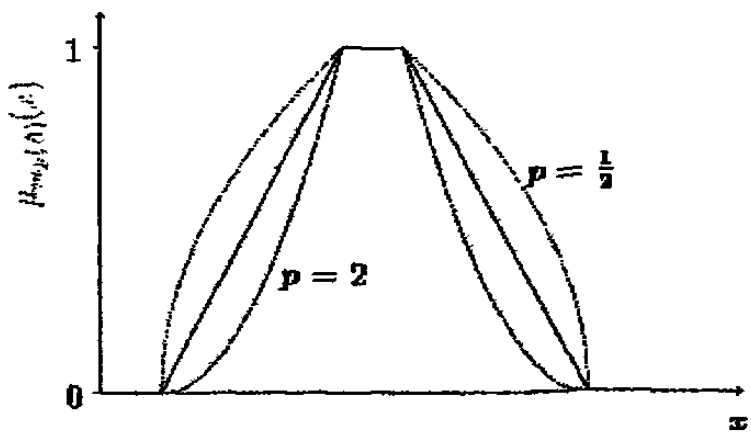


Figura 4.19: Representación gráfica de un modificador lingüístico.

La figura anterior muestra los modificadores lingüísticos "muy" y "más o menos". La ventaja del enfoque de los separadores de poder es que para cada separador una operación estándar puede ser definida al escoger un valor estándar para "p". Dependiendo de los valores asignados a "p", las propiedades de "m" cambian:

- $0 < p\ 1$: El conjunto difuso está dilatado. mp(A)A.
- $p = 1$ El conjunto difuso no está modificado. mp(A)=A.
- $p > 1$: El conjunto difuso está concentrado. mp(A)A.

Otra característica de los separadores de poder es que su núcleo y su soporte no son cambiados a pesar de la operación definida por el separador de poder, ya que $1^p = 1$ y $0^p = 0$ que son los valores extremos permitidos para $\mu_A(x)$.

4.4.2: Separadores de cambio.

Los separadores de cambio son definidos por la siguiente formula:

$$m_s(A) = \int_X \mu_A(x - s)/x$$

Donde m_s es un modificador lingüístico y s representa la magnitud del cambio. El valor de s tiene diferentes valores dentro de un modificador. Existen diversos esquemas para aplicar un modificador de cambio a un conjunto difuso, sin embargo, debido a la naturaleza de esta Tesis; no es necesario entrar en detalles, solamente mencionamos su existencia.

4.5: Operaciones con conjuntos difusos.

Ya que la lógica difusa es un subconjunto de la lógica predicativa, entonces los operadores para los conjuntos difusos y para los conjuntos no difusos son en mucho los mismos. Cuando se aplican operadores difusos a conjuntos no difusos, se obtienen las mismas respuestas que si se hubiera usado los correspondientes operadores de la lógica predicativa.

Los operadores lógicos están basados en valores de verdad que van de 0 (falso) a 1 (verdadero). Cuando estos operadores lógicos son aplicados a valores no difusos, dan los mismos resultados como con los operadores familiares AND, OR y NOT. Un paralelismo más directo con la lógica convencional es el uso de tres operaciones de conjuntos básicas: la intersección, unión y complemento.

4.5.1: La unión de conjuntos difusos.

La función de membresía de la Unión de dos conjuntos difusos A y B con funciones de membresía μ_A y μ_B respectivamente es definida como el máximo de las dos funciones de membresía individuales. Esto es llamado el criterio *máximo*.

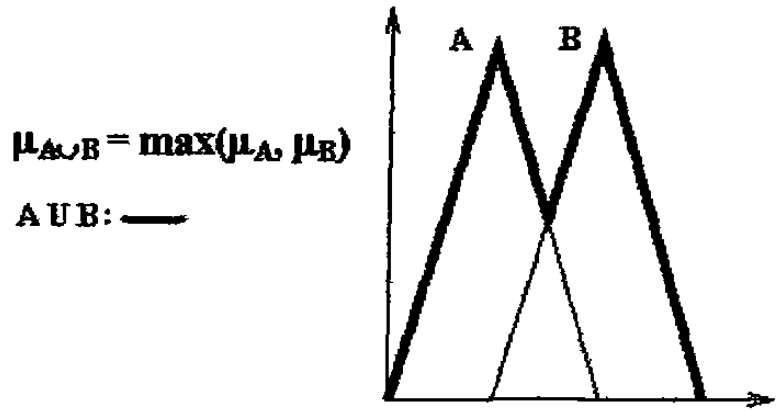


Figura 4.20: Representación gráfica de la unión de dos conjuntos difusos.

La operación Unión en la teoría de conjuntos difusos es el equivalente de la operación **OR** en el álgebra Booleana.

4.5.2: La intersección de conjuntos difusos.

La función de membresía de la Intersección de dos conjuntos difusos A y B con funciones de membresía μ_A y μ_B respectivamente es definida como el mínimo de las dos funciones de membresía individuales. Esto es llamado el criterio *mínimo*.

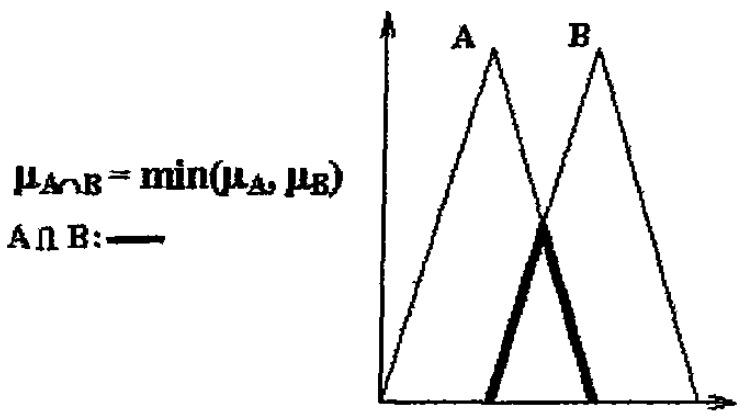


Figura 4.21: Representación gráfica de la intersección de dos conjuntos difusos.

La operación de Intersección en la teoría de conjuntos difusos es el equivalente de la operación **AND** en el álgebra Booleana.

4.5.3: El complemento de un conjunto difuso.

La función de membresía del Complemento de un conjunto difuso A con una función de membresía μ_A es definida como la negación de la función de membresía especificada. Esto es llamado el criterio de *negación*.

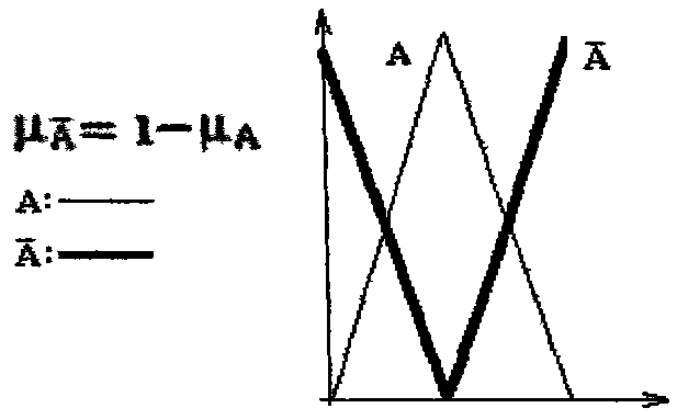


Figura 4.22: Representación gráfica del complemento de un conjunto difuso.

La operación Complemento en la teoría de conjuntos difusos es el equivalente de la operación **NOT** en el álgebra Booleana.

4.5.4: Otras operaciones.

Las siguientes reglas las cuales son comunes en la teoría de conjuntos clásica también se aplican a la teoría de conjuntos difusos:

- Leyes De Morgan:

$$\overline{(A \cap B)} = \bar{A} \cup \bar{B}$$

$$\overline{(A \cup B)} = \bar{A} \cap \bar{B}$$

- Ley Conmutativa:

$$\mathbf{A} \cap \mathbf{B} = \mathbf{B} \cap \mathbf{A}$$

$$\mathbf{A} \cup \mathbf{B} = \mathbf{B} \cup \mathbf{A}$$

- Ley Asociativa:

$$(\mathbf{A} \cap \mathbf{B}) \cap \mathbf{C} = \mathbf{A} \cap (\mathbf{B} \cap \mathbf{C})$$

$$(\mathbf{A} \cup \mathbf{B}) \cup \mathbf{C} = \mathbf{A} \cup (\mathbf{B} \cup \mathbf{C})$$

- Ley Distributiva:

$$\mathbf{A} \cap (\mathbf{B} \cup \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cap \mathbf{B}) \cup (\mathbf{A} \cap \mathbf{C})$$

$$\mathbf{A} \cup (\mathbf{B} \cap \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cup \mathbf{B}) \cap (\mathbf{A} \cup \mathbf{C})$$

4.6: Relaciones difusas.

Hasta aquí hemos considerado solamente conjuntos difusos con funciones de membresía de una sola variable: Los conjuntos difusos sin embargo, pueden ser extendidos para manejar funciones de membresía de una dimensión más alta. A estos conjuntos difusos multidimensionales se les conoce como relaciones difusas.

Las relaciones difusas representan un grado de presencia, ausencia, interacción o falta de conexión entre los elementos de dos o más conjuntos difusos. Algunos de ejemplos de las relaciones difusas son: z es más grande que x, z está cerca de x, z es mucho más grande que x, etc. Las relaciones difusas resultan útiles debido a que gracias a ellas se pueden representar declaraciones lingüísticas del tipo "aproximadamente iguales", "ligeramente mayor", "casi el doble que", etc. Es decir, sirven para modelar asociaciones, relaciones o correspondencias lingüísticas.

Además, las propiedades y operaciones sobre conjuntos difusos pueden ser extendidas para manejar las propiedades y operaciones de las relaciones difusas. Debido a la naturaleza de esta Tesis no entraremos en detalles acerca de las relaciones difusas.

4.7: Razonamiento con lógica difusa.

Así como la teoría de conjuntos clásica sirve de base a la lógica clásica, así también, la teoría de conjuntos difusos sirve de base para la lógica difusa. Esto significa que las operaciones teóricas definidas para los conjuntos como la unión, intersección y complemento, tienen un correspondiente significado lógico; como las operaciones "o", "y" y "no" respectivamente.

Los aspectos relacionados con el razonamiento difuso serán tratados con mayor detalle más adelante, en esta sección mostraremos los aspectos más importantes. Primero, debemos recordar que uno de los componentes más importantes de la lógica difusa son las reglas, estas reglas serán expresadas como implicaciones lógicas en la forma de declaraciones SI-ENTONCES, (IF-THEN):

SI u es A ENTONCES B.

Esta misma forma siguen las proposiciones de la lógica clásica:

SI Sócrates es hombre ENTONCES es mortal.

Entonces la lógica difusa extiende las operaciones de los silogismos de la lógica clásica para poder manipular conjuntos difusos, por ejemplo, l a forma del silogismo Modus Ponens es extendida a una forma más generalizada:

Premisa 1:	u es A*.
Premisa 2:	SI u es A ENTONCES v es B.
Consecuencia:	v es B*.

Donde A* y B* son conjuntos difusos, por ejemplo:

Premisa 1: Este hombre tiene una estatura menor a los 1.65 metros.
Premisa 2: SI un hombre tiene baja estatura ENTONCES no es buen jugador de fútbol.
Consecuencia: Este hombre es un deficiente jugador de fútbol.

4.6 Conclusiones.

Los sistemas difusos, incluyen la lógica difusa y la teoría de conjuntos difusos, proporcionan una adición rica y significativa a la lógica estándar. Las matemáticas generadas por estas teorías son consistentes y robustas, y la lógica difusa puede ser considerada como una generalización o extensión de la lógica clásica, que permite representar la vaguedad de los conceptos del sentido común

CAPITULO 5
APLICACIONES DE LA LOGICA DIFUSA.

La lógica difusa es un paradigma para una metodología de diseño alterna que puede ser aplicada en el desarrollo tanto de sistemas lineales y no lineales para sistemas tanto de inferencia como de control. Con la lógica difusa los diseñadores pueden lograr costos de desarrollo menores, características superiores, y un mejor desempeño de los productos finales. Además, los productos pueden ser comercializados más rápido y con una mayor relación costo-eficiencia. Enseguida vamos a exponer las dos aplicaciones básicas de la lógica difusa que han tenido un gran éxito, y de las cuales se derivan todas las demás: los sistemas basados en reglas y el control electrónico.

5.1: Panorama General.

La lógica difusa tiene un panorama prometedor, ya que puede ser aplicada en áreas tan diversas como control, electrónica, medicina, biología, ecología, economía, finanzas, política y más, veamos la razón de esa afirmación. Como ya mencionamos, la lógica convencional es un caso particular de la lógica difusa, ya que al hacer un grado de pertenencia igual a 0 se indica una pertenencia nula, e igualando a 1 una pertenencia total. Y como sabemos, la lógica binaria es el soporte matemático de los sistemas digitales. Similarmente, la lógica difusa puede ser el soporte para desarrollar sistemas de control electrónico, sistemas expertos y hardware difuso. Y su implementación se lleva a cabo igual que en la lógica binaria.

Los sistemas basados en lógica difusa controlan adecuadamente procesos que están regidos por reglas intuitivas difíciles de expresar matemáticamente. La potencia de esta metodología se debe a la posibilidad de expresar operaciones y controlar las reglas del sistema mediante palabras de uso cotidiano, eliminando así los altos contenidos de matemática y física de un proceso y va directo al nivel en que el sistema trabaja, esto permite aproximarse intuitivamente a la solución de un problema mediante la formulación de reglas. La forma de expresar las reglas de operación mediante palabras permite controlar procesos sencillos con una decena de reglas, y procesos complejos con 30 o 40 reglas, reduciendo considerablemente la cantidad de código de programación, y por tanto el tiempo de diseño, el tiempo de desarrollo de un prototipo, la cantidad de memoria para almacenarlo, etc. La descripción de un proceso mediante la formulación de reglas derivadas de la experiencia en vez de ecuaciones matemáticas lleva a sustituir implementaciones con procesadores de 32 bits por microcontroladores de 8 bits. Además puede implementarse en software haciendo uso de herramientas tipo CASE, que generalmente generan código en lenguaje C o en ensamblador para su uso en microcontroladores convencionales; convirtiendo a la lógica difusa en una alternativa más apropiada y económica.

Por último, en las aplicaciones difusas es muy fácil realizar modificaciones, las cuales pueden llevarse a cabo cambiando algunas premisas y operaciones, o adicionando reglas (el criterio del comportamiento del sistema va implícito en las reglas); mientras que en un sistema convencional, un pequeño cambio requiere de la derivación completa de nuevas ecuaciones, en las aplicaciones difusas no necesitan de la etapa de obtención del modelo matemático del proceso. Los ingenieros japoneses iniciaron el estudio y aplicación en la década del 70 y hoy se encuentran a la vanguardia en el diseño con lógica difusa; la han incorporado en electrodomésticos, cámaras fotográficas y equipos de aire acondicionado, reduciendo considerablemente su consumo de potencia, mejorando su eficiencia e introduciendo gran versatilidad y funcionalidad en dichos aparatos.

5.2: Aplicaciones realizadas.

Las aplicaciones con lógica difusa involucran dos áreas principales: los sistemas de inferencia, que han sido exitosamente aplicados en muchas áreas, que incluyen el reconocimiento de patrones, soporte para decisiones, razonamiento aproximado, robótica, entendimiento del lenguaje natural y de imágenes, aprendizaje de máquinas, sistemas de bases de datos, sistemas expertos, procesamiento de información, análisis de datos, control de inventarios, minería del conocimiento y otros Por otro lado, la otra aplicación de la lógica difusa, y tal vez la más predominante; involucra el área de la teoría de control. Los controladores con lógica difusa han sido desarrollados para controlar hornos de cemento, aeronaves, elevadores, electrodomésticos y transmisiones de automóviles solo por nombrar algunos.

Toda esta amplia variedad de aplicaciones basadas en lógica difusa ha sido desarrollada en un periodo relativamente pequeño de tiempo. Todos estos sistemas difusos comparten características similares, tanto en su diseño como en su desarrollo. La mayoría de los sistemas difusos consisten en general de varios subsistemas o módulos:

- Un subsistema de difusificación
- Una máquina de inferencia difusa.
- Una base de reglas difusas.
- Un subsistema de dedifusificación.

Esto puede ser representado gráficamente en la siguiente figura, la cual muestra el esquema general de un sistema difuso.

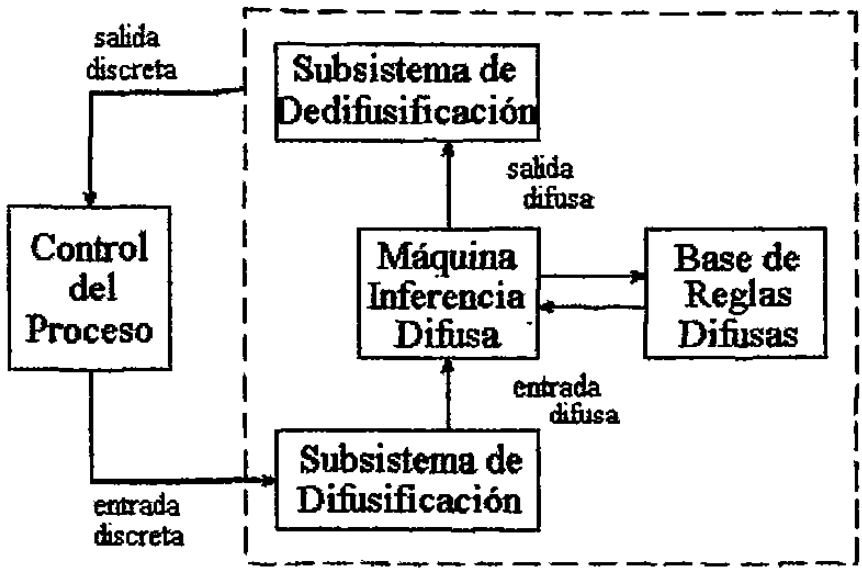


Figura 5.1: Esquema general de un sistema difuso.

En un sistema difuso, dado un conjunto de entradas discretas que representan el estado actual del proceso, el subsistema de difusificación los convierte en conjuntos difusos apropiados y determina su grado de membresía para estos conjuntos. Se debe de resaltar que dada una entrada puede esta simultáneamente ser miembro de más de un conjunto dentro de una sola región difusa. Las entradas difusas son entonces usadas por la máquina de inferencia para determinar las salidas difusas. La máquina de inferencia interactúa con la base de reglas y usa sus salidas para determinar cuales reglas son aplicables. Las reglas son independientes, y por lo tanto, pueden ser evaluadas en paralelo. Las salidas son conjuntos difusos sobre el universo de las salidas posibles. Estas salidas difusas son dedifusificadas para generar salidas discretas usadas para controlar el proceso del sistema. Existen muchos métodos para llevar a cabo la dedifusificación, algunos de ellos son: el método del centroide, el método del centro máximo y el método del medio máximo.

En las siguientes secciones vamos a exponer las dos aplicaciones generales de la lógica difusa que consideramos las más importantes, y de las cuales de derivan todas las demás: los sistemas basados en reglas y el control electrónico. La exposición mostrará los lineamientos teóricos más generales y al final se dará un pequeño ejemplo de su aplicación práctica.

5.3 Sistemas basados en reglas difusas.

Como mencionamos anteriormente, la lógica difusa es un super conjunto de la lógica clásica. La lógica clásica es el estudio de los métodos y principios del razonamiento en todas sus formas posibles. La lógica clásica trata con proposiciones que son o verdaderas o falsas. La lógica difusa extiende la membresía de las proposiciones para incluir una membresía gradual entre los dos extremos clásicos: falso o membresía nula y verdadero o membresía completa. También vimos que las proposiciones difusas son creadas usando conjuntos difusos

1020126766

individuales o grupos de conjuntos difusos. El poder de la lógica difusa reside en su habilidad de expresar conceptos con ausencia de límites claramente definidos. Estos conceptos son expresados como variables lingüísticas. En lugar de desarrollar proposiciones las cuales dependan de variables matemáticas, las proposiciones difusas usan variables lingüísticas para expresar la relación entre los conceptos. Las proposiciones difusas permiten que los sistemas a ser creados razonen en una forma más humana y son, por lo tanto, más fáciles de entender y mantener. Debido a la correlación directa entre una expresión lingüística y el sistema a ser controlado, las reglas difusas pueden ser obtenidas directamente de un experto en términos lingüísticos vagos que pueden ser imposibles de representar en forma matemática.

Así entonces, todo lo anterior puede ser usado para crear sistemas expertos. Recordemos que un sistema experto es una aplicación usada para ejecutar una variedad muy complicada de tareas que solamente pueden ser llevadas por un número limitado de personas expertas e intensamente entrenadas. Un sistema experto capta el conocimiento básico que permite que una persona pueda desempeñarse como un experto frente a problemas complicados. Es decir, *son aplicaciones dotadas de procesos que reflejan el* discernimiento y la intuición humanas para ser capaces de enfrentar situaciones que constituyen todo un reto en el mundo real. Los sistemas expertos han sido aplicados con algún éxito en tareas de diagnóstico, planeación, predicción, diseño, interpretación, control, monitoreo de estado e instrucción.

A continuación vamos a exponer la forma en que la lógica difusa puede ser aplicada en sistemas de razonamiento, con lo cual estaríamos en la posibilidad de crear sistemas expertos, los cuales estarían capacitados para manejar reglas, las que estarían expresadas en el lenguaje ordinario, y a través de las cuales se podrían tomar decisiones, reconocer patrones, crear diagnósticos, etc. Obteniendo lo que podríamos llamar un sistema experto difuso. Sin embargo, vamos a enfocarnos sobre una clase especial de sistemas expertos conocidos como sistemas basados en reglas y que están enfocados para tratar de dar solución a alguna área de problema en especial.

5.3.1: Antecedentes.

Los sistemas basados en reglas, originalmente conocidos como sistemas de producción y más tarde como una subclase de sistemas expertos, son consecuencia de las primeras investigaciones sobre la solución de problemas en la Inteligencia Artificial. Estos sistemas se caracterizan por una idea general: los problemas en diversas áreas bien entendidas y estudiadas pueden ser resueltos al estructurar el conocimiento de dicho campo en reglas del tipo IF-THEN, y esta estructuración es realizada con ayuda de expertos en la materia.

Conforme el campo de la Inteligencia Artificial maduró, las técnicas para codificar el conocimiento involucraron una segunda generación de sistemas expertos los cuales combinan múltiples representaciones de conocimiento y estrategias de solución de problemas dentro de un solo sistema. Estos sistemas son ahora conocidos como Sistemas Basados en Conocimiento. La idea subyacente para los sistemas basados en el conocimiento es que el conocimiento es central para la solución de problemas y diferentes modelos y métodos de solución de problemas son necesarios para diferentes aspectos del problema.

5.3.2: Descripción General.

Codificar el conocimiento en reglas es la forma más común de representar el conocimiento para los sistemas basados en el conocimiento. La primer razón de su popularidad es debido a su simplicidad: una regla está compuesta de un antecedente (condición IF) y un consecuente (cláusula THEN). Las reglas pueden expresar un amplio rango de asociaciones, tales como situaciones y acciones correspondientes que son tomadas cuando estas situaciones ocurren, y como premisas y conclusiones que resultan cuando esas premisas son verdaderas. Las reglas generalizan relaciones entre los objetos. Ejemplos específicos de objetos son almacenados en una base de datos de hechos y las reglas son evaluadas en contra de estos hechos. Esta representación del conocimiento permite varios tipos de conocimiento a ser codificados.

Una segunda razón para la popularidad de este paradigma es que codificar un conocimiento en reglas, es similar a como los expertos humanos comunican su conocimiento. Esto facilita la adquisición de conocimiento requerido para construir una base de reglas. Múltiples expertos pueden ser entrevistados y su experiencia puede ser integrada en un depósito de conocimiento relevante. El análisis de sistemas legados y de los documentos escritos pueden también ser usados para adquirir el conocimiento necesario. De esta forma, una base de reglas es construida con un incremento constante. Sin embargo, lo fácil de la adquisición de conocimiento es engañoso; ya que la integración del conocimiento en una base de reglas debe ser realizada con la ayuda de un experto de la materia y solo puede ser llevada a cabo con la habilidad del ingeniero de conocimiento.

Esencialmente, una base de reglas es invocada al proporcionar al sistema basado en el conocimiento una descripción del problema o caso específico, y este sistema basado en el conocimiento buscará una respuesta a través de su conocimiento de reglas y de hechos. El mecanismo usado para trazar conclusiones basadas en las reglas contenidas en la base de conocimiento y en los datos del caso actual, es conocido como el proceso de razonamiento o estrategia de inferencia. La estrategia de inferencia especifica el orden en el cual las reglas serán comparadas con la base de conocimiento y la forma de resolver los conflictos que se presenten cuando varias reglas se activen a la vez.

Las dos estrategias que controlan la secuencia de la activación son el encadenamiento hacia delante y el encadenamiento hacia atrás. El método de inferencia del encadenamiento hacia adelante es una estrategia de razonamiento que es también conocida como inferencia conducida por datos, conducida por eventos, o pensamiento de lo particular a lo general. Empezando de los hechos conocidos, las reglas activadas derivan nuevos hechos, los cuales a su vez, activan otras reglas y así se forma una cadena de inferencia desde el estado fuente al estado meta. Una regla es activada al aparear el antecedente contra la base de hechos actual para actuar sobre el consecuente. La idea del encadenamiento hacia adelante es encontrar una secuencia de reglas que dados los datos y los hechos conocidos para un caso actual lleven a una respuesta. Este enfoque es útil cuando los hechos iniciales de una situación o problema son conocidos y existen muchas conclusiones meta posibles. Diversas áreas como diseño, configuración, planeación, programación, y clasificación son buenos candidatos para la estrategia de encadenamiento hacia adelante.

La otra estrategia de razonamiento fundamental es el encadenamiento hacia atrás. Esta estrategia también es conocida como conducida por metas, conducida por expectativas, o pensamiento de lo general a lo particular. Requiere examinar las partes consecuentes o de acción de las reglas para encontrar las que concluirían la meta actual, entonces se examinan los lados izquierdos o partes condición de esas reglas para encontrar que condición las activarían, entonces encontrar otras reglas cuyas partes acción concluyan estas condiciones, y así sucesivamente. Básicamente, este método empieza con la conclusión deseada o respuesta a una declaración problema y decide si los hechos existentes soportan la derivación de un valor presente en la base de conocimiento. El encadenamiento hacia atrás es útil en áreas donde existen muchos hechos que pertenecen a una situación problema pero no todos son necesarios para derivar la solución. Diversas áreas como el diagnóstico son muy apropiadas para el razonamiento hacia atrás. La toma de decisiones tácticas también parece muy apropiada para un paradigma de razonamiento hacia atrás ya que diversas conductas son con frecuencia expresadas en términos de metas a ser alcanzadas.

Con cualquier estrategia de inferencia, se buscan nuevos hechos derivados como soluciones. Una vez que un nuevo hecho es derivado, permanece con calidad de verdadero y llega a ser miembro de la base de conocimiento. Agregar hechos permanentemente a la base de conocimiento es llamado razonamiento monotónico. Sin embargo, algunos sistemas permiten que nuevos hechos sean creados al hacer suposiciones basadas en los hechos conocidos actualmente. Estos hechos derivados tienen una cantidad de incertidumbre asociada con ellos. Esto es típico en los problemas del mundo real donde las suposiciones son hechas o por defecto son tomadas basados en el contexto o pragmática de la situación actual del problema. Hechos nuevos pueden aparentar que contradigan los hechos afirmados previamente. La habilidad del sistema para retractar hechos afirmados condicionalmente es llamada razonamiento no monotónico. Retractarse de un hecho puede necesitar eliminar otros hechos dependientes. Sistemas de Mantenimiento de la Verdad han sido desarrollados para mantener la integridad de la base de conocimiento cuando el razonamiento no monotónico es usado. Diversas áreas problema, tales como clasificación o diagnóstico, pueden ser implementados con razonamiento monotónico. Para problemas más complejos, y de aquí que los problemas del mundo real tales como el razonamiento de órdenes; el razonamiento no monotónico llega a ser un requerimiento.

La elección del encadenamiento hacia delante o hacia atrás es solo un componente de la estrategia de inferencia. El otro componente es decidir cómo será resuelto el conflicto de la selección de reglas. Los sistemas de encadenamiento hacia atrás generalmente usan la retropropagación del primero en profundidad para seleccionar reglas individuales. Los sistemas de encadenamiento hacia adelante generalmente emplean estrategias sofisticadas de solución de conflictos para seleccionar entre las reglas aplicables. Ejemplos de estrategias de solución de conflictos son: la primera regla que aparea, la regla de más alta prioridad, la regla más específica, la regla que no se ha activado antes, una regla arbitraria, y reglas activadas en paralelo. La estrategia hacia delante más directa y fácil de implementar es la regla que primero aparea. Otras estrategias aumentan la complejidad de la creación de reglas y reduce la comprensión de la regla. La elección no es un aspecto de la investigación para modelos de decisión de órdenes sino es una desventaja del desarrollo.

La desventaja principal de los sistemas basados en reglas es que como la base de conocimiento crece en tamaño la probabilidad de que el sistema se desempeñe como un experto disminuye. Muchas áreas complejas del mundo real, involucran un conocimiento intensivo y requieren de mucho conocimiento detallado. Las decisiones están múltiplemente restringidas por conocimientos de diversas fuentes, tales como objetivos, condiciones, recursos, y requerimientos de tiempo. Estas fuentes son por sí mismas complejas y difíciles de modelar. Modular la base de conocimiento en conjuntos de reglas incrementa la facilidad con la cual la base de reglas puede ser modificada y validada pero restringe la complejidad del problema que es modelado. Los conjuntos de reglas pequeños pueden ser pensados como un experto que puede manejar problemas específicos y detallados, pero no pueden resolver problemas eficientemente ya que no pueden comunicarse.

Los sistemas basados en reglas con frecuencia sirven como el fundamento de esquemas de razonamiento híbridos más complejos. Esto ha llevado al desarrollo de sistemas basados en conocimiento que se caracterizan al modelar explícitamente los diferentes tipos de conocimiento y por el uso de una variedad de métodos de solución de problemas que son adaptados hacia subtareas particulares.

5.3.3: Detalles técnicos.

La teoría de conjuntos difusos proporciona el marco formal para representar (modelos difusos) y razonar (inferencia difusa) con la información incierta o imprecisa. Los sistemas de inferencia difusa proporcionan un medio por el cual se realiza razonamiento aproximado o difuso. La estructura general de un sistema de inferencia difuso, también llamado un sistema basado en reglas difusas, se muestra en la siguiente figura:

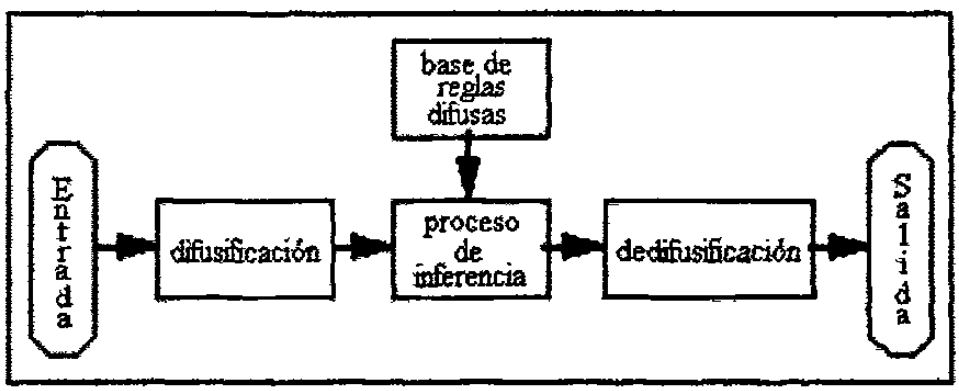


Figura 5.2: Esquema de un sistema de inferencia difusa.

Un componente crítico del sistema es la base de reglas difusas. La base de reglas contiene la información que relaciona las condiciones de entrada con las respuestas de salida. Las reglas difusas tienen la forma "Si la velocidad es *rápida* y la distancia está *cercana* entonces la presión del freno es *alta*," donde *rápida* y *cercana* son conjuntos difusos en los dominios de entrada de velocidad y distancia, respectivamente, y *alta* es un conjunto difuso en el dominio de salida de la presión del freno.

La entrada al difusificador puede ser un valor discreto o un conjunto difuso. Cuando la entrada es de un observador humano o en la forma de una búsqueda en una base de datos, se da como un conjunto difuso. Si la entrada es de un dispositivo sensor se da como un valor preciso, con la posibilidad de la inexactitud debido al ruido. La difusificación, el proceso de transformar la entrada basados en el ruido en la fuente de datos o el grado de precisión requerido para la inferencia; produce una interpretación de la entrada. Por ejemplo, una búsqueda en una base de datos puede pedir los nombres de todas las personas con seis pies de alto. La difusificación de esta búsqueda puede producir un conjunto difuso consistiendo de toas las alturas entre 5'10" y 6'2". La solicitud difusificada puede ser considerada como una interpretación de "seis pies" por el sistema de inferencia.

El dominio de entrada es dividido en un grupo de clasificaciones que usualmente se traslapan. Cada una de estas clasificaciones es un conjunto difuso; juntos representan una descomposición del dominio de entrada. El dominio de salida es descompuesto de una manera similar. Los dominios de las descomposiciones de entrada y de salida definen la topología del sistema difuso. Un elemento en el dominio tiene algún grado de membresía, de 0 a 1 inclusive, en cada conjunto difuso dentro de su dominio. El grado de membresía es determinado por la función de membresía, como se mencionó arriba.

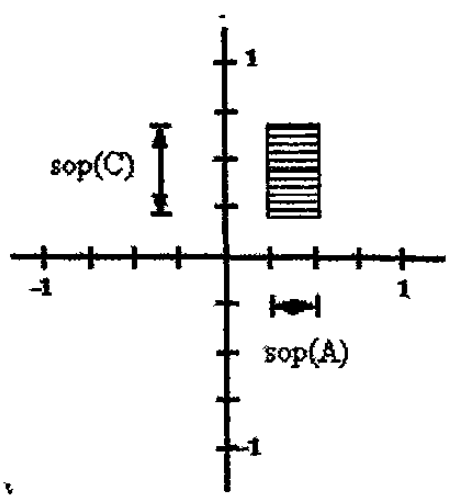
Los conjuntos difusos del dominio de entrada componen los antecedentes de las reglas. Las entradas (difusificadas) al sistema son comparadas con los antecedentes de las reglas difusas en la base de reglas y un grado de apareamiento es obtenido. Este grado de apareamiento es usado en el proceso de inferencia difusa para producir un conjunto difuso sobre el dominio de salida. Para situaciones donde se requiere una respuesta precisa, el conjunto difuso de salida es transformado a un valor sencillo por el módulo de dedifusificación.

Las variables lingüísticas son un concepto importante en la inferencia difusa. Básicamente, una variable lingüística es usada para caracterizar los valores de las variables así como sus relaciones. Por ejemplo, los números pueden ser usados para caracterizar la altura de una persona, pero al usar palabras se pueden proporcionar categorías tales como alto, bastante alto, más o menos alto, no muy alto, más o menos pequeño, y así por el estilo. En los ejemplos precedentes de las reglas difusas, las variables lingüísticas fueron usadas para identificar los conjuntos difusos (categorías). La imprecisión introducida al usar palabras puede o no puede ser por elección. Esto es, la imprecisión puede estar intencionalmente basada en que no se necesita que sean más precisas. Con mayor frecuencia, sin embargo, la imprecisión está dictada por la falta de un medio para especificar cuantitativamente los atributos de un objeto.

Un modelo difuso es simplemente una colección de reglas que definen una relación entre los dominios de entrada y los dominios de salida del sistema a ser modelado. El lenguaje del modelo es comprendido en los términos usados en los antecedente y los consecuentes de las reglas. Estos términos están determinados por las descomposiciones de los dominios de entrada y salida mencionados arriba. Los antecedentes de las reglas consisten de los conjuntos difusos que parten el dominio de entrada. Del mismo modo, los consecuentes de las reglas vienen de los conjuntos difusos que parten el dominio de salida

Numerosos enfoques para la inferencia usando reglas difusas han aparecido en la literatura, la mayoría puede ser catalogado como generalizaciones de la deducción lógica o de la teoría de la aproximación. El primer enfoque, una extensión de la implicación lógica para afirmaciones difusas, se usa para la inferencia en sistemas expertos difusos y bases de datos. Un método consiste en representar las reglas difusas con una relación de implicación entre los conjuntos difusos, y entonces usar una regla compuesta de inferencia para producir el conjunto difuso de salida. Usando la regla compuesta de inferencia no es el único enfoque para la inferencia difusa que cae dentro de la categoría de la deducción lógica generalizada. Otro método básico; entre los muchos que han sido propuestos, es el método de modificación de compatibilidad.

El segundo enfoque ve la inferencia basada en reglas difusas como una aproximación funcional. Un ejemplo es el control del medio ambiente, donde la superficie de control del sistema bajo consideración es aproximada usando reglas de control difuso. Basados en este punto de vista, una regla difusa "Si *X es A* entonces *Z es C*" representa una relación funcional entre la entrada *A* y la salida *C*. Los elementos de *X* que tienen membresía no cero en *A* (llamado el *soporte* de *A*) y los elementos de *Z* que tienen membresía no cero en *C* (soporte de *C*) define un parche de relación difusa el cual representa las reglas y los límites del área cubierta por la regla (vea la figura 5.3). El parche es una relación difusa defina por el producto cartesiano de los dos conjuntos difusos *A* y *C*, y determina la región en la cual la regla proporciona información al proceso de inferencia.



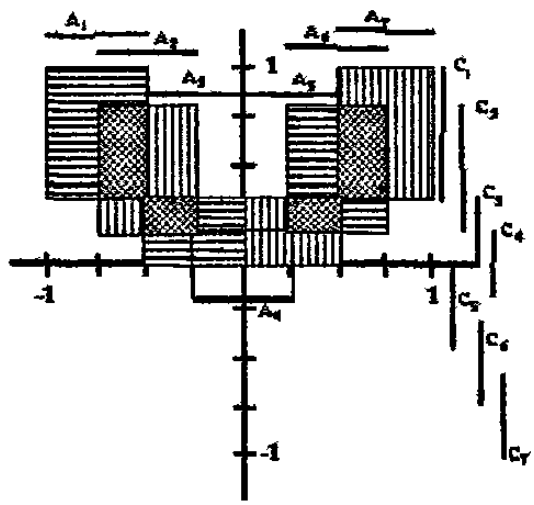


Figura 5.3: Representación gráfica de un parche difuso. Figura 5.4: Representación gráfica de un trazo difuso.

En la figura 5.4 se muestra un ejemplo de una base de reglas difusas trazando "difusamente" la función $f(x)=x^2$, donde el dominio de entrada de [-1,1] es descompuesto en siete conjuntos difusos $A1, \ldots, A7$ y el dominio de salida de [-1,1] es descompuesto en siete conjuntos difusos $C1, \ldots, C7$. Con tal base de reglas, el papel de la inferencia difusa es determinar una salida cuando la entrada es cualquier conjunto difuso *A*.

5.3.4 Ejemplo de un sistema basado en reglas difusas.

Como ya sabemos, un sistema basado en reglas difusas es un sistema de inferencia que usa lógica difusa en lugar de lógica de Boole. Es decir, es una colección de funciones de membresía y reglas que son usadas para razonar acerca de los datos, y están orientados hacia el procesamiento numérico.

Las reglas en un sistema basado en reglas difusas son de la siguiente forma:

Si "x" es bajo y "y" es alto entonces "z" es medio.

Donde "x" y "y" son variables de entrada (nombres para valores de datos conocidos), "z" es una variable de salida (un nombre para un valor de datos a ser calculado), "bajo" es una función de membresía (subconjunto difuso) definido sobre el dominio de "x", "alto" es una función de membresía definida sobre el dominio de "y", y "medio" es una función de membresía definida sobre el dominio de "z". La parte de la regla entre el "Si" y el "entonces" es la premisa de la regla o antecedente. Esta es una expresión de lógica difusa que describe el grado en que la regla es aplicable. La parte de la regla que sigue al "entonces" es la conclusión de la regla o consecuencia. Esta parte de la regla asigna una función de membresía a cada una de las variables de salida involucradas. La mayoría de las reglas para trabajar con sistemas de inferencia difusos permite más de una conclusión por regla, y pueden tener más de una regla. El grupo entero de reglas es conocido como la base de reglas o base de conocimiento.

5.3.4.1 Descripción del mecanismo de inferencia.

En un sistema de inferencia difuso, es requisito primero definir las reglas y las funciones de membresía a usar, una vez establecidas, podemos entonces aplicar este conocimiento a valores específicos de las variables de entrada para calcular los correspondientes valores de las variables de salida. Este proceso es llamado mecanismo de inferencia y en un sistema de inferencia difuso, este proceso es una combinación de cuatro subprocesos:

a) difusificación
b) inferencia
c) composición
d) dedifusificación. (este proceso es opcional).

Para ejemplificar el proceso de inferencia difusa, asumiremos que las variables "x", "y", y "z" son tomadas sobre valores en el intervalo [0, 10], y que tenemos las siguientes funciones de membresía definidas a continuación:

```
bajo(t)  = 1 - t / 10
alto(t) = t / 10
```

Las anteriores ecuaciones se expresan gráficamente a continuación:

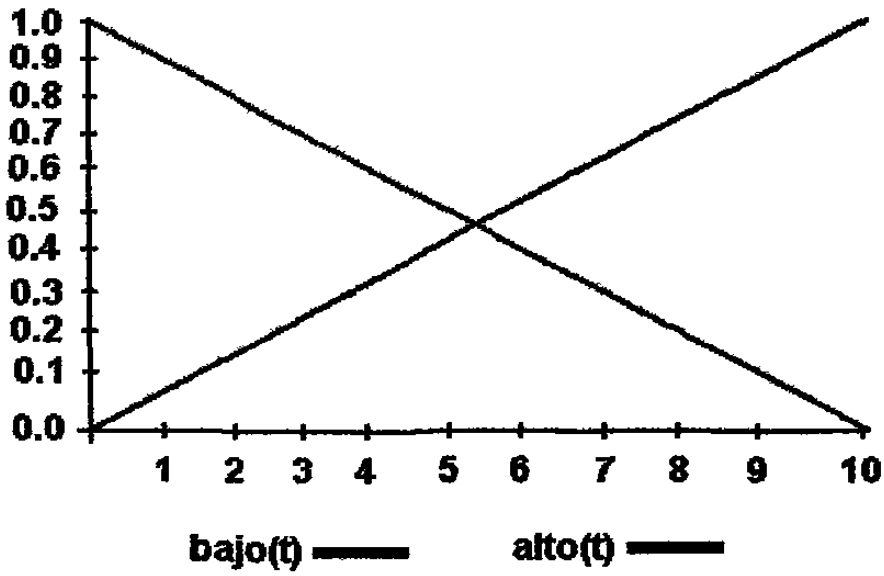


Figura 5.5: Gráfica de los conceptos difusos alto y bajo.

t.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bajo(t)	1	9/10	8/10	7/10	6/10	5/10	4/10	3/10	2/10	1/10	0

t.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
alto(t)	0	1/10	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	7/10	8/10	9/10	1

En la gráfica podemos observar el hecho de que, bajo(t) + alto(t) = 1.0 para todo t. Esto no es obligado, pero es bastante común. Asimismo, se presenta el hecho de que el valor de t en el cual bajo(t) es máximo es el mismo valor de t en el cual alto(t) es mínimo, y viceversa. Esto también no es obligado, pero es bastante común. Por último, las mismas funciones de membresía son usadas para todas las variables. Esto no es obligado, y tampoco es común.

Por otro lado, tenemos la siguiente base de reglas o base de conocimiento, la cual está compuesta por las siguientes reglas:

Regla 1: Si **"x"** es **bajo** y **"y"** es **bajo** entonces **"z"** es **alto.**
Regla 2: Si **"x"** es **bajo** y **"y"** es **alto** entonces **"z"** es **bajo.**
Regla 3: Si **"x"** es **alto** y **"y"** es **bajo** entonces **"z"** es **bajo.**
Regla 4: Si **"x"** es **alto** y **"y"** es **alto** entonces **"z"** es **alto.**

Aquí, la característica principal de la base de reglas, es que en lugar de asignar un solo valor a la variable de salida "z", cada regla asigna un subconjunto difuso entero (**bajo** o **alto**).

5.3.4.2 El subproceso de difusificación.

En el subproceso de difusificación, las funciones de membresía definidas sobre las variables de entrada son aplicadas a sus valores actuales, para determinar su grado de verdad correspondiente. Por ejemplo, si tenemos los siguientes valores de entrada:

Variables de entrada:	X	Y
Valores de entrada:	0.00	3.20
Valores difusificados:	bajo con 1.00 alto con 0.00	bajo con 0.68 alto con 0.32

5.3.4.3 El subproceso de inferencia.

En el subproceso de la inferencia, se usan los valores difusificados para calcular el valor de verdad para de cada una de las reglas, y aplicarlo a la parte de la conclusión de cada una de las reglas. Esto decir, se asigna un subconjunto difuso a cada una de las variables de salida para cada una de las reglas.

Exísten dos métodos principales de inferencia: "min" y "producto". La inferencia "min" consiste en que la función de membresía es cortada en una altura correspondiente al grado de verdad calculado de la premisa de la regla, mientras que en la inferencia "producto", la función de membresía es escalada por el grado de verdad calculado de la premisa de la regla.

Al usar la inferencia min, obtenemos lo siguiente al evaluar la base de reglas:

Regla 1: Si "x" es bajo (1.00) y "y" es bajo (0.68) entonces "z" es alto (0.68).
Regla 2: Si "x" es bajo (1.00) y "y" es alto (0.32) entonces "z" es bajo (0.32).
Regla 3: Si "x" es alto (0.00) y "y" es bajo (0.68) entonces "z" es bajo (0.00).
Regla 4: Si "x" es alto (0.00) y "y" es alto (0.32) entonces "z" es alto (0.00).

Por lo tanto la inferencia "min" asignará los siguientes cuatro subconjuntos difusos a "z":

$$\text{Regla1}(z) = \{ z/10, \quad \text{Si } z <= 6.8 \quad 0.68, \quad \text{Si } z >= 6.8 \}$$

$$\text{Regla2}(z) = \{ 0.32, \quad \text{Si } z <= 6.8 \quad 1 - z/10, \quad \text{Si } z >= 6.8 \}$$

$$\text{Regla3}(z) = 0.0$$

$$\text{Regla4}(z) = 0.0$$

Gráficamente, esto quedaría como se muestra a continuación:

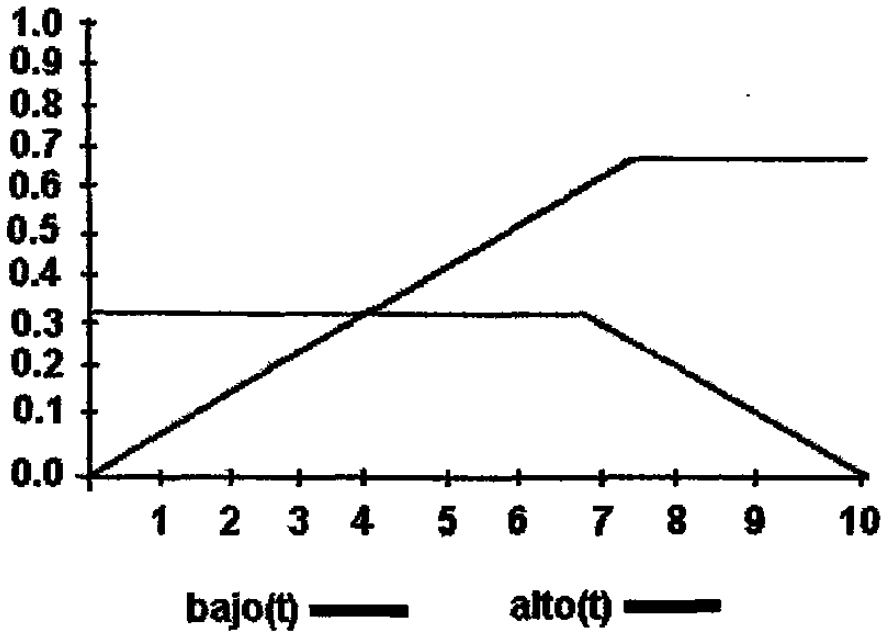


Figura 5.6: Gráfica de la inferencia "min" de los conceptos difusos alto y bajo.

5.3.4.5 El subproceso de composición.

En el subproceso de la composición, todos los subconjuntos difusos asignados a cada una de las variables de salida son combinados para formar un solo subconjunto difuso para cada una de las variables de salida

Existen dos reglas de composición principales que son: la composición "max" y la composición "suma". En la composición "max", el subconjunto difuso de salida combinado es construido al tomar el máximo punto sobre todos los subconjuntos difusos asignados a la variable de salida por la regla de inferencia. En la composición "suma" el subconjunto difuso de salida combinado es construido al tomar la suma de los puntos sobre todos los subconjuntos difusos asignados a la variable de salida por la regla de inferencia. Esto puede resultar en valores de verdad más grande que uno; por esta razón, la composición "suma" es solamente usada cuando será seguido por un método de dedifusificación conocido como el método del "centroide".

Usando ahora la a composición "max" obtendremos el subconjunto difuso:

```
difuso(z) = { 0.32,        Si z <= 3.2
              z / 10,      Si 3.2 <= z <= 6.8
              0.68,        Si z >= 6.8 }
```

Lo que gráficamente, se vería así:

Figura 5.7 Gráfica de la composición "max" de los conceptos difusos alto y bajo.

En la mayoría de los textos, el término "subproceso de inferencia" se usa para significar la combinación de los conceptos de "inferencia" y "composición." En la literatura encontramos términos como "inferencia max-min" e "inferencia suma-producto", lo que significa la combinación de la composición "max" y la inferencia "min", o la composición "suma" y la inferencia "producto" respectivamente. También se puede encontrar los términos contrarios "min-max" y "producto-suma", que significa lo mismo pero en orden contrario. Sin embargo, resulta más claro describir los dos subprocesos separadamente.

5.3.4.6 El subproceso de dedifusificación.

Algunas veces resultan útiles los subconjuntos difusos producidos por el proceso de composición, pero con frecuencia, este valor difuso necesita ser convertido a un solo número, un valor discreto. Esto es lo que hace el subproceso de la dedifusificación. Existen diversos métodos de dedifusificación. Las técnicas más comunes son los métodos "centroide" y el "máximo". En el método "centroide", el valor discreto de la variable de salida se calcula al encontrar el centro de gravedad del subconjunto difuso de salida. En el método "máximo", uno de los valores del subconjunto difuso donde la variable de salida tenga su valor de verdad máximo, es elegido como el valor discreto de salida. Existen diversas variaciones del método "máximo" que difieren solamente en lo que hacen cuando existe más de un valor máximo para la variable de salida. Uno de estos, el método "promedio de máximos", regresa el promedio de los valores máximo. Algunas veces los procesos de composición y dedifusificación son combinados, tomando ventaja de las relaciones matemáticas que simplifican el proceso de calcular los valores finales de las variables de salida.

Para terminar con el ejemplo previo, usando la inferencia "max-min" y la dedifusificación "promedio de máximos" obtendremos un valor discreto de 8.4 para "z".

5.3.4.7 Método alterno.

En el ejemplo anterior usamos el método max-min para obtener la solución. Habíamos mencionado que existe también el método suma - producto, la diferencia con el método anterior lo ilustraremos a continuación:

Siguiendo con el mismo ejemplo, hemos asumido que "x" = 0.0 y "y" = 3.2. Por lo tanto la inferencia "producto" asignará los siguientes cuatro subconjuntos difusos a "z" (recordemos que la inferencia producto escala la función en el punto de corte):

```
Regla1(z) = { 0.068 * z }

Regla2(z) = { 0.32 - 0.032 * z }

Regla3(z) = 0.0

Regla4(z) = 0.0
```

Gráficamente, esto quedaría como se muestra a continuación:

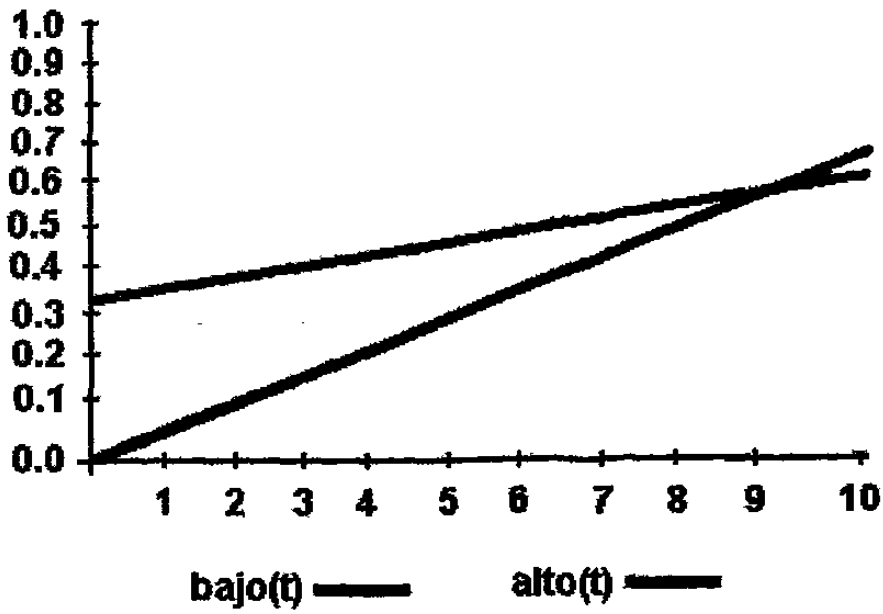


Figura 5.8 Gráfica de la inferencia "producto" de los conceptos difusos alto y bajo.

Usando ahora la a composición "suma" obtendremos el subconjunto difuso:

```
difuso(z) = { 0.32 0.036 * z }
```

Lo que gráficamente, se vería así:

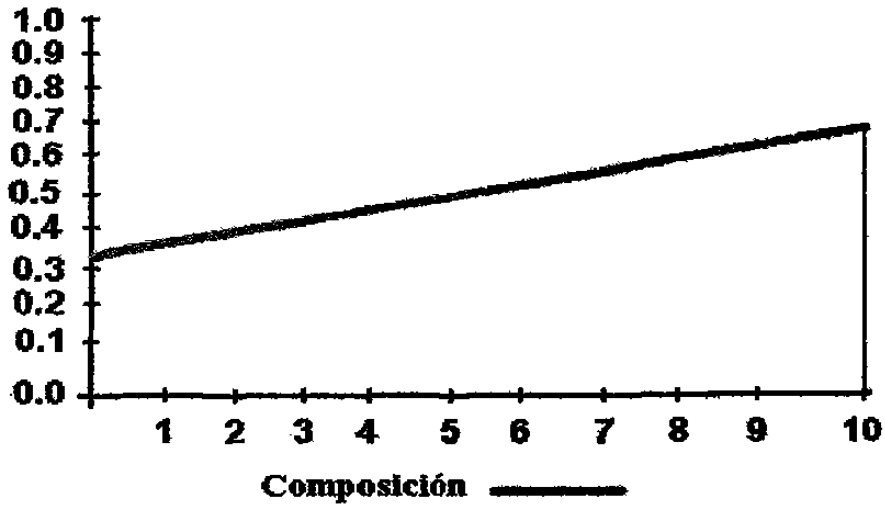


Figura 5.9 Gráfica de la composición "suma" de los conceptos difusos alto y bajo.

Para difusificar el resultado, generalmente este método se acompaña por el método de dedifusificiación del "centroide", es decir, obtenemos el centro de gravedad de las formas resultantes por la inferencia. Esto produce un resultado de 5.6.

5.3.4.8 Aplicaciones potenciales.

La importancia de este método, es que puede ser aplicado a casi cualquier área del conocimiento humano, donde se requiera el manejo y representación de conceptos vagos o imprecisos. Desde la toma de decisiones hasta los sistemas expertos; pasando por las bases de datos, reconocimiento de patrones, análisis de datos, etc.

5.4 El control difuso.

Como ya se mencionó; la lógica difusa ha encontrado un rango muy amplio de áreas de aplicación; sobresaliendo las aplicaciones en tareas de control. Actualmente, las aplicaciones de control difuso son encontradas en numerosos productos de consumo, y muchas herramientas de software para el diseño y desarrollo de los controladores difusos están disponibles en estos días. En esta sección, el uso de la lógica difusa en aplicaciones de control será introducido brevemente. En esta sección no nos enfocaremos a las aplicaciones de control difuso en particular, sino que describiremos y analizaremos el trabajo de un controlador difuso en general y lo ilustramos al final con un sencillo ejemplo.

En los últimos años el control difuso ha llegado a ser una de las áreas más activas de la investigación en la aplicación de la teoría de conjuntos difusos. La idea fue presentada por primera vez por Mamdani en 1974 y desde entonces muchas aplicaciones han sido desarrolladas, la mayoría de ellas en Japón. La lógica difusa nos proporciona el poder de usar palabras en lugar de números, lo cual nos habilita para empotrar nuestra experiencia cualitativa acerca de un sistema de control, en un controlador cuantitativo. La idea principal subyacente en el fondo del control lógico difuso está muy bien explicada por Kickert y Mamdani quienes expresaron:

"La idea básica detrás de este enfoque fue incorporar la experiencia de un operador de procesos humanos en el diseño del controlador. Del conjunto de reglas lingüísticas que describen la estrategia de control del operador, se construye un algoritmo de control donde las palabras son definidas como conjuntos difusos. La ventaja principal de este enfoque es la posibilidad de implementar reglas de la experiencia, la intuición, heurísticas y el hecho de que no es necesario un modelo del proceso".

Es decir, la idea principal del control difuso es simular la conducta de un experto humano quien está en la posición de especificar las propiedades más importantes de un proceso que va a ser controlado. La especificación es hecha en reglas lingüísticas tales como:

Si el carro va rápido y la pared está cerca, entonces se tiene que frenar fuertemente.

Aquí los términos "rápido", "cercano" y "fuerte" son representados como conjuntos difusos, y son descripciones vagas de ciertos valores de las variables de entrada, y de la variable de salida. Estas reglas de control lingüísticas son interpretadas por relaciones difusas, y cada una de ellas especifica una relación entre los valores de entrada vagos y los valores de salida también vagos.

Estudios muy intensivos sobre lógica difusa con el propósito arriba mencionado han dado lugar a numerosos enfoques orientados a la ingeniería donde la meta es refinar un controlador hasta que sea alcanzada una conducta lo suficientemente experta, a pesar de sí existe algún operador humano o no.

Considere un ejemplo muy simple mostrado en la figura 5.8, es el problema de colocar el carro cerca de la señal de "alto". Ya que cada conductor tiene alguna experiencia de cómo llevar a cabo tal tarea, se puede fácilmente colocar algunas reglas lingüísticas como las siguientes:

Base de Reglas:

- Si **señal** está *muy adelante* entonces **continuar con la misma velocidad.**
- Si **señal** está *cerca adelante* entonces **despacio.**
- Si **señal** está *cerca* entonces **detener el carro.**
- Si **señal** está *cerca atrás* entonces **despacio.**
- Si **señal** está *muy atrás* entonces **continuar con la misma velocidad.**

Es innecesario decir que el movimiento se asume que siempre es hacia la señal.

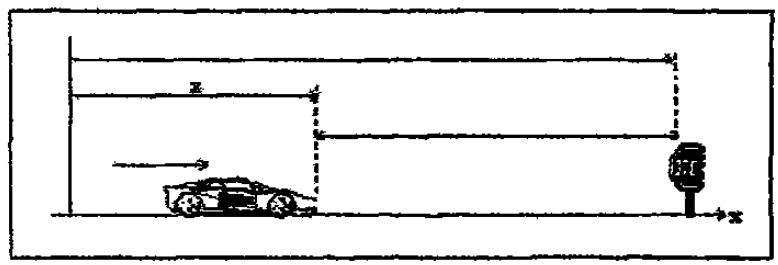


Figura 5.10: Problema de posición lineal.

Estas cinco reglas son suficientes para establecer un sistema de posición lineal y la lógica difusa nos da las herramientas para convertir estas reglas en acciones de control cuantitativas. Sin ser un control lógico difuso, nosotros realizamos controles muy precisos y exactos en nuestra vida diaria. Lo que la lógica difusa hace es, habilitar a la persona para convertir esta experiencia a un conjunto de reglas que puedan ser usadas en sistemas de control. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que convertir reglas a números no es un proceso muy fácil.

Se han propuesto algunos métodos básicos como intuición, inferencia, experiencia, etc. pero son generalmente subjetivos; y por lo tanto, sujetos a error. La inteligencia humana puede colocar algunas reglas para controlar un sistema y con la suficiente experiencia en ese sistema la cantidad del control puede ser apropiada. Sin embargo, al convertir esta información cualitativa a acciones de control cuantitativas, se tiene que ser cuidadoso. Lo que se produce de esta forma puede trabajar, pero si algunos criterios de desempeño específicos tienen que ser alcanzados o si la estabilidad tiene que ser garantizada, entonces se requiere una base de reglas más afinada. Por lo tanto, las técnicas de adaptación y los métodos de aprendizaje son introducidas para los sistemas de control de lógica difusa.

5.4.1 Las bases del control con lógica difusa.

En la mayoría de los casos los métodos clásicos de la ingeniería de control están relacionados con los modelos físicos, donde la tarea de control considerada se describe por un modelo matemático el cual con frecuencia consiste de un sistema de ecuaciones diferenciales a ser resueltas numéricamente. Si se encuentra una solución, entonces las técnicas de aproximación, linealización, validación y análisis de estabilidad son aplicadas para obtener una función de control apropiada la cual cuantifica las relaciones entre los valores de entrada y los valores de salida correspondientes del sistema de control dado.

Cuando los modelos físicos son difíciles de describir debido a los problemas de complejidad, o cuando la información disponible se vuelve vaga o incierta y no directa, entonces los modelos cognitivos parecen ser razonables, siempre que la experiencia haya demostrado que la tarea de control es posible por expertos humanos.

Los modelos cognitivos desarrollan una descripción semiformal de la estrategia de control y la formaliza por un modelo cognitivo en lugar de un modelo físico desconocido. Similar al modelo físico, el procedimiento iterativo de refinamiento, validación y análisis de estabilidad tienen que ser ejecutados para obtener una función de control apropiada. Al usar un enfoque cognitivo como control difuso; no se intenta obtener un modelo del proceso, sino un modelo del experto quien puede especificar las propiedades más importantes del proceso. El enfoque usual en el control difuso es definir un número de reglas difusas concurrentes del tipo si-entonces, como la siguiente:

Si X es un positivo grande y Y es un positivo pequeño, entonces C es un medio positivo.

Lo anterior se da cuando consideramos un controlador con dos variables de entrada y una variable de salida Los términos "positivo grande", "positivo medio" y "positivo pequeño" son representados como conjuntos difusos, y son descripciones vagas de ciertos valores de las variables de entrada X y Y, y de la variable de salida C. Las reglas de control lingüísticas son interpretadas por relaciones difusas y cada una de ellas especifica una relación entre los valores de entrada vagos y los valores de salida vagos. Básicamente, el control difuso es la aplicación de la regla composicional de inferencia, donde dada una relación R, representando al controlador, y una relación A', representando a la entrada del controlador, una salida difusa B' puede ser obtenida por la composición de A' y R:

$$B' = A' \circ R$$

Sin embargo, las entradas y las salidas de un controlador son normalmente valores numéricos, por lo que se necesita una traducción de las entradas numéricas a entradas difusas, y una traducción de la salida difusa a salidas numéricas. Y si el algoritmo de control está representado por reglas difusas, entonces la primera traducción se conoce como difusificación, y la última como dedifusificación. Un sistema de control difuso puede ser dividido en los principales subgrupos que se muestran en la figura 5.11 Aunque, diferentes científicos dan definiciones diferentes para explicar la estructura de un controlador lógico difuso, la que se da a continuación está extraída de muchas definiciones similares.

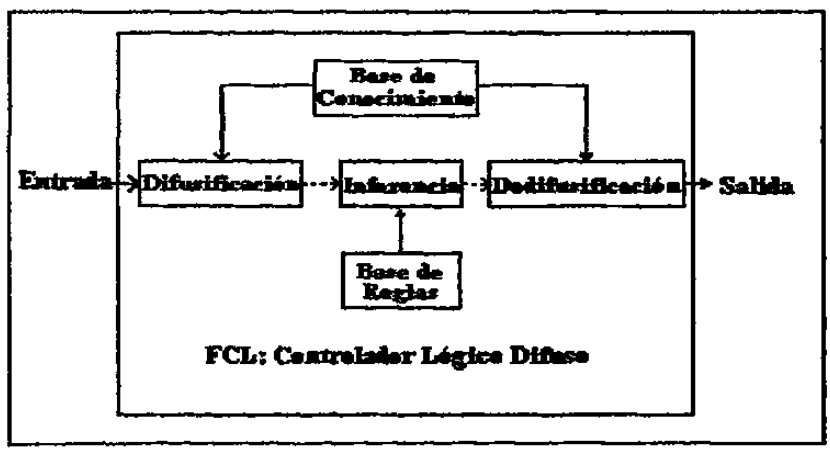


Figura 5.11: Esquema de un controlador lógico difuso.

Las partes principales que componen un sistema de control lógico difuso son:

- Difusificación.
- Base de Conocimiento.
- Inferencia.
- Base de Reglas.
- Dedifusificación.

Para encontrar una salida correspondiente a una entrada al controlador lógico difuso, la entrada deberá pasar a través de las etapas de difusificación, inferencia y dedifusificación. La base de conocimiento y la base de reglas son usadas en paralelo para las etapas de difusificación, dedifusificación e inferencia respectivamente. Cada una de estas etapas son explicadas a continuación:

a) La difusificación.

La interfase de difusificación recibe los valores actuales de las variables de entrada y eventualmente las transforma en un dominio apropiado (v.g. [-1,1]). Adicionalmente puede convertir los valores medidos en términos lingüísticos o conjuntos difusos. El valor directo x_0 usualmente es transformado en el conjunto difuso $\mu(x_0)$:

Si la información está disponible, o los valores de medida en sí mismo son vagos, entonces otros conjuntos difusos pueden ocurrir. Considere la primera regla en la Base de Reglas acerca de detener un carro cerca de la señal de alto:

Si **la señal** está *muy adelante* entonces **continuar con la misma velocidad** (hacia la señal).

El término *muy adelante* es un término difuso. Sin embargo, la distancia a la señal es un número discreto con un valor exacto. Más allá de eso, *muy adelante*, es una medida subjetiva. Por lo tanto, lo primero que debemos hacer es convertir este valor de distancia discreta en un número difuso el cual será usado en el siguiente paso de la inferencia. Este paso es llamado difusificación y la difusificación es realizada al confiar en la información que está disponible en la base de conocimiento.

b) La base de conocimiento.

Esta es la parte que proporciona la información necesaria de cómo los procesos de difusificación y dedifusificación son realizados. En otras palabras las definiciones de las funciones de membresía son almacenadas en la base de conocimiento. Además, la base de conocimiento contiene información acerca de los dominios de las variables, clases de normalización y los conjuntos difusos asociados con los términos lingüísticos. También una base de reglas en forma de reglas de control lingüístico, es almacenada en la base de conocimiento.

c) La base de reglas.

La base de reglas contiene las reglas las cuales forman la base de las decisiones a ser tomadas en un sistema difuso. Las reglas pueden estar basadas en experiencia personal, intuición, redes neuronales, algoritmos genéticos, algunos resultados empíricos o cualquier información que sea útil al definir la conducta deseada.

Una regla está compuesta de dos partes: el antecedente (premisa) y el consecuente (consecuencia).

Si (antecedente) entonces (consecuente).

De nuevo, consideremos la regla arriba mencionada:

- Si **la señal** está *muy adelante* entonces **continuar con la misma velocidad.**
  antecedente (premisa) consecuente (consecuencia)

Tanto las partes antecedente y consecuente tienen argumentos únicos en este simple ejemplo, pero no tiene que ser así. Una regla puede ser escrita con múltiples argumentos en su antecedente y su consecuente.

Ahora, consideremos la regla dada a continuación:

- Si **la señal** está *muy adelante* y **el carro** está *lento* entonces **incrementar la velocidad** (hacia la señal).

Aquí, dos argumentos son presentados en el antecedente y están asociadas por la conjunción "y". Cómo es evaluada cada palabra dentro de una regla será presentado más adelante.

d) La inferencia.

También es conocida como lógica de decisión, y determina la información acerca de las variables de control con la ayuda de los valores de entrada medidos y la base de conocimiento. Esta parte es el núcleo de la decisión donde las reglas en la base de reglas son evaluadas para producir decisiones difusas. Durante este proceso cada regla es evaluada separadamente y entonces se toma una decisión para cada regla individual. El resultado es un conjunto de decisiones difusas. Considerando el ejemplo anterior. La inferencia puede resultar en decisiones como: aumentar la velocidad levemente, mantener la misma velocidad, etc.

e) La dedifusificación.

Su función es crear un valor de control discreto que surge de la información acerca de la variable de control de la lógica de decisión al usar una transformación adecuada. En esta parte, el significado de las decisiones lingüísticas tales como "aumentar la velocidad levemente son

evaluadas y estas decisiones difusas son agregadas a un solo valor discreto (lo cual es necesario en la mayoría de las aplicaciones en tiempo real). Por ejemplo, no se puede pedir un leve incremento en el control del voltaje, pero se puede demandar un incremento de 5 voltios.

Resumiendo lo que ha sido expuesto, un sistema de lógica difusa recibe entradas discretas, estas entradas discretas son entonces difusificadas y, entonces son evaluadas usando la base de reglas. Una decisión resultante dependiendo de las variables de entrada es inferida, después esta decisión difusa es convertida a un valor discreto. Este procedimiento es clarificado en el ejemplo que presentamos a continuación.

5.4.2 Ejemplo de una aplicación de control difuso.

A fin de ilustrar algunos conceptos básicos en la aplicación de la lógica difusa en las tareas de control, vamos a considerar un sencillo ejemplo de un termostato que controla la velocidad de un ventilador como se ilustra en la figura 5.12. La temperatura de un cuarto es detectada a través de un sensor, y esta es la entrada del controlador el cual produce una fuerza de control para ajustar la velocidad del ventilador.

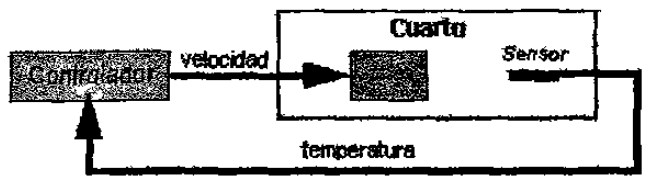


Figura 5.12: Ejemplo de control electrónico difuso.

Un termostato convencional trabaja como un conmutador de encendido y apagado. El ventilador se activa solo cuando la temperatura está por arriba de los 0° C. Cuando alcanza 0° C el ventilador se apaga. Y se ajusta la velocidad del ventilador de acuerdo a la temperatura registrada, como resultado la temperatura del cuarto o es demasiado caliente o es demasiado fría ya que el ventilador se ajusta por medio de saltos de velocidades.

Un termostato difuso trabaja con rangos continuos, donde la temperatura es tratada como una serie de rangos traslapados. Por ejemplo, 23° C es 70% templada y 30% caliente. El controlador está programado con reglas if-then sencillas que le dicen al ventilador de que tan rápido debe girar. Como resultado, cuando la temperatura cambia, la velocidad del ventilador se ajustará de una forma continua y no discreta para mantener la temperatura en el nivel deseado.

Nuestro primer paso al diseñar tal controlador difuso es describir el rango de los valores para las variables de entrada y de salida del controlador. Entonces asignamos etiquetas tales como "fresca" para la temperatura y "baja" para la velocidad del ventilador, y escribimos un conjunto de reglas sencillas para controlar el sistema. Dentro del controlador todas las

acciones para regular la temperatura estará basada sobre la temperatura actual del cuarto y como cae dentro de estos rangos y las reglas que describen el comportamiento del sistema. Por lo tanto, la salida del controlador variará de una forma continua para ajustar la velocidad del ventilador.

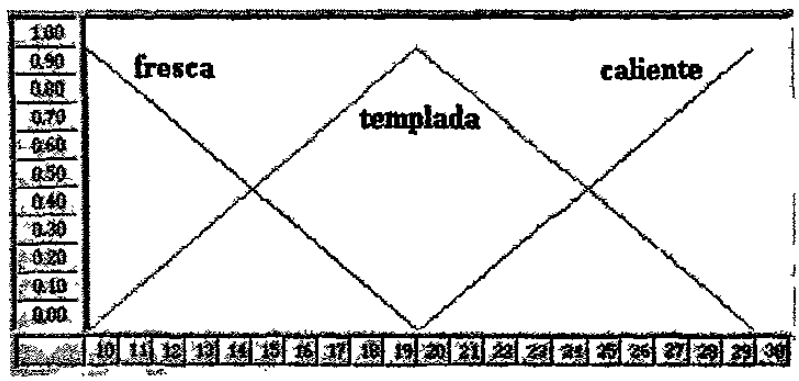


Figura 5.13: Ejemplo de la difusificación de temperaturas.

El controlador de temperatura descrito arriba puede ser definido en tres reglas sencillas:

Si **Temperatura** es Fresca entonces **Velocidad** es Baja.
Si **Temperatura** es Templada entonces **Velocidad** es Media.
Si **Temperatura** es Caliente entonces **Velocidad** es Alta.

Aquí las variables lingüísticas fresca, templada y alta, son etiquetas las cuales se refieren al conjunto de valores traslapados que se muestran en la figura anterior. Estos valores de forma triangulares son llamados funciones de membresía.

Un controlador difuso trabaja de manera similar a un sistema convencional: acepta un valor de entrada, realiza algunos cálculos, y genera un valor de salida. Este proceso es llamado el proceso de inferencia difusa y trabaja en tres pasos que son:

(a) Difusificación: donde una entrada discreta es traducida a un valor difuso.
(b) Evaluación de reglas: donde los valores de verdad de la salida difusa son calculados.
(c) Dedifusificación donde la salida difusa es traducida a un valor discreto.

Durante el paso de la difusificación el valor de temperatura discreta de 23° C es ingresado y traducido en valores de verdad difusos. Para este ejemplo, 23° C es difusificado en "templada" con un valor de verdad de 0.7 (o 70%) y "caliente" con un valor de verdad de 0.3 (o 30%).

Durante el paso de la evaluación de reglas el conjunto entero de reglas es evaluado y algunas reglas pueden activarse. Para 23° C solamente las últimas dos de las tres reglas se activarán. Específicamente, usando la regla dos la "velocidad" será "media" con un grado de verdad de 0.7. Similarmente, usando la regla tres la "velocidad" será "alta" con un grado de verdad de 0.3.

Durante el paso de la dedifusificación las etiquetas "alta" con 30% y "media" con 70% son combinadas usando un método de cálculo llamado el Centro de Gravedad (COG) o el método de máximos a fin de producir el valor de salida discreto de 65 RPS para la velocidad del ventilador.

Este proceso se ilustra gráficamente en la siguiente figura:

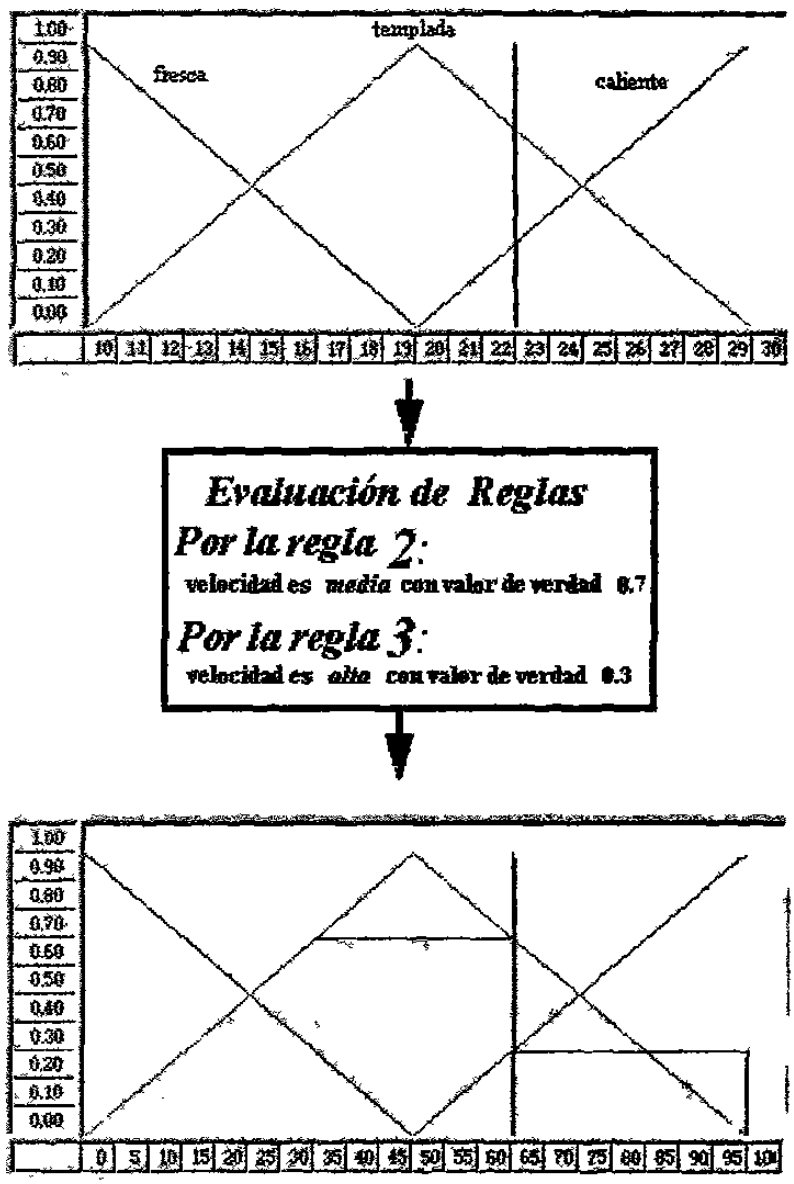


Figura 5.14: Esquema del proceso de inferencia difusa

5.4.3 Control Difuso Adaptable.

Los sistemas difusos convencionales son estáticos. Esto es, el diseño del sistema, incluyendo la generación de reglas y la descomposición del dominio, es hecha fuera de línea y no puede cambiarse una vez que el sistema es puesto en operación. Esto produce la desventaja obvia de adaptar a un sistema difuso a los cambios en su medio ambiente.

Considere a un controlador difuso como parte de un sistema de frenos. Suponga que las reglas difusas han sido desarrolladas fuera de línea basados en el desempeño de partes nuevas y el sistema empieza su operación. Inicialmente, una presión del freno de *algo fuerte* pudo haber sido suficiente para detenerse dentro de una cierta distancia a una velocidad en particular. Pero como los componentes de los frenos se desgastan, la misma cantidad de presión en la misma situación puede ser inadecuada para reunir los parámetros de parada requeridos. Un sistema adaptable no lineal será incapaz de ajustar su desempeño para rectificar este problema. Un sistema adaptable, sin embargo, tiene la capacidad de ajustar uno o más de sus componentes de diseño basados en retroalimentación del desempeño del sistema. Conforme el desempeño se sale de algún rango aceptable, la retroalimentación provoca que ocurra un "refinamiento" en línea. Mientras esta capacidad adaptable puede ser buena en algunos sistemas, puede ser absolutamente vital en otros.

Existen básicamente tres conjuntos de parámetros de sistemas difusos que pueden ser manipulados para permitir la adaptabilidad:

1) Los factores de escala de entrada y de salida.
2) Las funciones de membresía.
3) Las reglas difusas.

Cada una de estos enfoques serán brevemente revisados a continuación.

El primer enfoque para habilitar la adaptación de un sistema difuso es cambiar los factores de escala de la entrada y la salida. Los factores de escala son usados para transformar el rango actual de valores para las variables de entrada y de salida en el rango normalizado, usualmente [0,1] o [-1,1]. Aunque no es abundante en la literatura, este método ha sido investigado para su uso en ajustar el desempeño de un sistema difuso.

Se demuestra que al cambiar los factores de escala para las variables de entrada hace que cambie el universo de discurso para estas variables. Estiman que, a través de este proceso de afinación, cualquier significado lingüístico presentado en la base de reglas es destruido. Mientras que esto puede ser aceptable si la única meta de la afinación es mejorar el desempeño del sistema, la pérdida resultante de significado lingüístico no puede ser aceptable de ninguna manera. Esto es especialmente cierto si las reglas vienen de expertos de la materia (contra patrones de entrenamiento numéricos) o si la incorporación de conocimiento nuevo de los expertos de la materia es deseada en el futuro.

El segundo método mencionado para agregar la adaptación a los sistemas difusos es cambiar dinámicamente las funciones de membresía. Existen numerosos ejemplos de sistemas que usan esta técnica a través de la literatura. Modificar la base de reglas difusas es el último método de agregar la adaptación a los sistemas difusos. Como en las modificaciones de las funciones de membresía, la literatura proporciona muchos ejemplos de sistemas adaptables que modifican la base de reglas durante la operación.

Se estima que modificar la base de reglas es la forma más efectiva de mejorar el desempeño de un controlador difuso. Alternativamente, se argumenta en que afinar las funciones de membresía permitirá la realización de cualquier plano de entrada salida. La literatura parece indicar que ambos métodos son capaces de efectivamente permitir la adaptación en un sistema difuso.

Existen dos consideraciones, sin embargo, que hacen más atractiva la estrategia de modificar la base de reglas en algunos casos. Antes que todo, esta técnica parece más semejante a lo que los humanos pueden hacer cuando se adaptan; al menos parece más intuitiva. Segundo, la modificación de la base de reglas permite cambios en la conducta del sistema para ser directamente reflejados y entendidos por los cambios que ocurren en las reglas interpretables lingüísticamente. Si la capacidad para rastrear, explicar o entender los cambios de desempeño con relación a la base de reglas es deseado, entonces el enfoque de modificar la base de reglas es obviamente el mejor.

Muchos de los procesos del mundo real que requieren del control automático son de naturaleza no lineal. Que alteran los valores de sus parámetros, en determinados puntos de cambio de operación, o en períodos de tiempo, o en ambos. Esta necesidad puede ser superada a través de controladores adaptables, que pueden automáticamente "modificar" las características del proceso corriente.

Un controlador adaptable puede ser esquematizado en la siguiente figura:

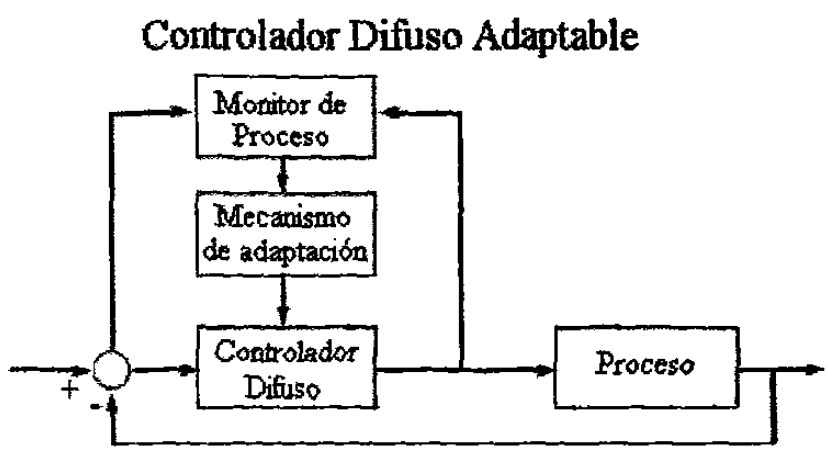


Figura 5.15: Esquema de un controlador difuso adaptable.

Los controladores adaptables presentan dos componentes extras:

- **Un monitor de procesos:** Detecta las modificaciones en las características del proceso. Puede ser de una de las dos formas abajo:

  - Medidor de desempeño: donde es evaluado el desempeño del controlador
  - Estimación de parámetros: donde el modelo del proceso es constantemente actualizado.

- **Un mecanismo de adaptación:** El mecanismo de adaptación puede modificar los parámetros del controlador para mejorar el desempeño del controlador, con base a las salidas del monitor del proceso. Son clasificados de acuerdo con los parámetros que son ajustados:

  - Factores de escala (normalización/denormalización).
  - Definición de los conjuntos difusos.
  - Reglas IF-THEN

5.4.4. Desarrollo de hardware difuso.

Los controladores difusos, que ya hemos presentado, han sido implementados tanto en tecnología análoga y digital. Lo que ha traído como consecuencia el desarrollo de hardware difuso. El número de desarrollos de hardware difuso ha sido grande durante los últimos 15 años. Debido a la naturaleza de esta Tesis, solamente nos limitaremos a señalar gráficamente el desarrollo del hardware difuso, lo cual presentamos en la siguiente figura:

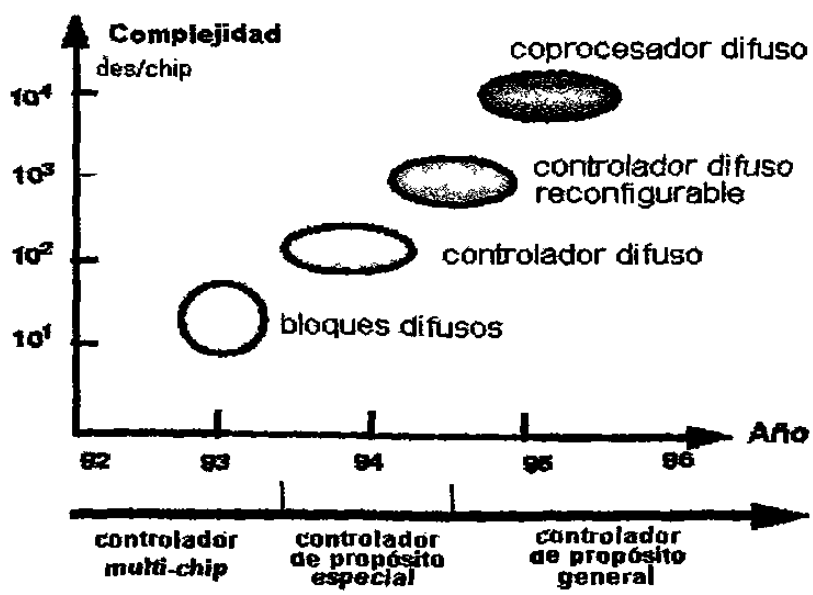


Figura 5.16: Gráfica de la evolución del hardware difuso.

5.5 Ventajas en el uso de la lógica difusa.

Los sistemas basados en reglas difusas aplican los métodos de la lógica difusa para resolver muchos tipos de problemas del "mundo real", especialmente donde un sistema es difícil de modelar, donde existe un control de un experto u operador humano, o donde la ambigüedad o vaguedad es común.

La metodología de diseño con base difusa substancialmente simplifica todo el proceso. Esto resulta en algunos beneficios significantes, tales como tiempo de desarrollo reducido, diseño más simple y tiempo más rápido para su comercialización. Entre las ventajas de usar lógica difusa podemos mencionar:

- **La lógica difusa permite un alto grado de automatización:** es posible la implementación del conocimiento del especialista en un alto grado.

- **La lógica difusa reduce el ciclo de desarrollo del diseño:** con lógica difusa algunos pasos consumidores de tiempo son eliminados. Se puede cambiar el sistema simplemente modificando las reglas, por lo que no se necesita ser un experto en un lenguaje de alto o bajo nivel lo cual ayuda a enfocarse más en la aplicación en lugar de programar.

- **La lógica difusa simplifica la complejidad del diseño:** permite describir sistemas complejos usando el conocimiento y la experiencia en simples reglas. No requiere ningún modelo del sistema o ecuaciones matemáticas complejas gobernando las relaciones entre las entradas y las salidas. Solamente unas cuantas reglas pueden describir sistemas que pueden requerir varias líneas de software convencional.

- **La lógica difusa mejora los tiempos para comercialización:** una metodología de diseño con base difusa debido a su simplicidad la descripción de un controlador difuso no solo es transportable a través e equipos de diseño, sino también proporciona un medio superior para preservar, mantener y actualizar la propiedad intelectual.

- **Una mejor solución alternativa para el control no lineal:** la mayoría de los sistemas físicos de la vida real son actualmente sistemas no lineales. La lógica difusa proporciona una solución alternativa para el control no lineal debido a que está más cerca de la realidad. La no linealidad es manejada por reglas, funciones de membresía, y el proceso de inferencia lo cual resulta en un desempeño mejorado, una implementación más simple, y reduce los costos de diseño.

- **La lógica difusa mejora el desempeño del control:** En muchas aplicaciones la lógica difusa puede resultar en un mejor desempeño de control que las técnicas lineales o de tablas.

Sin embargo, también existen límites para el control difuso, las cuales, pueden ser sacadas a la luz al cuestionar algunas de sus ventajas, tales como:

- ¿El control difuso realmente lleva un alto grado de automatización para procesos complejos?
- ¿Los controladores difusos son más robustos que los controladores convencionales?
- ¿El control difuso reduce el tiempo de desarrollo?
- ¿Los productos usando control difuso venden más?

No existe aún una manera de determinar si un problema puede ser resuelto con el control difuso, simplemente analizando sus características, pero si se puede decir de dónde y cuándo utilizar o no el control difuso.

- Existe una solución difusa para un problema similar, puede ser una buena razón.
- Si el controlador convencional, aún presenta un resultado satisfactorio, continuar así.
- Si no existen razones contrarias, el conocimiento disponible y existen dificultades en representar el problema con el control convencional, intentar el control difuso.

5.6: Objeciones al uso de la lógica difusa.

Sería extraordinario si una teoría de largo alcance como los sistemas difusos no incitaran algunas objeciones en la comunidad profesional. Mientras que ha habido numerosas quejas acerca de la forma de asignar valores a términos lingüísticos, tal vez las críticas más convincentes vienen de los lógicos formales. La primera área de discusión es acerca de la naturaleza de verdad y falsedad: si se pudiera mostrar, que estos son valores difusos y no discretos, entonces la necesidad de la lógica difusa habría sido demostrada. La otra área es acerca de la utilidad de los sistemas difusos: si se pudiera demostrar que generalizar la lógica clásica para abarcar la lógica difusa ayudaría en los cálculos de una clase dada, entonces de nuevo existiría una necesidad de la lógica difusa.

Con respecto a la primera declaración, se argumenta que la verdad y la falsedad son términos discretos. Por ejemplo, "El cielo es azul" es o verdadero o falso; cualquier aspecto difuso de la declaración proviene de una definición imprecisa de términos, no de la naturaleza de la verdad. Con respecto a la segunda declaración, la utilidad de los sistemas difusos es inquietante, se sostiene que ninguna área de manipulación de datos se hace más fácil con la introducción del cálculo difuso; al contrario, se afirma, los cálculos llegan a ser más complejos. Por lo tanto, se afirma, la lógica difusa no es necesaria.

Algunos defensores de la lógica difusa, han respondido a estas objeciones, indicando que existen tres áreas en las cuales la lógica difusa puede ser de beneficio: como aparato de "requisito" (para describir las relaciones del mundo real las cuales son inherentemente difusas); como aparato "prescriptivo" (debido a que algunos datos son difusos, y por lo tanto requieren un cálculo difuso); y como aparato "descriptivo" (debido a que algunos sistemas de inferencia son inherentemente difusos). Sin embargo, el argumento más poderoso proviene de la noción de que la lógica clásica y la difusa no necesitan ser vistas como contrarias, sino

como complementarias. Muchas de las objeciones de los lógicos formales provienen de una falta de claridad semántica, y por lo tanto las declaraciones difusas pueden ser traducidas a frases con lógica clásica.

Por último, se argumenta que a pesar de las objeciones de los lógicos clásicos, la lógica difusa ha encontrado su camino dentro del mundo de aplicaciones prácticas, y ha proporcionado muchos éxitos allí. Pragmáticamente esto es suficiente razón para continuar desarrollando el campo.

5.7: Resumen.

La lógica difusa permite que sistemas complejos matemáticamente, pobremente entendibles y altamente no lineales; puedan ser modelados en forma confiable y eficientemente. Además, la lógica difusa trata con la incertidumbre y datos ruidosos. Estas características sugieren que la lógica difusa pueda ser una herramienta efectiva para una amplia variedad de tareas, algunas de las cuales hemos presentado en este capítulo. Sin embargo, existen muchas otras aplicaciones de la lógica difusa, pero la mayoría de ellas son aplicaciones de control, que es en donde la lógica difusa ha obtenido sus más grandes éxitos, sobre todo, en aplicaciones de control electrónico. Dadas las aplicaciones realizadas, se ha observado que:

El empleo del control difuso es recomendable:

- Para procesos complejos (de muchas variables dependientes), donde no es sencillo aplicar un modelo matemático.
- Para sistemas con no linealidades continuas (sirve también para abruptas pero no es mas recomendado por existir buenos modelos para ello)
- Si el procesamiento del conocimiento experto (formulación lingüística) se puede desarrollar.

El empleo de control difuso no es una buena idea si:

- Las teorías de control convencional entregan resultados satisfactorios.
- Una solución sencilla ya existe y un adecuado modelo matemático también existe.
- El problema no tiene solución.

Desde controlar la tasa de producción de energía en las plantas de poder hasta balancear la carga en la máquina lavadora, los sistemas basados en lógica difusa están en el borde principal de la acometida continua para desarrollar controladores inteligentes. A diferencia de los sistemas basados en lógica tradicional, los sistemas difusos permiten a las computadoras "pensar como humanos", bosquejar conclusiones basadas en información incierta e incluso resolver declaraciones aparentemente contradictorias. Pero el programar un sistema difuso puede ser una labor intensa, requiere entrevistas extensas con los expertos en un intento por "capturar" su conocimiento.