

Aplicaciones con Lógica Difusa (Fase I)

Fundamentos y Herramienta de Desarrollo

Francisco Esteban Ojeda Salazar

Laboratorio de Investigación
Facultad de Ingeniería Electrónica
Escuela Politécnica del Ejército
fojeda@li.fie-espe.edu.ec

RESUMEN

Desde hace mucho tiempo, los diseñadores han intentado incorporar en sus sistemas la capacidad de tener sentido común en la toma de decisiones, tal y como lo hace el hombre en las suyas. La Lógica Difusa ha permitido incorporar este sentido común a los sistemas de una forma fácil y comprensible, solucionando así problemas para los cuales antes no existía respuesta, en cuanto a precisión numérica y significado de las variables a tratar. La Lógica Difusa a pesar de ser una extensión generalizada de la lógica que tradicionalmente se ha conocido como Lógica Booleana, se diferencia de esta última en la capacidad de abarcar el concepto de verdad parcial entre los conceptos de verdad completa y falsedad completa, de esta forma trata de una manera natural con la ambigüedad presente en todos los procesos del mundo real. En el trabajo realizado se analiza, estudia y aplica la Lógica Difusa partiendo desde temas generales y de contenido básico, como son aquellos que se tratan en las secciones 1 y 2; para luego, en las secciones 3 y 4, entrar a temas de mayor complejidad, en los cuales está envuelta la esencia misma del pensamiento difuso. Finalmente en las secciones 5 y 6 se da un giro práctico al estudio, al mencionar algunos campos de aplicación y presentar un ejemplo de un sistema de lógica difusa, generado con el software Unfuzzy 1.1.

ABSTRACT

For many years, designers have tried to create systems that use common sense to make decisions, such as human beings make them. Fuzzy Logic has allowed adding this common sense to systems in an easy and understandable way. In addition, it has solved problems that had no prior solution because of their lack of numeric accuracy and meaning of their variables. Although Fuzzy Logic is a generalized extension of Boolean Logic, it differs from Boolean Logic in its capacity of managing partial truth between the concepts of total truth and falsehood. In this manner, it is able to deal with the ambiguity present in every real world process. In this document, Fuzzy Logic is analysed, studied and applied, starting from

general topics and basic theory such as those discussed in sections 1 and 2, and following in sections 3 and 4, with more complex topics related with the real fuzzy way of thinking. Finally, in sections 5 and 6, the paper takes a practical focus inasmuch as applications fields are mentioned and an example of the fuzzy logic system is generated by using Unfuzzy 1.1.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La Ambigüedad del Mundo Real.-

En el mundo real abundan los conceptos vagos e imprecisos, para ejemplificar esto tomemos una afirmación cualquiera, como: "María es alta"; esta afirmación es difícil de traducir a un lenguaje más preciso sin perder algo de su valor semántico: así, la afirmación "la altura de María es 1,52 m." no especifica si ella es o no alta, y la afirmación "la altura de María está 1.2 desviaciones estándar sobre la altura media para una mujer de su cultura y edad" está cargada de dificultades para su entendimiento, pues caben las preguntas: ¿puede una mujer cuya altura está 1.1999999 desviaciones estándar sobre la media, ser considerada alta?, ¿a qué cultura pertenece María y como se define su pertenencia en la misma?.

Mientras una afirmación pueda prestarse a debates, se puede decir que la ambigüedad que esta implica, es un obstáculo para clarificar su entendimiento. Y es esto lo que justamente ocurre cuando se trata de traducir el lenguaje humano al lenguaje de la lógica clásica. Tales pérdidas no son notadas en muchas ocasiones, como por ejemplo, en un programa de rol de pagos o en un control ON/OFF, sin embargo, cuando existe la necesidad de permitir consultas en lenguaje natural, o cuando se requiere una representación del conocimiento en sistemas expertos, para tomar un caso más sofisticado, los significados perdidos son frecuentemente aquellos que se busca y justamente los más necesarios, ya que en los pequeños detalles y en los casos particulares es donde se evidencia la real trascendencia de un sistema experto.

Cuando se está diseñando un sistema experto, el cual imita las capacidades de diagnóstico de un médico, una de las mayores tareas es codificar el proceso de toma de decisiones del médico, es decir todo el razonamiento que lo lleva a concluir que una enfermedad es tal, o que tipo de medicamentos recetar a su paciente, o que indicaciones debe recomendar al enfermo, etc. El diseñador aprende pronto de la visión que el médico tiene del mundo, pues a pesar de su dependencia sobre pruebas científicas, precisas y mediciones, se incorporan evaluaciones de síntomas, y las relaciones entre ellas, de una manera difusamente intuitiva. Sólo de esta forma puede decidir cuanto de un medicamento particular deberá administrar o que procedimiento seguir, pero este hecho así como tiene que ver con el sentido del médico, tiene que ver con la fuerza relativa de los síntomas del paciente, así como de su peso, altura, edad y otros factores, los cuales nos indican claramente que las decisiones que debe tomar un doctor además de depender de sus estudios, conocimientos y las pruebas científicas que se puedan realizar, también dependen de las condiciones particulares que se presenten en ese momento y específicamente con ese paciente, así como de las múltiples variaciones que un determinado germen pueda tener o de cuan mutable sea dicho germen; esto es, deinidad de circunstancias y hechos que hacen a cada situación una muy particular.

Así como se ha encontrado tanta ambigüedad en el diagnóstico que pueda realizar un médico, de la misma forma se la encontrará en la gran mayoría de las actividades cotidianas de una persona y no se diga en un sistema de control de algún proceso o en un sistema de toma de decisiones administrativas. Es justamente por esto que podemos afirmar que *en el mundo real estamos rodeados de ambigüedad e imprecisión.*

1.2. Justificación del Aparecimiento de la Lógica Difusa.-

Un problema con el cálculo digital convencional es su rigidez, sus decisiones son tomadas basándose en el criterio o todo o nada, no puede ser persuadido con facilidad para tomar aproximaciones cuando se encuentra un criterio vago para realizar la toma de decisión, como podría ocurrir en el momento de tratar una variable como la juventud de una persona, la probabilidad de un suceso o la variable "bastante de algo".

Desde un punto de vista simple se puede decir que la lógica difusa es un intento por incorporar a nuestra tecnología de cálculo, un toque de sentido común propio del hombre.

La Lógica Difusa llena una importante brecha en los métodos de diseño de ingeniería, dejada vacante por las aproximaciones puramente matemáticas, como

los diseños de control lineal, y por las aproximaciones puramente lógicas, como los sistemas expertos. Mientras otras aplicaciones requieren de ecuaciones precisas para modelar el comportamiento del mundo real, el diseño difuso puede captar la ambigüedad del lenguaje humano en el mundo real y la lógica. De esta forma nos provee de un método intuitivo para describir sistemas en términos humanos y automatizar la conversión de las especificaciones de dichos sistemas en modelos efectivos.

Durante años, los diseñadores de sistemas expertos han tratado de traducir las descripciones hechas en lenguaje natural, a un programa de reglas que describa completamente el comportamiento de un sistema. La lógica difusa empieza fundamentándose en un conjunto de reglas, provistas, en lenguaje humano, por el usuario. Los sistemas difusos convierten estas reglas en sus equivalencias matemáticas, simplificando enormemente el trabajo del diseñador del sistema.

La Lógica Difusa debe ser vista como una teoría matemática formal, para la representación de la incertidumbre, la cual es el precio que se debe pagar por manejar sistemas reales. La lógica difusa es un formalismo matemático. Es crucial entender, que la lógica difusa es una *lógica de lo borroso*, y no una lógica que por sí misma, es borrosa. Podríamos justificar la afirmación anterior, considerando a las leyes de lo difuso como un caso similar a lo que ha ocurrido con las leyes de probabilidad, las cuales no son aleatorias, sino que sirven para formular hechos aleatorios; del mismo modo las leyes de la lógica difusa, no son vagas ni borrosas, sino que sirven para representar situaciones de dicha naturaleza. [8]

2. CONCEPTOS BÁSICOS

La lógica difusa es un superconjunto de lógica convencional (lógica Booleana), el cual ha sido extendido para abarcar el concepto de verdad parcial, dicho concepto comprende los valores de verdad entre la verdad completa y la falsedad completa. En un sentido más amplio, la lógica difusa se asemeja a la toma de decisiones de un humano, en el aspecto que los dos tienen la habilidad de trabajar con datos aproximados (ambiguos) y encontrar soluciones precisas.

2.1. Conjuntos Difusos.-

De la misma forma como hay una fuerte relación entre la lógica Booleana, y la teoría tradicional de conjuntos, existe una relación entre la lógica difusa y la teoría de conjuntos difusos.

Un buen método para entender que son los conjuntos difusos, será el revisar algo de la teoría de conjuntos clásica. Un conjunto clásico o concreto se

define como una colección de elementos que existen dentro de un **universo de discusión**. Así, por ejemplo, si el universo de discusión consta de los números enteros no negativos menores que 10:

$$U = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

Entonces, podemos definir algunos subconjuntos, por ejemplo:

$$A = \{0, 2, 4, 6, 8\}, B = \{1, 3, 5, 7, 9\}, \text{ etc.}$$

Con estas definiciones, hemos establecido que cada uno de los elementos del universo pertenecen o no a un determinado subconjunto. Por lo tanto, cada conjunto puede definirse completamente por una **función de pertenencia**, que opera sobre los elementos del universo, y que le asigna un valor de 1 si el elemento pertenece al conjunto, o de 0 si no pertenece. La función de pertenencia se representa con la nomenclatura $u(x)$.

Consideremos ahora un conjunto X, de todos los números reales entre 0 y 10, el cual será el universo de discusión. Posteriormente se define un subconjunto A en el conjunto X, el cual estará conformado por todos los números reales en el rango entre 5 y 8.

$$A = [5, 8]$$

Si se mapea a cada elemento del conjunto X con un valor 0, o 1 dependiendo de, si el elemento a ser mapeado pertenece o no al subconjunto A, de forma similar a la que anteriormente se describió, tendremos como resultado un mapeamiento representado por un conjunto de pares ordenados, con exactamente un par ordenado para cada elemento del conjunto X; donde el primer elemento del par ordenado es un elemento del conjunto X y el segundo es un elemento del conjunto $\{0, 1\}$. De esta forma se obtiene la función de pertenencia del conjunto A, $u_A(x)$, al mapear el conjunto, tal y como se muestra en la Figura 1:

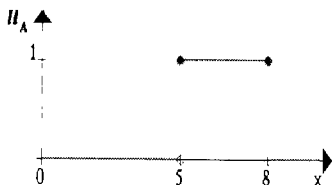


Figura 1: Función de Pertenencia del Conjunto A.

Como se observa, en el hecho de definir si un elemento pertenece o no al subconjunto A existe un criterio totalmente basado en la lógica tradicional, es decir un elemento pertenece o no pertenece al subconjunto en cuestión, no podemos hallar ningún tipo de ambigüedad en la decisión de incluir o no a un elemento en A. Este concepto es suficiente para

muchas áreas de aplicación. Pero se pueden encontrar fácilmente situaciones donde esto restringe al concepto de flexibilidad. Con el objeto, de demostrar la afirmación anterior, tomemos el conjunto gente joven, y nombrémoslo como el conjunto B.

$$B = \{\text{conjunto de gente joven}\}$$

Sabemos que la edad de una persona empieza a los 0 años, este es el valor mínimo del rango, y en este caso este valor mínimo es claro y preciso. Pero el valor máximo del rango, por otro lado, es difícil de definir. Como un primer intento podemos definir el rango, diciendo que el límite superior es 20 años; en tal caso nosotros podemos nombrar a B, como un conjunto en el cual se incluyen todas las personas jóvenes, definido por el intervalo de 0 a 20 años, tal como se muestra a continuación:

$$\text{Conjunto de gente joven} = B = [0, 20]$$

Inmediatamente surge la pregunta: ¿por qué es alguien hasta el día de su veintavo cumpleaños joven y al siguiente día ya no lo es más? Obviamente, este es un problema estructural, pues si se mueve arbitrariamente, el límite superior del rango a otro valor diferente de 20, se tendrá la misma pregunta para plantear. Un camino más natural para construir el conjunto B, podría ser suavizar la separación estricta entre joven y no joven. Esto se puede hacer usando, no solamente una decisión precisa como: “¡SI! el o ella está en el conjunto de gente joven” o “¡NO! el o ella no está en el conjunto de gente joven”, sino adicionando frases más flexibles como: “Bien, el o ella pertenece en parte al conjunto de gente joven”.

Si consideramos que nuestro objetivo es utilizar nuestros conocimientos en lógica difusa, para hacer a las computadoras más inteligentes, es decir, hacer más efectivo a un controlador, entonces debemos codificar la idea anterior de una manera más formal. En el ejemplo anterior codificamos todos los elementos del conjunto A con un valor 1 o 0. Una forma directa de generalizar este concepto es permitiendo una mayor cantidad de valores entre 0 y 1. En efecto, siempre se permitirá un infinito número de alternativas entre 0 y 1, a esto se nombrará como **intervalo unitario**.

$$\text{Intervalo Unitario} = I = [0, 1]$$

La interpretación de los números ahora asignados a todos los elementos del universo de discusión, es algo más elaborada. Por supuesto que otra vez, el número 1 asignado a un elemento, significa que el elemento está en el conjunto B y 0 significa que el elemento definitivamente no está en el conjunto B. Todos los otros valores significan una pertenencia parcial al conjunto B. Para visualizar lo expuesto, en la

Figura 2 se muestra el conjunto de gente joven gráficamente por medio de su función de pertenencia.

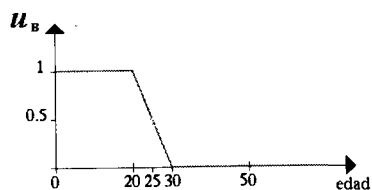


Figura 2: Función de Pertenencia del Conjunto B.

De esta forma alguien con 25 años de edad, podría todavía ser joven en un grado del 50%. Con este ejemplo se puede concluir, que el pertenecer parcialmente a un conjunto, en muchos casos puede tener más sentido que pertenecer totalmente a un conjunto [8].

2.2. Operaciones con Conjuntos Difusos.-

Las operaciones básicas de conjuntos difusos son similares a las de los conjuntos tradicionales. Las tres operaciones básicas entre conjuntos tradicionales: unión, intersección y complemento, se definen también para los conjuntos difusos, intentando mantener el significado de tales operaciones. La definición de estas operaciones se hace empleando el concepto de función de pertenencia de los conjuntos.

Intersección $A \cap B$: el resultado de efectuar la operación de intersección entre dos conjuntos difusos A y B, definidos sobre el mismo universo y con funciones de pertenencia $u_A(x)$ y $u_B(x)$ respectivamente, es un nuevo conjunto difuso $A \cap B$ definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $u_{A \cap B}(x)$, dada por:

$$u_{A \cap B}(x) = u_A(x) (*) u_B(x)$$

En donde el operador (*) debe satisfacer las siguientes propiedades:

- $x(*)y = y(*)x$
- $(x(*)y)(*)z = x(*)y(*)z$
- si $x < y$ y $z < w$ entonces $x(*)z < y(*)w$
- $x(*)1 = x$

Todo operador que satisfaga las propiedades de la intersección, se conoce como una **T-Norma**, y representa la intersección de dos conjuntos difusos. Dos de los operadores más sencillos son el mínimo y el producto clásico (en adelante se denotarán por *min* y * respectivamente).

Unión $A \cup B$: el resultado de efectuar la operación de unión entre dos conjuntos difusos A y B, definidos

sobre el mismo universo, y con funciones de pertenencia $u_A(x)$ y $u_B(x)$ respectivamente, es un nuevo conjunto difuso $A \cup B$ definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $u_{A \cup B}(x)$, dada por:

$$u_{A \cup B}(x) = u_A(x) (+) u_B(x)$$

En donde el operador (+) debe satisfacer las siguientes propiedades:

- $x(+)y = y(+)x$
- $(x(+)y)(+)z = x(+)y(+)z$
- si $x < y$ y $z < w$ entonces $x(+)z < y(+)w$
- $x(+)0 = x$

Todo operador que satisfaga las propiedades de la unión se conoce como una **S-Norma** y representa la unión de dos conjuntos difusos. Uno de los operadores más sencillos es el máximo (en adelante se denotará por *max*).

Complemento A' : el resultado de efectuar la operación de complemento sobre un conjunto difuso A, definido sobre un universo, y con función de pertenencia $u_A(x)$, es un nuevo conjunto difuso A' definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $u_{A'}(x)$, dada por:

$$u_{A'}(x) = 1 - u_A(x)$$

[1], [3] y [6]

2.3. Determinación de los Valores de Pertenencia.-

Es necesario determinar el grado de pertenencia de un elemento en un conjunto difuso, y para hacer esto se debe mapear dicho elemento, asignándole al mismo, un valor del intervalo unitario ($I=[0, 1]$). Pero ¿cómo son determinados los valores de pertenencia de un elemento en un determinado conjunto difuso? Para hacer esto existen cinco métodos de determinación de pertenencia: Evaluación y Provocación Subjetiva, Formas Escogidas, Probabilidades o Frecuencias Convertidas, Aprendizaje y Adaptación, y Mediciones Físicas.

Formas Escogidas fue el método seleccionado para este trabajo, pues a pesar que existe un arreglo infinito de formas posibles para las funciones de pertenencia, la mayoría de operaciones del actual control difuso parten o prefieren un conjunto muy pequeño de curvas diferentes para tenerlas en su conjunto de curvas de funciones de pertenencia, así las curvas simples de números difusos en este método son la campana de Gauss, la rampa, el impulso triangular y el pulso rectangular, entre los principales. Esto simplifica el problema, y agiliza enormemente el

proceso, ya que son muchas menos las consideraciones que se deben tener en el momento de determinar la pertenencia de un elemento al conjunto.

2.4 Relación entre Valores de Verdad Difusos y Probabilidades.-

En un nivel matemático, los valores difusos son comúnmente mal entendidos como valores probabilísticos, pues ambos operan sobre el mismo rango y a primera vista los dos tienen formas similares para representar falsedad o no pertenencia (0.0) y para representar verdad o pertenencia (1.0). Sin embargo hay una distinción principal que debe ser hecha entre estos conceptos. La aproximación probabilística descansa en afirmaciones hechas en lenguaje natural, con las cuales nos indica la oportunidad de que un elemento sea parte de un conjunto determinado, es decir el evento ocurre o no, así una afirmación probabilística sería:

“Hay un 80% de posibilidad que María sea vieja”

Mientras que la terminología difusa corresponde al grado de pertenencia de un elemento en un conjunto, es decir modela la medida en la cual ocurre un evento, una afirmación difusa es:

“El grado de pertenencia de María al conjunto de gente vieja es 0.80”

La diferencia semántica entre las dos afirmaciones anteriores es significativa, en la primera se supone que María es o no es vieja, notemos que esta afirmación está atrapada en la ley del medio excluido, además tenemos solo un 80% de oportunidad de saber en cual conjunto está María. En contraste la terminología difusa supone que María es más o menos vieja o algún otro término correspondiente al valor de 0.80.

El menor requerimiento que tienen las probabilidades es la aditividad, esto es, que el resultado de la suma de todas las probabilidades debe ser 1, o que la integral de la función de densidad debe ser 1. Pero esto no ocurre en forma general con los grados de pertenencia. Y mientras los grados de pertenencia pueden ser determinados con densidades probabilísticas también existen otros métodos, los cuales no tienen nada que ver con frecuencias y probabilidades.

Debido a esto, el camino que ha tomado el desarrollo difuso se ha separado de la probabilidad, pero no en su totalidad, esta afirmación se basa en el hecho de que toda distribución de probabilidad es un conjunto difuso, así como los conjuntos y la lógica difusa generalizan tanto la probabilidad como los conjuntos y la lógica Booleana.

En efecto, desde una perspectiva matemática, los conjuntos difusos y la probabilidad existen como parte de una teoría de información generalizada, la cual incluye algunos formalismos para representar la incerteza (incluyendo conjuntos randómicos, intervalos probabilísticos, teoría de posibilidades, medidas generales difusas, intervalos de análisis, etc.). Además se puede también hablar de eventos randómicos difusos y eventos difusos randómicos [8].

3. SISTEMAS EXPERTOS DIFUSOS

El campo dentro del cual se puede ubicar a los Sistemas Expertos Difusos es la Inteligencia Artificial y más específicamente su subcampo, los Sistemas Expertos. La *Inteligencia Artificial (IA)* es el estudio de cómo hacer que los computadores hagan cosas, que en estos momentos hacen mejor los hombres. Una definición muy clara de lo que es la inteligencia es la siguiente: es la superación de situaciones mediante un comportamiento orientado a la solución del problema mediante la experiencia y el conocimiento de causa.

El objetivo inicial de los investigadores de los principios básicos de la IA fue encontrar el *Método General de Resolución*. Este método debía eliminar la costosa y lenta programación de cada paso de procesamiento con algo de ingenio. Otro punto motivante fue el evitar la fase de programación mediante la creación de una interacción en lenguaje natural entre el hombre y el computador.

Los subcampos de la IA se detallan en la Figura 3:

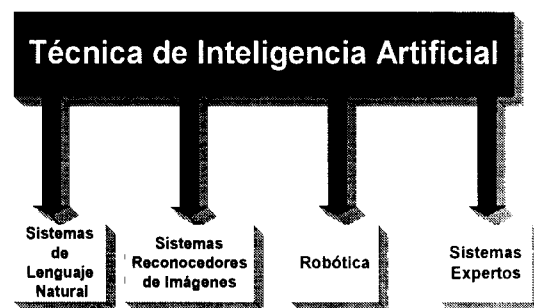


Figura 3: Subcampos de la Inteligencia Artificial.

Bajo el término de *Sistemas Expertos (SE)* se entiende un nuevo tipo de software que imita el comportamiento de un experto humano, en la solución de un problema. Pueden almacenar conocimientos de expertos para un campo determinado y de esta forma solucionar un problema mediante deducción lógica (formal o difusa) de conclusiones. Representan una transición del procesamiento de datos al procesamiento de conocimientos y sustituyen al mismo tiempo los algoritmos por mecanismos de inferencia. El

conocimiento se almacena en una base de conocimientos y se procesa con las estrategias de solución depositadas en el mecanismo de inferencia. Los sistemas expertos encuentran aplicación donde haya conocimientos especializados y experiencia, y no resulte posible o rentable una solución convencional de procesamiento de datos [7].

Un sistema experto difuso es un sistema experto que usa una colección de funciones de pertenencia y reglas difusas, en lugar de lógica Booleana, para razonar los datos. A diferencia de los sistemas expertos convencionales, los cuales son principalmente de razonamiento simbólico, los sistemas expertos difusos son orientados además hacia el procesamiento numérico. Las reglas en un sistema experto difuso están expresadas usualmente en una forma similar a la siguiente:

Si w es bajo y x es alto entonces y es medio

Donde w y x son variables de entrada, y es una variable de salida, **bajo** es una función de pertenencia (subconjunto difuso) definida para w , **alto** es una función de pertenencia definida para x , y **medio** es una función de pertenencia definida para y .

La parte de la regla entre el *si* y el *entonces* es **la premisa de la regla** o **el antecedente** el cual describe a que grado la regla se aplica, mientras que la parte de la regla que le sigue al *entonces* es **la conclusión** o **la consecuencia de la regla**, la cual asigna una función de pertenencia para cada una o para algunas variables de salida. El conjunto de reglas en un sistema experto difuso es conocido colectivamente como **reglas base** o **conocimiento base**.

Con la definición de las reglas y de las funciones de pertenencia a mano, se necesita saber como aplicar este conocimiento a valores específicos de las variables de entrada para poder calcular los valores de las variables de salida. Este proceso es conocido como **el proceso de inferencia**. En un sistema experto difuso, el proceso de inferencia es una combinación de cuatro subprocesos, estos cuatro pasos esenciales son:

- 1.- Fusificación.- la función de pertenencia definida sobre la variable de entrada es aplicada a los valores actuales de las variables de entrada, con el fin de determinar el grado de verdad para cada premisa de la regla.
- 2.- Inferencia.- El valor de verdad para la premisa de cada regla es calculado y posteriormente aplicado a la sección de conclusión de cada regla. Como resultado de esto se obtiene un subconjunto difuso asignado a cada variable de salida para cada regla.
- 3.- Composición.- todos los subconjuntos difusos asignados a cada variable del consecuente son

combinados para formar un subconjunto difuso único para cada salida o salidas.

4.- Defusificación.- es usada cuando es útil convertir el conjunto difuso de salida en un número tradicional (explícito), a pesar de existir ocasiones en las que es usada únicamente para examinar los subconjuntos difusos de salida resultantes del proceso de composición. [2] y [4]

4. CONTROL DIFUSO

El propósito del control es influir en el comportamiento de un sistema cambiando sus entradas según la regla o el conjunto de reglas que modelen la operación de dicho sistema. El sistema es controlado mecánicamente, eléctricamente o químicamente; e incluso por una combinación de las formas anteriores.

La teoría de control clásica usa modelos matemáticos para definir la relación que transforma el estado deseado (requerido) y el estado observado (medido) del sistema en una entrada o entradas, las cuales alterarán el estado futuro de dicho sistema.

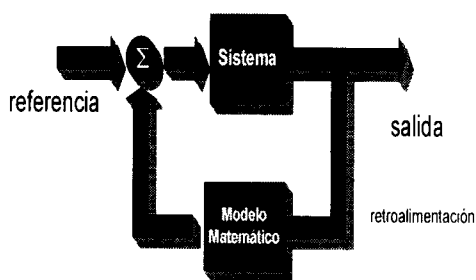


Figura 4: Lazo de Control

El ejemplo más común de un modelo de control, el cual además hasta hace poco fue uno de los mejores (antes del apareamiento del control difuso) es el control Proporcional Integral Derivativo (PID), el cual toma la salida del sistema y la compara con el estado o valor deseado, luego ajusta el valor de la entrada basado en la diferencia entre los dos valores, este proceso lo realiza de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$out = Ae(t) + B \int_0^t e(t) dt + C \frac{de}{dt}$$

$$e(t) = vd - vm$$

Donde A , B y C son constantes, $e(t)$ es el error, de/dt es el cambio del error en el tiempo, vd es el valor deseado y vm es el valor medido. [5]

La mayor desventaja del sistema controlado con un control PID, es que este control asume que el sistema es modelado de una forma tal que está en la línea o al menos con la conducta similar a una función monótona. Según la complejidad del sistema aumenta,

se torna difícil formular un modelo matemático del mismo.

El control difuso reemplaza el rol del modelo matemático, (véase la Figura 4) y en su lugar coloca un cierto número de pequeñas reglas cada una de las cuales solo describe una sección pequeña de todo el sistema. En otras palabras el control difuso reemplaza las complejas ecuaciones matemáticas por el conocimiento expresado en forma de reglas, variables lingüísticas y conjuntos difusos. El proceso posterior de inferencia en paralelo, es obligatorio para generar las salidas deseadas.

De esta forma un modelo difuso ha reemplazado a un modelo matemático, mientras que las entradas y salidas del sistema han permanecido invariables. Las ventajas que presenta el desarrollo de lazos de control usando la lógica difusa son:

- Reducción del ciclo de diseño.
- Simplificación de diseños potencialmente complejos.
- Reducción del tiempo de mercadeo de los productos.-

5. APLICACIONES Y SOFTWARE

La lógica difusa tiene una gran simplicidad conceptual y algorítmica, por esta razón implica grandes beneficios en varias áreas respecto a otras técnicas; justamente a continuación se tratan de exponer algunos de los variados campos en que se ha aplicado con éxito no solamente la lógica difusa sino también sus áreas especializadas como son los sistemas difusos y el control difuso.

5.1. Aplicaciones de los Sistemas Difusos.-

Las áreas en las que la lógica difusa ha sido aplicada con éxito son a menudo poco concretas, pero todas han logrado tener un éxito rotundo. Algunas de las áreas en las que se han obtenido resultados positivos con la utilización de sistemas difusos son: procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, audio, comunicaciones y telecomunicaciones, electrónica, navegación terrestre, marítima y aérea, inteligencia artificial, urbanización, administración, finanzas, psicología, electrodomésticos, agricultura, química, robótica, biomédica, industria, etc. Algunos ejemplos prácticos en estas áreas son: sistemas de recuperación de información, sistemas de navegación para vehículos automáticos, controladores predictivos difusos para la operación automática de trenes, controladores del nivel de líquidos, controladores para brazos robots, definición de las características en controladores para visión de robots, etc.

Los sistemas expertos han sido los receptores más beneficiados por las bondades de la lógica difusa, ya que su dominio es inherentemente difuso, es por esto que existen aplicaciones que salen del dominio de la automatización de algún proceso o de alguna máquina y se relacionan con las decisiones que debe tomar un administrador o gerente; es decir que estamos frente a aplicaciones que hasta hace poco tiempo no podían ser concebidas, salvo contadas y costosas excepciones, siendo realizadas por una máquina. Por ejemplo: los sistemas de soporte de decisiones, planificadores financieros, sistemas de diagnóstico para determinar la patología de cereales, sistemas meteorológicos de apoyo para determinar las áreas más apropiadas para diferentes cultivos, etc. [8]

5.2. Areas de Aplicación del Control Difuso.-

A continuación se presentan algunos de los campos que se han visto beneficiados por el control difuso, refiriéndose particularmente al control de procesos, ya que esta es la forma en la que se ha llevado el tema del control difuso en el presente trabajo. Dichos campos son:

- Sistemas no lineales tales como procesos de control de tensión y posición. [4]
- Sistemas con grandes desviaciones de entrada o sistemas con insuficiente resolución de entrada. [4]
- Sistemas cuyo control es difícil y requieren de la intuición y juicio humano. [8]
- Sistemas que requieren procesamiento de señales adaptativo para sobrellevar los cambios del entorno o de las condiciones del proceso. [4]
- Procesos en los que se debe balancear múltiples entradas o que tienen coacciones conflictivas. [4] y [8]

5.3. Programas de Aplicación y Simulación.-

Con la finalidad de combinar el conocimiento teórico con el práctico y para darle al presente trabajo un giro más didáctico, se analizaron los siguientes softwares de aplicación simulación y desarrollo para lógica difusa: Caja de Herramientas de Lógica Difusa de Matlab, Fuzzy Inference Development Environment (FIDE) (Entorno de Desarrollo de Inferencia Difusa), UNFUZZY Software de Lógica Difusa, Fuzzy Tech, Caja de Herramientas Difusas para Visual Basic.

El software elegido para presentar la aplicación de la sección 6 fue Unfuzzy 1.1, el cual fue desarrollado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia por el Ingeniero Electrónico MS. Oscar Duarte.

6. EJEMPLO SIMULADO

La aplicación generada es un controlador difuso para una lavadora de ropa, el sistema que se desea controlar tiene tres variables de entrada: carga de ropa (c), grado de suciedad (g) y tiempo de saturación (s); y dos variables de salida: tiempo de lavado (t) y temperatura del agua usada para lavar (a). La operación requerida del sistema es la siguiente: se desea que la lavadora pueda especificar el tiempo de operación apropiado y la temperatura que tendrá el agua que usará para lavar la ropa, basándose en tres parámetros: el grado de suciedad que tiene la ropa, el tipo de manchas que tiene la ropa, y la cantidad de ropa cargada dentro de la lavadora.

El grado de suciedad de la ropa es medido con un sensor óptico, el cual indicará el grado de transparencia que tiene el agua cuando ha sido introducida en ella la ropa. El tipo de manchas que tiene la ropa estará indicado por un temporizador (Temp. 1) el cual sensará el tiempo que se tarda el agua en estabilizar su grado de transparencia, a este tiempo se lo llamará tiempo de saturación (s), y variará dependiendo del tipo de manchas que tenga la ropa; por último la carga de ropa que se ha introducido en la lavadora estará dada por una báscula, la cual indicará el peso total de la ropa en el interior del electrodoméstico. Todas estas señales llegarán al controlador y éste como salidas emitirá dos señales: una señal en la que enviará la información de la temperatura a la que debe usarse el agua, esta señal ingresará a un transductor el cual se encargará de transformarla para obtener su equivalente eléctrico, de forma que con este equivalente se pueda calentar un serpentín que esta dispuesto alrededor de la tubería de suministro de agua y de esta manera el agua se calentará al valor indicado por el controlador; otra señal indicará a un temporizador (Temp. 2) el tiempo que el motor deberá permanecer funcionando, dicho temporizador encenderá y apagará el motor de la lavadora según el tiempo que el controlador le indique. El sistema descrito se puede visualizar la Figura 5:

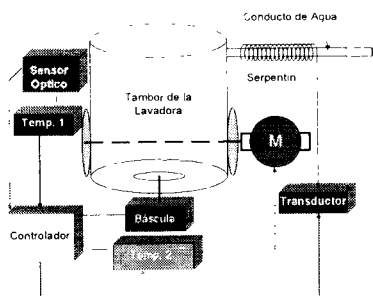


Figura 5: Sistema de la Lavadora de Ropa.

En la Tabla 1 se muestran los conjuntos difusos para las variables tanto de entrada como de salida y los respectivos rangos que comprenden dichos conjuntos, nótese que dichos rangos son arbitrarios.

Tabla 1: Rangos de los Conjuntos Difusos de las Variables de Entrada y Salida.

Variable	Conjuntos Difusos	Rango
Grado de Suciedad (g)	Bajo	de 0 a 30 %
	Medio	de 20 a 80 %
	Alto	de 70 a 100 %
Tiempo de Saturación (s)	Corto	de 0 a 10 min.
	Medio	de 0 a 15 min.
	Largo	de 10 a 20 min.
Carga de Ropa (c)	Poca	de 0 a 25 lb.
	Media	de 15 a 45 lb.
	Alta	de 35 a 60 lb.
Tiempo de Lavado (t)	Muy Corto	de 0 a 10 min.
	Corto	de 0 a 20 min.
	Medio	de 10 a 30 min.
	Largo	de 20 a 40 min.
Temperatura del Agua (a)	Fría	de 5 a 35 °C
	Tibia	de 5 a 65 °C
	Caliente	de 35 a 65 °C

En la Figura 6 se muestran las funciones de pertenencia para cada uno de los conjuntos difusos de las variables de entrada y salida del sistema.

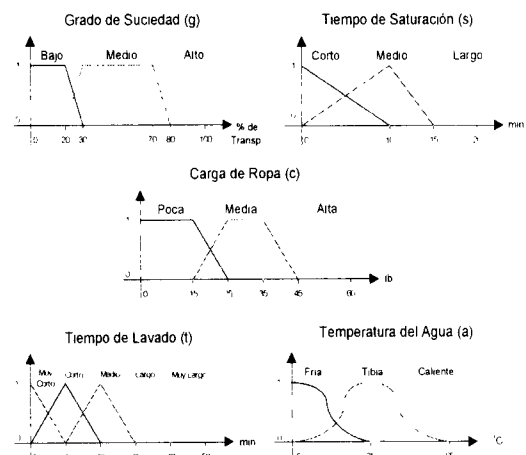


Figura 6: Conjuntos Difusos de Las Variables de Entrada y Salida.

Las reglas que definirán el conocimiento con el que operará el controlador están expuestas en la Tabla 2.

Tabla 2: Reglas Base.

Regla 1:	Si g es bajo y s es corto y c es poca entonces t es muy corto y a es fría
Regla 2:	Si g es bajo y s es corto y c es media entonces t es corto y a es fría
Regla 3:	Si g es bajo y s es corto y c es alta entonces t es medio y a es fría
Regla 4:	Si g es bajo y s es medio y c es poca entonces t es muy corto y a es tibia
Regla 5:	Si g es bajo y s es medio y c es media entonces t es corto y a es tibia
Regla 6:	Si g es bajo y s es medio y c es alta entonces t es medio y a es tibia

Regla 7:	Si g es bajo y s es largo y c es poca entonces t es muy corto y a es caliente
Regla 8:	Si g es bajo y s es largo y c es media entonces t es corto y a es caliente
Regla 9:	Si g es bajo y s es largo y c es alta entonces t es medio y a es caliente
Regla 10:	Si g es medio y s es corto y c es poca entonces t es corto y a es tibia
Regla 11:	Si g es medio y s es corto y c es media entonces t es medio y a es tibia
Regla 12:	Si g es medio y s es corto y c es alta entonces t es largo y a es tibia
Regla 13:	Si g es medio y s es medio y c es poca entonces t es media y a es tibia
Regla 14:	Si g es medio y s es medio y c es media entonces t es largo y a es tibia
Regla 15:	Si g es medio y s es medio y c es alta entonces t es muy largo y a es tibia
Regla 16:	Si g es medio y s es largo y c es poca entonces t es medio y a es caliente
Regla 17:	Si g es medio y s es largo y c es media entonces t es largo y a es caliente
Regla 18:	Si g es medio y s es largo y c es alta entonces t es muy largo y a es caliente
Regla 19:	Si g es alto y s es corto y c es poca entonces t es medio y a es fría
Regla 20:	Si g es alto y s es corto y c es media entonces t es largo y a es fría
Regla 21:	Si g es alto y s es corto y c es alta entonces t es muy largo y a es fría
Regla 22:	Si g es alto y s es medio y c es poca entonces t es medio y a es tibia
Regla 23:	Si g es alto y s es medio y c es media entonces t es largo y a es tibia
Regla 24:	Si g es alto y s es medio y c es alta entonces t es muy largo y a es tibia
Regla 25:	Si g es alto y s es largo y c es poca entonces t es medio y a es caliente
Regla 26:	Si g es alto y s es largo y c es media entonces t es largo y a es caliente
Regla 27:	Si g es alto y s es largo y c es alta entonces t es muy largo y a es caliente

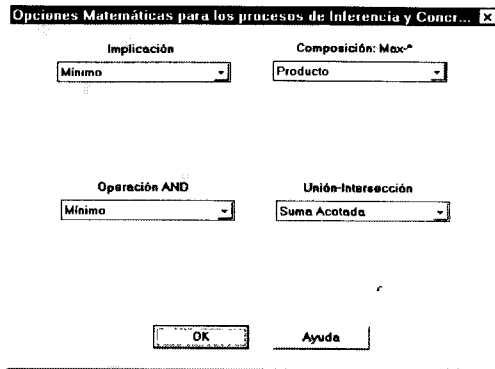


Figura 7: Motor de Inferencia.

La respuesta obtenida al ingresar entradas con valores concretos se pueden observar en la Figura 8 y el análisis paso a paso se muestra en la Figura 9; los valores de las entradas fueron: $g = 40\%$, $s = 17\text{min.}$ y $c = 20\text{lb.}$ Para estos valores de entradas se obtuvieron los valores de salidas: $t = 25.0\text{ min}$ y $a = 54.8\text{ }^\circ\text{C.}$

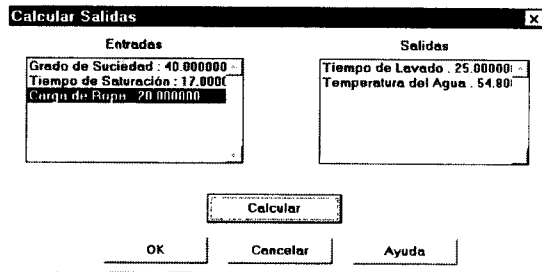


Figura 8: Análisis del Sistema de Control.

La base de reglas que se describe en la tabla anterior puede ser optimizada eliminando las que no sean de importancia, pero para este ejemplo utilizaremos todas las reglas que constan en la Tabla 2.

Se genera el universo de entrada, el universo de salida y la base de reglas en Unfuzzy, se utilizó el difuso *Singlenton* para las variables de entrada y el congresor *Centro de Gravedad* para las variables de salida. El motor de inferencia fue seleccionado y especificado con las operaciones que se visualizan en la ventana mostrada en la Figura 7.

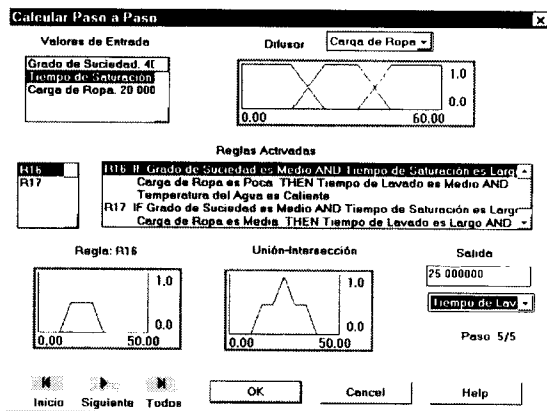


Figura 9a: Análisis Paso a Paso.

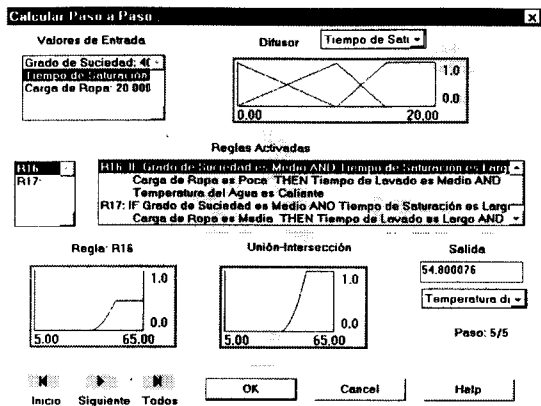


Figura 9b: Análisis Paso a Paso.

El control de los parámetros que se desea manejar en este sistema ha sido tradicionalmente de lazo abierto, debido a la gran complejidad que representa su formulación matemática; pero la especificación manual del tiempo de lavado y del tipo de agua con que se lavará implica que, en caso de errar por defecto, la ropa resultará mal lavada y en el caso de errar por exceso, se desperdiciará energía y recursos, se desgastará la ropa innecesariamente y se acortará el tiempo de vida útil de la lavadora. Si se utiliza un controlador difuso, la solución del problema se convierte en algo muy sencillo y su formulación se la puede realizar usando solamente la intuición y el conocimiento humano. [8]

7. CONCLUSIÓN

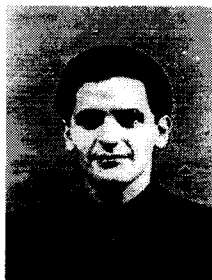
La consecuencia de trabajar con sistemas reales es el tener que manejar la ambigüedad implícita en estos. Solamente hasta ahora con la aparición de la lógica difusa se ha podido incorporar un toque de sentido común a los sistemas diseñados. Los sistemas de lógica difusa permiten un gran rendimiento, implementación simple y bajos costos; adicionalmente son la mejor solución para manejar el eterno problema de la no linealidad. Las aplicaciones de la lógica difusa son vastas, y además la lógica difusa ha tenido utilidad en la solución de problemas hasta ahora irresolubles; para mencionar uno de ellos podemos observar el controlador de una lavadora de ropa, que ha sido el ejemplo presentado en este artículo, el cual hasta ahora había sido un sistema tradicionalmente de lazo abierto debido a la complejidad y ambigüedad en sus variables. El propósito de este trabajo ha sido dar el primer paso para la investigación de la Lógica Difusa, pues este campo es de vital trascendencia por ser

visualizado como la técnica de control del nuevo milenio.

REFERENCIAS

- [1] Duarte Oscar. Aplicaciones de la Lógica Difusa (próximo a aparecer) 1999.
- [2] Stenerson Jon. Fundamentals of Programmable Logic Controlers, Sensors & Communications. Editorial Prentice Hall. 1ra edición. New Jersey - Estados Unidos 1997.
- [3] Jhonsonbaugh Richard. Matemáticas Discretas. Editorial Iberoamérica. 1ra edición. México - México 1990.
- [4] Kosko Bart. Neural Networks and Fuzzy Systems. Editorial Prentice Hall. 1ra edición. New Jersey - Estados Unidos 1992.
- [5] Kuo Benjamín. Sistemas de Control Automático. Editorial Prentice Hall. 7ma edición. México - México 1995.
- [6] Duarte Oscar. Sistemas de Lógica Difusa (próximo a aparecer) 1999.
- [7] Nebendahl Dieter. Sistemas Expertos. Editorial Marcombo S.A. 1ra edición. Barcelona - España 1990.
- [8] Ojeda Francisco. Tesis de Grado Aplicaciones con Lógica Difusa (Fase I) Fundamentos y Herramienta de Desarrollo. Sangolquí - Ecuador 1998.

BIOGRAFÍA



Francisco Esteban Ojeda Salazar, nació en la ciudad de Quito en el año de 1975. Se graduó de Ingeniero Electrónico con especialización en Automatización y Control en el año de 1998. Actualmente trabaja como investigador en el CICTE (Centro de Investigaciones

Científico Técnicas del Ejército), además es profesor en la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército. Sus áreas de interés son la inteligencia artificial, las técnicas de control moderno, las redes de comunicación y las tecnologías emergentes en comunicaciones.