



Universidad Autónoma del Estado de México

Centro Universitario UAEM Valle de Chalco

SISTEMAS DIFUSOS PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

ENSAYO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN COMPUTACIÓN

P R E S E N T A

LUIS RAFAEL GONZÁLEZ SÁNCHEZ

ASESORA:

Dr. en C. en S. C. E. Marisol Hernández Hernández

VALLE DE CHALCO SOLIDARIDAD, MÉXICO ENERO 2023



CUVCH

**SISTEMAS DIFUSOS PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS
TECNOLOGÍAS**

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
DESARROLLO	6
Conjuntos Difusos	7
Base de datos difusa	8
Reglas de la lógica difusa	9
Controladores Difusos	11
Sistema de Control Difuso Adaptativo	12
Arquitectura ANFIS en Controlador Difuso	13
Sistema Neuro-Difuso	14
Modelo de referencia	14
Modelo difuso inverso	15
Modificador de la base de conocimiento	15
Mapas Cognitivos Difusos	17
Funciones de Membresía	17
Relación Difusa	18
Razonamiento Aproximado	18
Inferencia Difusa	19
Sistema Difuso Mamdani	20
Sistema Difuso Sugeno	21
Sistemas de control difuso	22
Aplicaciones	25
Lógica difusa aplicada en la agricultura	25
Lógica difusa aplicada al riesgo financiero	26
Lógica difusa aplicada en la robótica	26
Lógica difusa aplicada en el control de tráfico vehicular	27
Lógica difusa aplicada en el transporte público	27
Lógica difusa aplicada en lenguaje y escritura	28
Lógica difusa aplicada en sistemas de recomendación	29
Lógica difusa aplicada en la minería de datos	29

Lógica difusa aplicada en la mejora del medio ambiente	30
Lógica difusa aplicada en redes inalámbricas	30
Lógica difusa aplicada en el control de sistemas de energía	31
Lógica difusa aplicada en el encuadramiento de objetos y ajuste de autoenfoco en cámaras fotográficas.....	31
Lógica difusa aplicada en defensa, como la localización de objetivos, reconstrucción de imágenes y la generación de imágenes infrarrojas ..	33
Lógica difusa empleada en el tráfico de routers de internet.....	34
Sistema de control para un sistema de nivel en un autómeta programable.....	35
Sistema de control en medicina.....	36
Sistema de conducción autónoma.....	36
Sistema de motores automotrices inteligentes	38
Sistema de aire acondicionado	39
Sistema de control de CO₂	39
Sistema de inteligencia artificial en cámaras de seguridad.....	40
Sistema de inteligencia en ascensores.....	41
Sistema de control de vuelo y vehículo aéreo no tripulado	42
Sistema de iluminación automática	43
Sistema de estacionamiento automático	44
Sistema difuso en control de calidad	45
Sistema de control difuso en hornos y estufas	46
Sistema de control difuso para el monitoreo de pH.....	47
Sistema de control difuso en la producción de Candida utilis.....	48
Sistema de control difuso en la producción de cerveza artesanal	49
Sistema de control difuso en refrigeradores	50
Sistema de control difuso en lavadoras y secadoras de ropa	51
CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS DE CONSULTA.....	56

INTRODUCCIÓN

Actualmente, hay nuevas maneras de abordar la inteligencia artificial, misma que sirva para solucionar muchos problemas de decisión; existen múltiples aplicaciones relacionadas con esta disciplina y aunque los humanos por lo general solo visualizan el producto final, debajo de esas capas de código, hay metodologías para realizar dicha inteligencia artificial.

Algunas metodologías utilizadas para el desarrollo de la inteligencia artificial son las redes neuronales, sin embargo, que funciona con datos duros, es decir, si o no, 1 o 0, falso o verdadero; sin embargo, hay otros métodos que también ayudan a la toma de decisiones automatizadas, tal como la lógica difusa, que se considera como una forma de razonamiento lógico que agrega a la automatización esquemas de razonamiento propios del hombre mediante reglas cuyos valores son de 0 a 1.

En estos últimos años las personas son capaces de tomar decisiones aun teniendo información imprecisa, la lógica difusa ayuda a representar esta información más comprensible, representa la información con gráficas y tablas, implementa sistemas de controladores difusos que agiliza la toma de decisiones o una respuesta lo más precisa posible.

Hoy en día la lógica difusa solo se ha tomado en cuenta en pocos países, principalmente en Japón, para la fabricación de trenes, electrodomésticos e inteligencia artificial.

En México y otros países como Estados Unidos no han desarrollado tecnología utilizando el potencial que ofrecen los sistemas difusos, cuyos beneficios son aplicados tanto en el área de electrónica, como en otras áreas de la salud, agricultura e informática, entre otros.

Este ensayo reúne las características principales de la lógica difusa, empezando con sus antecedentes y siguiendo con sus avances, su representación, los mapas cognitivos difusos y aplicaciones realizadas en la bibliografía internacional.

DESARROLLO

En el siglo XVIII, David Hume e Immanuel Kant, el razonamiento se obtiene de las experiencias a medida que pasan los años de vida, David Hume analizaba la lógica del razonamiento común, mientras que Kant creía que solo los matemáticos podían obtener definiciones claras en ambos había principios que no tenían solución. (Ocanto,2016)

En el siglo XX, el filósofo Bertrand Russell dijo que la lógica produce contradicciones, realizo un estudio sobre la falta de claridad del lenguaje, así mismo Ludwig Wittgenstein realizo un estudio de las palabras y llego a la conclusión de que el lenguaje de una palabra puede tener diferentes significados, modos y maneras. (Russell, 1900)

La lógica tradicional se basa en 2 valores duros si y no, falso y verdadero, 0 o 1. En 1920 Jan Lukasiewicz desarrollo la Lógica Plurivalente, para él los conjuntos tienen un posible valor que van de 0 y 1, en este intervalo existen infinito número de valores.

En 1965 Lofti Asier Zadeh publicó la tesis de Conjuntos Difusos, tres años después, gracias a las aportaciones de Bertrand Russell, Werner Heisenberg, Max Black y Jan Lukasiewicz, Zadeh publicaría en 1968 Algoritmos Difusos. En 1971 Lofti Asier Zadeh publicó el estudio de Semántica Difusa Cuantitativa en el cual se incluyen las principales características de metodología de la Lógica Difusa y sus aplicaciones.

A partir de 1973, varios investigadores de universidades japonesas también harían aportaciones al desarrollo de la teoría, como fueron Terano con el controlador bulldozer en Tokio, Kiyoji Asai e Hideo Tanaka con el artículo "Programación matemática difusa" en Osaka.

En 1975 en el reino unido Assilian y Mamdani desarrollaron el controlador difuso, primero en 1974 Mamdani publicó el artículo "Aplicación de un Algoritmo Difuso para el Control de una Planta con una Dinámica Simple" este artículo describe que un algoritmo difuso puede ser aplicado al control de

una máquina de vapor, pero este tipo de controlador no fue implantado hasta 1980 en una planta cementera en Dinamarca. (Roman,2013)

Hitachi en 1987 implementó un controlador difuso basado en reglas para el control de trenes a Sendai, en el mismo año la empresa Omron desarrolla los primeros controladores difusos comerciales, Fuji aplica la Lógica Borrosa también conocida como Lógica Difusa en plantas depuradoras de agua en Japón. (Ocanto,2016).

Conjuntos Difusos

Los conjuntos difusos principalmente fueron propuestos por Lofti A. Zadeh en 1965 Figura 1, son agrupaciones de objetos que podemos encontrarlos en la vida diaria por su grado de difusidad en su descripción o características, son definidos enumerando sus objetos o definiendo cada una de las características que los conforman, a diferencia de los conjuntos tradicionales los conjuntos difusos permiten tener valores intermedios, pueden tener semejanzas aunque los objetos no son sean iguales, se transfiere el pensamiento humano a operaciones digitales ver Figura 1.



Figura 1. Lofti A. Zadeh

(<https://ignaciogavilan.com/robotica-y-el-retorno-de-la-logica-difusa/>)

La lógica difusa incluye los valores extremos junto a los valores intermedios, estos al procesar la operación se generan valores generales y se extienden a los valores clásicos, generalmente pueden ser muy útiles. (Sancho,2019).

Los conjuntos difusos son diferentes a los de lógica clásica en grados de pertenencia, ya que en un conjunto difuso un elemento puede pertenecer al conjunto A y al B en cierto grado, en la lógica clásica o pertenece a A o a B, estos son datos duros, a menudo se utilizan para simplificar modelos matemáticos complejos al reducir la necesidad de representar relaciones precisas y permitir aproximaciones más simples, es especialmente útil en aplicaciones como control de robots, sistemas de recomendación y procesamiento de lenguaje natural.(Botía et al.,2009)

Base de datos difusa

El objetivo principal de la base de datos es el de almacenar información difusa, permitir la modificación y recuperación de la información que en cierto momento se requiera, está compuesta por dos elementos, la teoría de base de datos y el modelo relacional de la teoría de conjuntos, sus objetivos son almacenar información difusa, tratamiento y/o con consulta de la información de forma difusa (Galindo et al., 2006).

El diseño de la base difusa está conformado por:

- **Modelo Conceptual**

Su función es captar requisitos, se utiliza el modelo ER/EER, el modelo ER (Entidad-Relación) y el modelo EER (Entidad-Relación Extendido) son modelos de diseño de bases de datos utilizados en ingeniería de software y gestión de bases de datos para describir la estructura de una base de datos. Ambos modelos se utilizan para representar las entidades, relaciones y atributos dentro de un sistema de información, ver Figura 2.

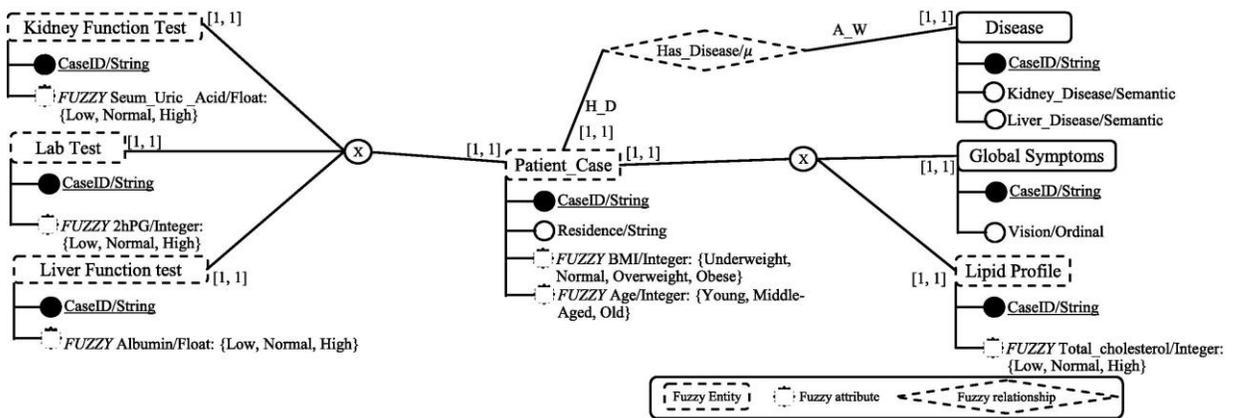


Figura 2. Modelo EER difuso de base de caso extendida
<https://www.researchgate.net/profile/Mohammed-Elmogy/publication/316590357/figure/fig1/AS:613883521818645@1523372645471/The-extended-case-base-fuzzy-EER-model.png>

- **Modelo lógico**

Para poder construir un modelo de BDRD (Base de Datos Relacional Difusa) se debe proporcionar mecanismos de representación de información difusa, proporcionar un espacio para almacenar el significado de la información difusa, proporcionar un número mínimo de operadores y satisfacer los requisitos de un modelo racional.

Reglas de la lógica difusa

Generalmente, la toma de decisiones de las personas es de forma lógica, este tipo de toma de decisiones es nombrado Modus Ponens Generalizado. El Modus Ponendo Ponens es un argumento válido en lógica proposicional que sigue la siguiente estructura de razonamiento:

- Si p, entonces q. ($P \rightarrow Q$)
- pag. (PAG)
- Por lo tanto, q. (Q)

La estructura de esta forma es la siguiente ver Figura 3:

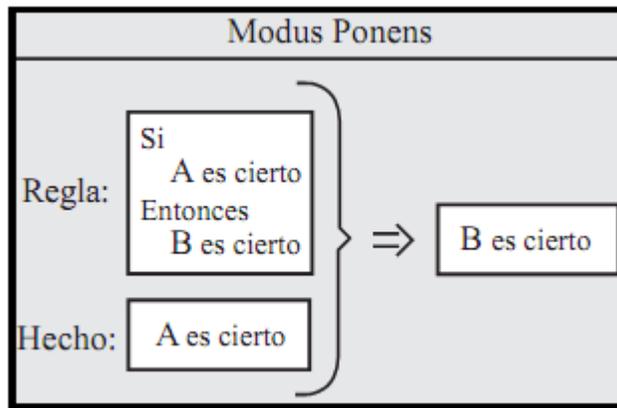


Figura 3. Modus Ponendo Ponens. (http://www.cs.us.es/blogs/iic2012/files/2012/02/IIC-Teoria5_v04.pdf).

En la figura 1 se interpreta “si X está en la posición A, entonces Y está en la posición B” en esta parte del proceso los valores difusos tomarían la posición en los conjuntos A y B (Sancho, 2019).

Si se toma en cuenta la regla de inferencia de Zadeh, al realizar el proceso se toma la regla borrosa y obtiene una desigualdad funcional:

$$T(x, I(x, y)) \leq y \text{ para todos } x, y \in [0, 1] \quad (2)$$

“T” tomaría un valor de una norma continua e “I” su valor sería una función de tipo borrosa (Grimalt, 2017).

Como se puede observar, en el diseño, las bases de datos difusas permiten recuperar datos con una leve descripción de lo que se necesita obtener, esto es similar a un like en una relacional, pero con la diferencia de que en la difusa se puede conjuntar las tablas con grados de pertenencia.

Algunas de las desventajas de implementar base de datos difusas suelen ser más complejas de diseñar, implementar y mantener en comparación con las

bases de datos tradicionales, la complejidad de esto puede llevar a costos más altos tanto en términos de desarrollo inicial como de mantenimiento continuo.

Esto puede limitar su adopción en organizaciones con recursos limitados, a pesar de sus aplicaciones en campos específicos, las bases de datos difusas no son ampliamente aceptadas ni utilizadas en todas las industrias, muchas organizaciones siguen confiando en bases de datos tradicionales debido a que son más simples y a la falta de necesidad de gestionar la incertidumbre, otro punto en contra es al realizar operaciones, ya que suelen ser más lentas en comparación con las bases de datos tradicionales, especialmente cuando se trata de consultas complejas, esto puede ser preocupante en aplicaciones donde la velocidad de respuesta es crítica.

Controladores Difusos

Actualmente, en el año 2023 la aplicación de la lógica difusa se da en los sistemas de control borroso o difuso, estos utilizan expresiones difusas que al ser empleadas en reglas controlan los sistemas difusos, los datos que contienen los conjuntos difusos tienen un grado de pertenencia y ayudan al controlador a tomar diferentes decisiones, los sistemas de control son realizados por una o varias personas expertas en el tema con la finalidad de obtener una amplia base de reglas sobre las cuales el controlador difuso tomara las decisiones (Jaimes, 2010).

Una de las ventajas de los controladores difusos es que pueden diseñarse, aunque no se tenga un modelo matemático, ya que estos están basados en reglas, sin embargo, al no contar con un modelo matemático no podrá realizar simulaciones.

En resumen, el control difuso está basado en la implementación del conocimiento del experto, que utiliza reglas de control Sí-Entonces, que relacionan variables de entrada del controlador por medio de términos

lingüísticos. La construcción y el ajuste de un controlador difuso pueden ser más sencillos en comparación con los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) u otros controladores convencionales. No se requiere un modelo matemático preciso del sistema (Hernandez,2004).

En algunas aplicaciones, los controladores difusos pueden reducir los costos operativos al minimizar el consumo de energía, reducir el desgaste de equipos o mejorar la eficiencia de los procesos.

Sistema de Control Difuso Adaptativo

El controlador difuso adaptativo es igual a cualquier controlador difuso, solo que tiene la capacidad de ser modificado mientras está en ejecución, una vez modificada la información del controlador compara la referencia y la salida, el proceso se hace para que el valor de salida y referencia sean similares siendo el modelo de referencia el que indica como se debe comportar el controlador. (Ponce,2010; Álvarez et al.,2020)

El mecanismo de aprendizaje del controlador difuso adaptativo está compuesto por dos partes, el primero sería el modelo difuso inverso y el segundo el modificador de la base de conocimiento, el modelo difuso inverso indica cuanto debe modificarse la señal de salida para que sea igual al modelo de referencia, el modificador de la base de conocimiento tiene la capacidad de cambiar la ubicación de las funciones de pertenencia y las reglas del controlador para que el valor de salida sea similar a lo que dice el modelo inverso ver Figura 4.(Gozaíni,1998)

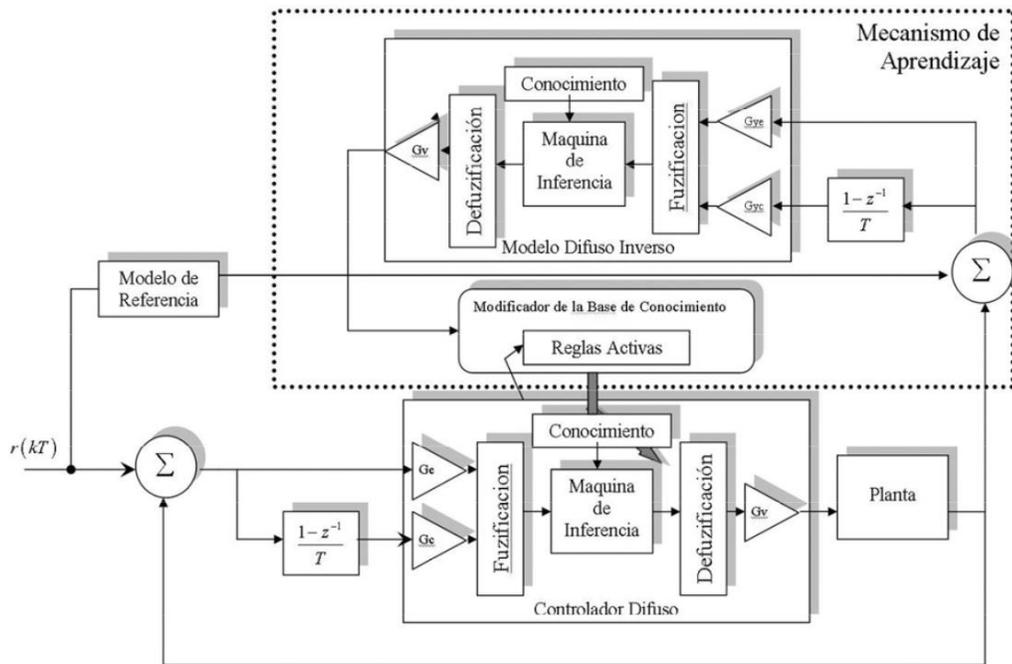


Figura 4. Sistema de Control FRMLC

(<http://www.scielo.org.co/img/revistas/rfiua/n58/n58a11i01.gif>)

Arquitectura ANFIS en Controlador Difuso

Un sistema ANFIS está integrado por características de sistemas difusos y redes neuronales, se utiliza la representación de conjuntos de restricciones de los sistemas difusos y la adaptación de propagación de las redes neuronales, la primera parte de una regla define un subespacio difuso, mientras que la segunda parte especifica la salida dentro del subespacio ver Figura 5.

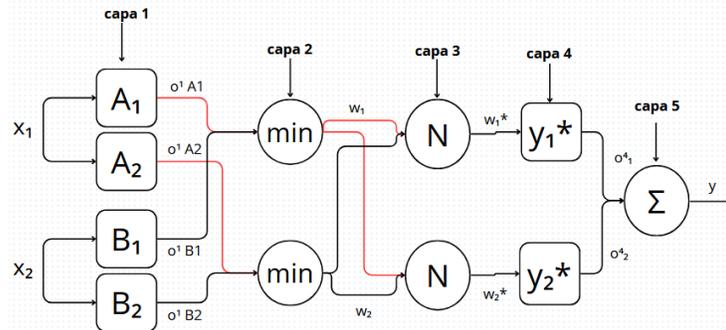


Figura 5. Arquitectura ANFIS para un controlador difuso (<https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQU0C5Z5M9tg6GZ1jUW4qn-YRMFDiEDMnSznxJRkLfTyV0Qg-O>)

Sistema Neuro-Difuso

El sistema neuro-difuso, también llamado computación flexible (soft-computing), la computación flexible, son conjuntos de técnicas de información imprecisa que tienen relación con el mundo real como puede ser la toma de decisiones

Algunas de las técnicas donde se utiliza la computación flexible son:

- Lógica difusa
- Redes neuronales
- Algoritmos genéticos
- Teoría del caos
- Teoría del aprendizaje
- Razonamiento aproximado

Un sistema neuro-difuso es una fusión de lógica difusa y redes neuronales artificiales que combina la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales con la representación de incertidumbre de la lógica difusa, estos sistemas son útiles en una amplia variedad de aplicaciones donde se requiere modelización, control y toma de decisiones, su capacidad para proporcionar resultados interpretables y aprender de datos de entrada los convierte en una herramienta poderosa en la inteligencia artificial y la ingeniería de sistemas (Carranza,2015; Carezzano,2015).

Modelo de referencia

El modelo de referencia define la respuesta en el proceso y establece la estabilidad, el tiempo de asentamiento y el impulso de la señal, busca suavizar los cambios en la referencia para evitar cambios bruscos en el sistema.

Modelo difuso inverso

Los valores de entrada del modelo difuso inverso son dos: el error entre la salida de la referencia, $Y_m(kT)$, y la salida del valor, otro valor importante es el valor de entrada, $Y_c(kT)$.

El valor $Y_e(kT)$ indica el error del sistema con respecto al modelo de referencia, el modelo inverso calcula cuanto se modificará la señal del controlador para que el valor de salida sea similar al modelo de referencia. Las reglas del modelo inverso son una relación difusa: Tabla 1.

		$Y(kc)$				
		-1,0	-0,5	0	0,5	1,0
$Y(ke)$	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-0,5	0
	-0,5	-1,0	-1,0	-0,5	0	0,5
	0,0	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0
	0,5	-0,5	0	0,5	1,0	1,0
	1,0	0	0,5	1,0	1,0	1,0

Tabla 1. Base de reglas del modelo inverso

(<http://www.scielo.org.co/img/revistas/rfiua/n58/n58a11t01.gif>)

Si error $y_e(kT)$ es bajo y deriva $y_c(kT)$ es baja, entonces la corrección en la señal de control es baja.

Modificador de la base de conocimiento

El modificador tiene la función de cambiar el controlador difuso para que obtenga un mejor comportamiento, este influye sobre la señal de control, el modelo inverso le dice a la base de reglas cuanto debe modificar la señal de control, $p(kT)$, el modificador cambia la posición de las funciones de

permanencia de salida del controlador. El valor de salida del controlador puede ser indicada en la ecuación 3.

$$u(kT) = u(kT-T) + p(kT) \quad (3)$$

$U(kT)$ es la señal de control actual.

$U(kT-T)$ es la señal de control en el periodo anterior.

$P(kT)$ es el factor de corrección.

Estos controladores difusos son un conjunto de técnicas que dan la posibilidad de ajustar en tiempo real el valor de los parámetros de control, son una herramienta importante en el campo de la ingeniería y la automatización, estos pueden ser de tipo eléctrico, neumático, hidráulico, mecánico, entre otros. Esto permite ahorrar recursos de mantenimiento y aplicación, ya que solamente se activan cuando es en verdad sea necesario (Hernandez,2004; Polo,2007).

Una de las principales ventajas de los controladores difusos es su capacidad para manejar sistemas complejos y no lineales, pueden funcionar bien en situaciones donde otros enfoques de control podrían ser menos efectivos debido a la falta de modelos matemáticos, lo que los hace más comprensibles para los seres humanos en comparación con los modelos matemáticos convencionales, esto puede ser una ventaja en aplicaciones donde la transparencia son importantes, una desventaja en el rendimiento de un controlador difuso puede ser al tomar una mala elección en la calidad del diseño y la configuración, es muy adaptable en sistemas ya construidos en muchos casos, los controladores difusos se utilizan en combinación con otros dispositivos como controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), para mejorar el rendimiento global de un sistema (Hernandez,2004).

Mapas Cognitivos Difusos

Los mapas cognitivos difusos son representaciones gráficas de simulaciones del comportamiento o causalidad, generalmente este comportamiento es no lineal, ya que incluye muchos bucles con relación a la causa y efecto. Están compuestos por nodulos y aristas, los nodulos representan los conceptos, las causas y las aristas representan la relación de causalidad. Una de las desventajas de los mapas cognitivos difusos es cuanto más conceptos contenga su nivel de elaboración aumenta (Botella, 2007; Curia, 2011).

Funciones de Membresía

Las funciones de membresía son los conjuntos con los cuales se pueden medir el valor al cual pertenecen dichos conjuntos, las funciones de membresía se representan de diferentes formas como pueden ser triangulares y gaussianas. Generalmente, se utiliza el intervalo de membresía de $[0,1]$ para obtener un rango más exacto. Entre sus características se encuentra núcleo, soporte, límites, conjunto normal, conjunto difuso, convexo y la altura (Solis,2005).

Una de las ventajas clave de las funciones de membresía difusa es su capacidad para adaptarse a diferentes tipos de datos y situaciones, puedes definir funciones de membresía difusa de acuerdo con el contexto específico de tu problema, lo que las hace extremadamente versátiles, al utilizar funciones de membresía difusa en sistemas de toma de decisiones, es posible obtener resultados más realistas, aunque las funciones de membresía difusa son poderosas, también pueden presentar desafíos de implementación y computacionales, especialmente en sistemas en tiempo real o en aplicaciones que involucran grandes conjuntos de datos, por la gran carga de trabajo.

Relación Difusa

Mientras que la teoría de conjuntos clásica describe la existencia o no de elementos, la relación difusa describe el grado en el que están asociados o interactúan los elementos de los conjuntos difusos, se puede representar por una matriz relacional difusa, los cuales se toman valores en un intervalo de $[0,1]$, la relación difusa es un conjunto difuso en el espacio producto ver Figura 6.

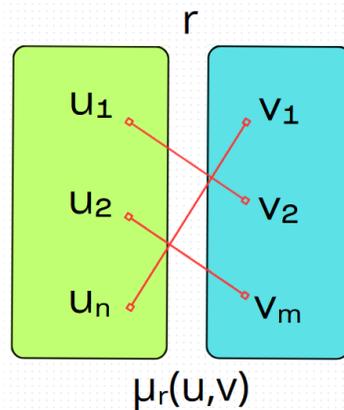


Figura 6. Matriz Relacional Difusa (<http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/FLEB/main/main25.htm>)

Razonamiento Aproximado

Fuzzy Reasoning o Razonamiento aproximado es el proceso de obtener conclusiones imprecisas a partir de ideas o información incompleta.

Tipos de razonamiento aproximado:

- Razonamiento Categórico. Este modo de razonamiento, los antecedentes no contienen probabilidades o cuantificadores difusos, utiliza reglas y diagramas de Venn para evaluar la validez de los argumentos basados en proposiciones categóricas. Estas reglas incluyen el cuadrado de oposición (que describe las relaciones de contradicción, contrariedad, subcontrariedad y subalternación), las conversiones y obversiones de proposiciones.

- Razonamiento Disposicional. Este modo de razonamiento los antecedentes pueden contener el cuantificador difuso “normalmente” o “usualmente”, el cuantificador trabaja en conjunto con el razonamiento disposicional y silogístico, ejemplo de regla de inferencia:
Aquí $[R \downarrow L]$ es la proyección de la relación difusa R sobre L
- normalmente ((L, M) es R) \Rightarrow normalmente (L es $[R \downarrow L]$).
- Razonamiento Cualitativo. Este modo de razonamiento, los antecedentes y los consecuentes tienen variables difusas y conjuntos relacionales de tipo “si – entonces”.
- Razonamiento Silogístico. Este modo de razonamiento los antecedentes contienen cualquier cuantificador borroso.

Inferencia Difusa

Es un método de interpretación y valoración, contiene experiencias y/o conocimientos de varias personas expertas en el tema, el primer paso para elaborar un sistema experto es establecer variables que ayuden a encontrar el resultado, para cada una de las variables se asignan conjuntos difusos U y V, se elaboran reglas difusas este número de reglas puede variar dependiendo del número de variables difusas que contenga ver Figura 7 (Pulido, 2013).

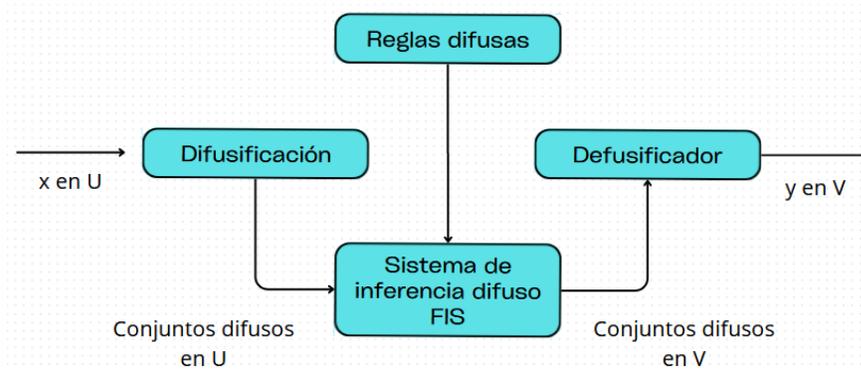


Figura 7. Estructura de un sistema de inferencia difuso.

(<http://www.scielo.org.co/img/revistas/espe/v31n71/v31n71a5f1.jpg>).

Se alinea con el razonamiento humano y es adecuada para aplicaciones que involucran interacciones humanas y preferencias difusas, puede identificar patrones sospechosos o anomalías en grandes conjuntos de datos, lo que es crucial en ciberseguridad, detección de fraudes y diagnóstico de fallas.

Sistema Difuso Mamdani

El sistema difuso de tipo Mamdani está conformado por dos partes, el fuzzificador y el defuzzificador.

El fuzzificador es el proceso de entrada de un valor de tipo numérico, al ser leído lo convierte a un valor lógico difuso para que el mecanismo de interferencia pueda procesarlo y compararlo con los otros valores de entrada obtenidos.

El mecanismo de interferencia en esta parte del proceso al obtener el valor de entrada lo compara con la lista de reglas asignadas para generar el valor de salida.

La base de reglas contiene un listado de soluciones diseñadas para obtener el mejor resultado posible, cada una de las reglas está formada por dos partes, el antecedente y la conclusión, estas reglas son de tipo IF-THEN.

El defuzzificador en esta parte del proceso proporciona un valor de salida difuso de tipo numérico, para que sea comprensible y manipulable por un dispositivo externo como puede ser un controlador, existen diferentes métodos de defuzzificación como son: centroide, bisectriz, máximo central, máximo más pequeño, máximo más grande ver Figura 8.

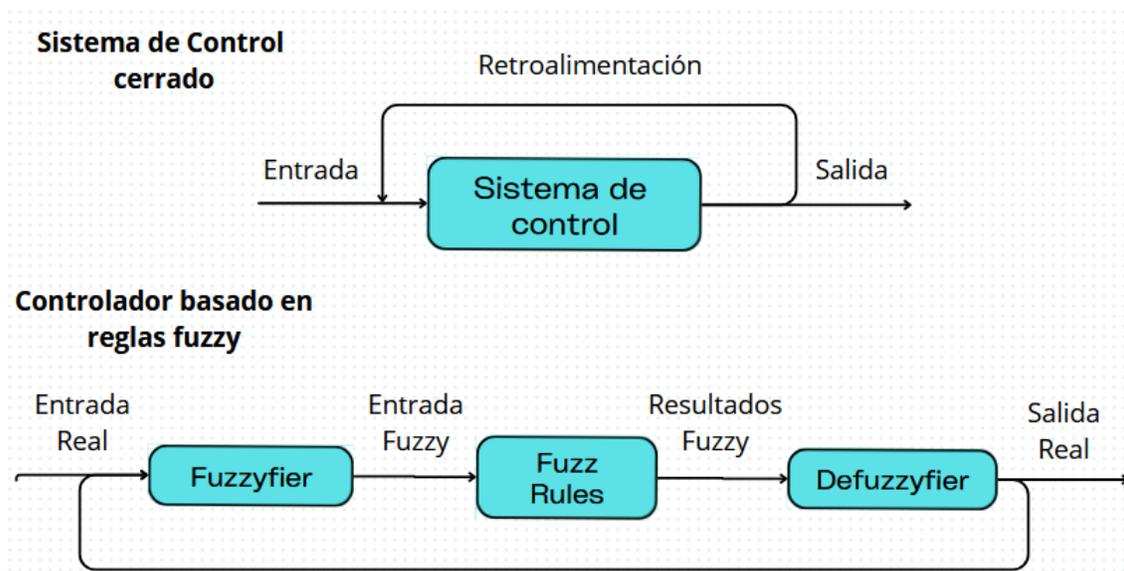


Figura 8. Comparación entre un sistema de control cerrado y uno basado en reglas fuzzy. (<https://catalinasist.files.wordpress.com/2011/04/modus-ponens.png?w=300&h=195>).

Sistema Difuso Sugeno

El sistema difuso de tipo Takagi-Sugeno fue publicado en 1985, en este tipo de sistema el fuzzificador toma un valor de entrada de tipo numérico, al ser leído lo compara y lo convierte a un valor lógico difuso, el mecanismo de interferencia compara la información con la lista de reglas de la misma manera que lo hace el sistema Mamdani.

La base de reglas a diferencia del sistema Mamdani estas son de tipo numérico, el valor de entrada al ser comparado con la lista de reglas asignadas determinará un valor de salida de tipo numérico por lo que no será necesaria la etapa de defuzzificación y esto implica un gasto económico menor ver Figura 9.

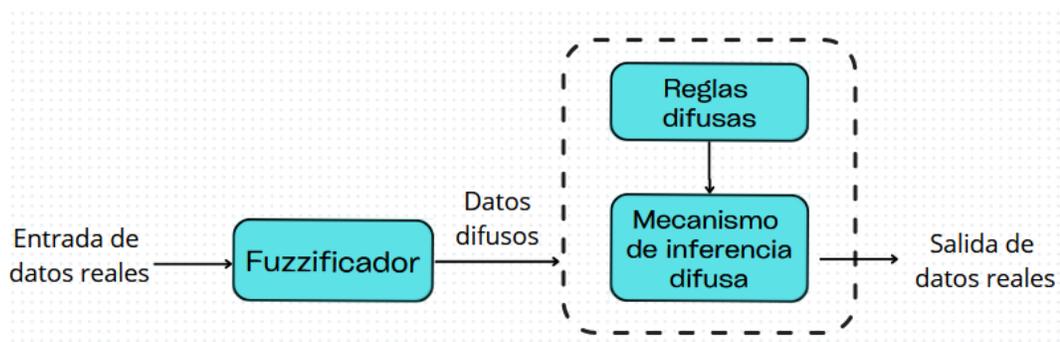


Figura 9. Procesamiento general de un sistema difuso Sugeno.
 (<http://www.scielo.org.co/img/revistas/rium/v11n21/v11n21a11f1.jpg>)

Un sistema difuso Sugeno es fácil de interpretar porque las reglas se expresan en términos de funciones lineales o constantes, esto hace que sea claro entender cómo se toman las decisiones y cómo se relacionan las entradas con las salidas, esto es útil en situaciones donde se requiere una modelización precisa, como control de sistemas, ofrece beneficios como interpretación intuitiva, modelado preciso, adaptabilidad, flexibilidad en las reglas y la capacidad de combinar lógica difusa con lógica convencional.

Sistemas de control difuso

Los sistemas de control difuso (FCS) permiten a los humanos tomar decisiones y controlar aplicaciones en tiempo real basadas en información lingüística inexacta (Khokhar, 2020). Estos sistemas fueron base de lo que publicó Zadeh en 1965 utilizando los conjuntos difusos.

La intención de Zadeh era la creación de una forma de manejar eficientemente la imprecisión del razonamiento humano, y lo hizo utilizando sistemas difusos. Estos métodos se han utilizado en muchas aplicaciones, algunas de ellas se mencionan a continuación.

Los Modelos matemáticos para controladores de las bombas de cavidad progresiva, que utiliza un sensor de presión de fondo de pozo, que estima el nivel de fluido encima de la bomba por medio de la implementación de un filtro de Kalman, cuyos resultados muestran un mejor desempeño al compararlo con técnicas de sistemas lineales, mismo que se muestra en la figura 10.

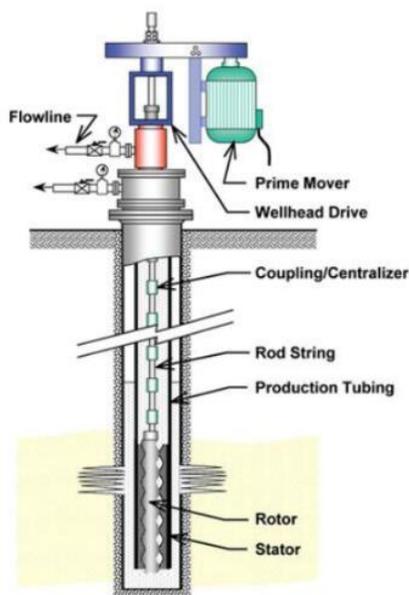


Figura 10. Configuración PCP. (<https://www.redalyc.org/journal/5537/553762533003/1657-4583-rui-18-02-17-gf1.png>).

En la manufactura se ha utilizado con mapas cognitivos difusos, lo cuales sirven para mostrar las decisiones en grados de membresía, tal es el caso del sistema basado en lógica difusa que se aplicó a pequeñas empresas de manufactura para detectar sus problemas y proponer posibles soluciones derivadas de un sistema difuso, en donde se simuló su comportamiento a través de una red neuronal, probando su desempeño con hipótesis y cuyo resultado fueron las estrategias de solución a sus problemas de producción y administración a través de la tecnología; el mapa se observa en la figura 11.

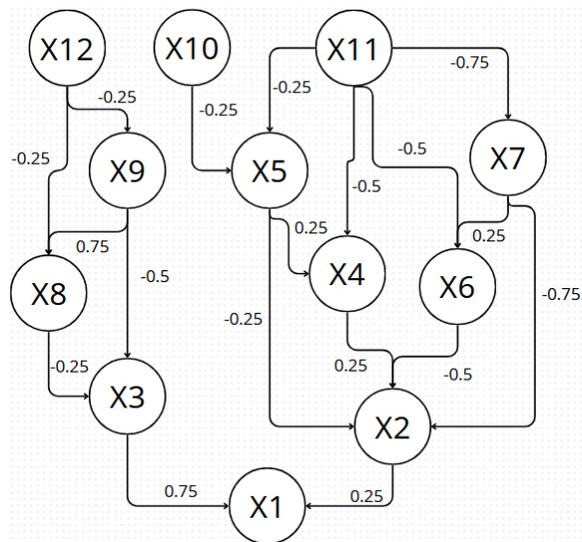


Figura 11. Mapa Cognitivo difuso.

(<https://www.researchgate.net/publication/261172745/figure/fig2/AS:270624094421000@1441533220375/Mapa-cognitivo-difuso-obtenido.png>).

Los mapas cognitivos difusos son una herramienta valiosa, interesante en el campo de la inteligencia artificial para poder modelar, representar sistemas complejos y para poder capturar de manera rápida el conocimiento humano de forma realista, sin embargo, su implementación requiere un entendimiento de la teoría detrás de la lógica difusa y sus aplicaciones, tiene muchas ventajas, pero a su vez también algunas limitantes, suele adaptarse más en el control de sistemas de recomendación y diagnósticos médicos, ya que se basan en principios que reflejan como las personas piensan y analizan la información en ocasiones donde el resultado no es del todo concreto, el problema vendría en la implementación y el cálculo de estos mapas, ya que pueden ser computacionalmente costosos, especialmente en donde se deben comparar múltiples problemas o tomar demasiadas decisiones, esto requiere recursos de hardware y tiempo de procesamiento en donde la medicina en ocasiones no tiene el tiempo suficiente para esperar la conclusión, otro inconveniente sería en la representación gráfica, ya que se requiere experiencia y comprensión del dominio o del área donde se estaría implementando.

Aplicaciones

La Lógica difusa es utilizada cuando un proceso es altamente complejo o no existe algún modelo matemático que pueda resolverlo, puede ser aplicado en sistemas como brazos articulados, los cuales tienen modelos matemáticos muy complejos o requiere de un alto grado de cálculo matemático.

Principalmente en Japón, en la industria se ha implementado el uso de la lógica difusa, la primera vez fue usado en el metro, en edificios para mantener una temperatura específica, al usar la lógica difusa se reducía el consumo de electricidad, poco después fue tomando más fuerza cuando el matemático Jaume Gil Aluja publico la teoría de la incertidumbre (Ocanto, 2016).

Lógica difusa aplicada en la agricultura

Existen diversas aplicaciones de la lógica difusa en el ámbito de la agricultura, puede ayudar en la toma de decisiones en situaciones de incertidumbre y complejidad, las más comunes son:

- Riego inteligente. Utiliza la lógica difusa para controlar y optimizar el riego dependiendo de diversos factores como la humedad del suelo, las condiciones climáticas y las necesidades hídricas de la planta, teniendo en cuenta estos valores permite ajustar la cantidad de agua que va a ser suministrada de manera más precisa evitando ser desperdiciada.
- Diagnóstico de enfermedades. La lógica difusa se aplica en el diagnóstico temprano de enfermedades y plagas en cultivos, utilizan sistemas expertos basados en reglas difusas para evaluar los síntomas observados en las plantas y determinar la presencia y gravedad de posibles enfermedades, lo que permite una respuesta rápida y precisa.
- Calidad del suelo. Se utiliza para evaluar la calidad del suelo, se considera diversos parámetros, como el pH, la textura, presencia

de nutrientes y contaminantes, para determinar el estado del suelo y tomar decisiones relacionadas con la fertilización y la corrección del pH.

Lógica difusa aplicada al riesgo financiero

Brinda apoyo en el manejo de la incertidumbre, imprecisión, análisis y gestión de riesgos asociados a las inversiones y las decisiones financieras. La lógica difusa se puede aplicar en el contexto CAMEL (Capital, Asset, Management, Earning y Liquidity) para mejorar la evaluación de riesgo y tener una perspectiva más realista del riesgo y tomar decisiones más informadas, en lugar de tratar variables de CAMEL como valores precisos y deterministas se pueden considerar variables difusas al construir una cartera de inversiones ayuda a asignar pesos a diferentes activos en funciones del riesgo percibido y las expectativas del inversionista.

Lógica difusa aplicada en la robótica

Se emplea en distintos ámbitos de la robótica para permitir a los robots tomar decisiones en entornos cambiantes y complicados, controlar el movimiento en entornos dinámicos y desconocidos. Adaptar la velocidad, aceleración, la dirección del robot, ángulos de giro y la distancia de obstáculos en función de las condiciones cambiantes del entorno y los objetivos de movimiento, garantizando una navegación segura. Determina múltiples factores como la información de sensores, estado del entorno y objetivos del robot para tomar acciones óptimas en situaciones complejas, para que la estimación sea precisa y confiable. Evalúa múltiples opciones de recorrido considerando factores como la distancia, el tiempo, la seguridad, la eficacia y las limitaciones del entorno, lo que resulta en la generación de rutas suaves, seguras y eficientes que eviten colisiones y obstáculos.

Lógica difusa aplicada en el control de tráfico vehicular

La lógica difusa en el control de tráfico es una de las áreas más destacadas de su implementación, permite modelar y controlar sistemas de tráfico complejos, teniendo en cuenta la imprecisión del entorno, algunas de las aplicaciones son:

- Control de semáforos. Se utiliza para controlar los tiempos de encendido de los semáforos en función del tráfico y las condiciones de la vía, adapta de manera dinámica los intervalos de encendido de luz verde, amarilla y roja para optimizar el flujo vehicular, disminuyendo los tiempos de espera y la congestión.
- Sistemas de peaje. Se utiliza para calcular y ajustar las tarifas de peaje en función de la congestión del tráfico, esto permite impulsar a los conductores a utilizar rutas alternativas.
- Control de velocidad y seguridad vial. Se aplica en sistemas de control de velocidad que permite ajustar límites de velocidad en función de las condiciones de la vía, la densidad del tráfico, contribuyendo a reducir accidentes y mejorar la fluidez del tráfico.

Lógica difusa aplicada en el transporte público

En el ámbito del transporte público, donde puede ayudar a mejorar la planificación y la experiencia de los usuarios, algunas de las aplicaciones son:

- Control de la congestión. Permite adaptar los horarios y las frecuencias de los servicios en tiempo real en función del nivel de congestión del tráfico y la demanda de pasajeros, optimizando la capacidad de transporte y minimizando los tiempos de espera.
- Planificación de rutas. Permite tener múltiples variables, como la demanda de pasajeros, la congestión del tráfico, las restricciones operativas y los horarios para determinar las rutas óptimas y los intervalos de tiempo entre los servicios.

- Sistemas de información al usuario. Permite generar mensajes y notificaciones en función de la ubicación y el tiempo de espera estimado, considerando la incertidumbre y las variaciones en los horarios para proporcionar información actualizada y precisa a los pasajeros.
- Gestión de demanda. Permite predecir y anticipar los patrones de demanda en función de datos como la hora del día, los días de la semana, eventos especiales y condiciones climáticas, esta información ayuda a ajustar la capacidad y los horarios de los servicios para satisfacer de manera eficiente las necesidades de los usuarios.

Lógica difusa aplicada en lenguaje y escritura

En el lenguaje y la escritura aborda la imprecisión y la ambigüedad relacionada con la comunicación humana. En el análisis del sentimiento o la actitud expresada en textos escritos como comentarios en redes sociales o reseñas de productos, evalúa la intensidad y el tono de las emociones como la felicidad, tristeza o enojo, teniendo en cuenta la naturaleza difusa de las expresiones emocionales. Se utiliza en sistemas de traducción automática para mejorar la precisión y la coherencia en la traducción de textos entre diferentes idiomas, permite manejar el error de las palabras y frases teniendo en cuenta el contexto y las diferentes interpretaciones posibles.

Se emplea en sistemas de corrección automática de errores gramaticales y ortográficos en textos escritos, evaluando la probabilidad de diferentes correcciones en función del contexto y la confusión de la frase, brindando sugerencias de corrección más acertadas y adaptadas al contexto. En la generación automática de resúmenes de texto, la lógica difusa identifica las partes relevantes o importantes de un texto y genera un resumen breve teniendo en cuenta la importancia de las diferentes secciones del texto.

Lógica difusa aplicada en sistemas de recomendación

Se emplea en sistemas de recomendación para mejorar su precisión y adaptabilidad en preferencias y gustos de los usuarios, se utilizan en diversas plataformas como sitios web de comercio electrónico, servicios de transmisión de contenido, redes sociales, para proporcionar sugerencias personalizadas a los usuarios sobre productos, películas, música o amigos.

En un sistema de recomendación de películas se puede utilizar variables difusas como género, mejor calificadas y popularidad para describir una película, estas variables pueden tener conjuntos difusos asociados que representan grados de permanencia a diferentes categorías o niveles, mediante reglas difusas basadas en el perfil del usuario y las características de las películas, el sistema puede calcular el grado de pertenencia de una película a las preferencias del usuario y realizar recomendaciones personalizadas incluso cuando no se dispone de suficiente información precisa.

Lógica difusa aplicada en la minería de datos

Se utiliza una técnica difusa para el clustering llamada Fuzzy C-Means utilizando el algoritmo C-Means, el algoritmo Fuzzy C-Means asigna un valor en cada cluster, pero el valor puede pertenecer a más de un cluster. En comparación con el algoritmo C-Means clásico, el cual hace una partición dura del conjunto de datos, mientras que el algoritmo Fuzzy C-Means realiza una partición suave, un tipo de partición suave es en la que la suma de los grados de pertenencia en todos los clusters es igual a 1, mediante la siguiente ecuación 4.

$$\sum_j \mu_{C_j}(x_i) = 1 \quad \forall x_i \in X \quad (4)$$

Se utiliza para determinar cuánto se relaciona cada punto con cada centroide, lo que resulta en un conjunto de valores de membresía difusa, los valores indican el grado de pertenencia del punto a cada clúster y representan el grado de asociación de cada punto a los diferentes clústeres, cada centroide

se recalcula tomando en cuenta todos los puntos de datos ponderados por sus grados de pertenencia, cuanto mayor sea el grado de pertenencia de un punto a un clúster, mayor será su influencia en la actualización del centroide del clúster.

Lógica difusa aplicada en la mejora del medio ambiente

En un sistema de control de emisiones industriales se puede utilizar reglas difusas para ajustar automáticamente las operaciones y minimizar la contaminación en función de variables como la calidad del aire, la eficiencia energética y las restricciones legales. En la gestión de recursos hídricos, para tomar decisiones relacionadas con la distribución y asignación de agua en situaciones de incertidumbre, en la gestión de cuencas hidrográficas, se pueden utilizar módulos difusos para estimar la demanda de agua y equilibrarla con la oferta disponible, considerando factores como la disponibilidad de lluvia, la calidad del agua y las necesidades de la población.

Aplicando la lógica difusa en la conservación de la biodiversidad se obtienen evaluaciones más completas y precisas del estado de conservación, ayuda a identificar áreas prioritarias y objetivos realistas, análisis de impacto ambiental de proyectos de desarrollo que puedan afectar la biodiversidad considerando la imprecisión en la evaluación de posibles impactos sobre las especies y los ecosistemas.

Lógica difusa aplicada en redes inalámbricas

En redes inalámbricas y específicamente en la selección de cluster heads (nodos líderes) en redes de sensores inalámbricos o redes de área extensa, la lógica difusa puede ser empleada para tomar decisiones más flexibles y adaptativas, puede ser utilizada para determinar qué nodos en la red deben actuar como cluster heads en un momento dado en lugar de tomar decisiones binarias (sí/no) sobre si un nodo debe ser un cluster head o no, la lógica difusa asigna grados de pertenencia a esta decisión como pueden ser niveles de energía del nodo, calidad de la conexión del nodo, distancia a otros

nodos en el cluster y la carga de trabajo, usualmente se emplean funciones gaussianas, triangulares o trapezoidales en estas operaciones que definen cómo los nodos pertenecen a los distintos Cluster Head.

Lógica difusa aplicada en el control de sistemas de energía

Los sistemas de energía como los sistemas de generación y distribución eléctrica están sujetos a cambios impredecibles y variabilidad en la producción de energía renovable, la lógica difusa se utiliza para controlar y regular estos sistemas de manera más adaptativa, se pueden tener en cuenta múltiples variables y condiciones, y asignar grados de activación a diferentes acciones de control en función de las condiciones del sistema.

En el control de la generación de energía eléctrica la lógica difusa puede utilizarse para ajustar automáticamente la generación de energía en función de la demanda y la disponibilidad de recursos, en el control de la distribución de energía eléctrica puede ser aplicada para optimizar el flujo de energía y minimizar las pérdidas en la red, se pueden utilizar reglas difusas para ajustar los parámetros de la red como los niveles de voltaje y la distribución de carga dependiendo de las condiciones y la demanda en tiempo real, puede ser utilizada en el control de sistemas de almacenamiento de energía, como baterías o sistemas de almacenamiento térmico, permite ajustar la carga y descarga de energía en función de las necesidades y los patrones de uso considerando la vida útil y la eficiencia del sistema de almacenamiento.

Lógica difusa aplicada en el encuadramiento de objetos y ajuste de autoenfoco en cámaras fotográficas

En cámaras fotográficas como Canon y Minolta utilizan la lógica difusa en el encuadramiento de objetos como parte de procesos de visión y análisis de imágenes, el encuadramiento de objetos determina la posición y tamaño óptimos en los cuales un objeto de interés debe ser colocado dentro del campo de visión de una cámara para una detección o reconocimiento, la lógica difusa

es implementada al medir la distancia relativa del objeto al centro del campo de visión, midiendo el tamaño aparente del objeto en relación con el tamaño de la imagen y midiendo el entorno visual alrededor del objeto, utiliza valores de que tan cerca, lejos, pequeño, grande o centrado se encuentra el objeto al centro del encuadre.

La lógica difusa en el autoenfoco es utilizada para evaluar la nitidez y el contraste en diferentes áreas de la imagen, toma en cuenta las áreas que necesitan un enfoque más preciso, la intensidad de los bordes y las texturas, en situaciones donde el objeto se mueve dentro del encuadre ayuda a mantener el enfoque en el objeto en movimiento, evaluando la velocidad, dirección de movimiento y distancia del objeto, es útil cuando las condiciones de iluminación cambian constantemente lo que afecta la calidad en la imagen del enfoque y la nitidez, otro escenario es al tener poca luz el enfoque automático puede ser más difícil la lógica difusa al considerar variables como la sensibilidad ISO, apertura del diagrama y la velocidad de obturación ver Figura 12.



Figura 12. Cámara Minolta 9xi con implementación de lógica difusa en el encuadre de objeto y autoenfoco (<https://cameragx.com/2017/09/22/minolta-9xi-a-fuzzy-logic-camera-for-the-pros/>)

Lógica difusa aplicada en defensa, como la localización de objetivos, reconstrucción de imágenes y la generación de imágenes infrarrojas

Los sistemas difusos pueden emplearse para mejorar la calidad de imágenes infrarrojas mediante el procesamiento de las señales térmicas, por ejemplo, reducir el ruido, mejorar el contraste y la claridad, y ajustar la escala de colores para visualizar mejor los detalles importantes, pueden definirse conjuntos difusos para representar el ruido como “ruido débil”, “ruido moderado” y “ruido fuerte” que representen diferentes grados de pertenencia para los valores de intensidad de píxeles en la imagen.

En la reconstrucción de imágenes, la lógica difusa se aplica en la hiperbolización difusa a través del uso de conjuntos difusos y funciones de pertenencia. La hiperbolización difusa es una técnica que se basa en principios de la lógica difusa para mejorar el contraste y la visibilidad de detalles en imágenes con contenido difuso o poco definido. Por ejemplo, pueden definirse conjuntos difusos para representar diferentes niveles de intensidad de píxeles en la imagen, como “oscuro”, “medio” y “brillante”.

Esto se realiza mediante funciones de pertenencia, que asignan valores difusos en función de la similitud del valor de intensidad del píxel con los conjuntos difusos, una vez que se han evaluado los grados de pertenencia de cada píxel, se realiza la transformación hiperbólica aplicando una función hiperbólica a los valores de intensidad de los píxeles en función de sus grados de pertenencia, esta transformación no lineal ajusta los valores de los píxeles para aumentar el contraste y mejorar la visibilidad de los detalles en la imagen ver Figura 13.

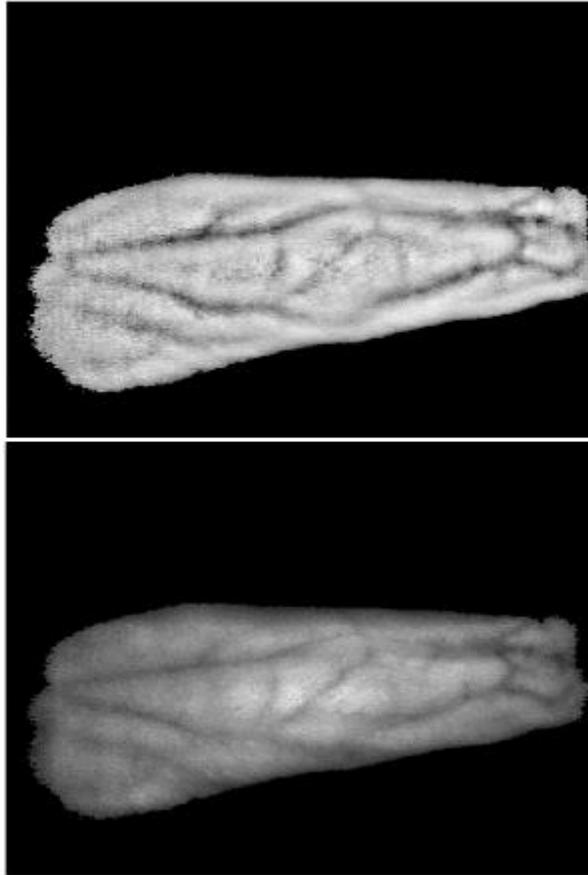


Figura 13. Imagen de antebrazo utilizando técnica de mejora de contraste.

(Arriba) Hiperbolización difusa (Abajo) Ecuación adaptable

(<https://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/view/3/2>).

Lógica difusa empleada en el tráfico de routers de internet

El regulador difuso de tráfico best-effort es una forma de controlador difuso que toma decisiones para administrar el tráfico en redes best-effort con el objetivo de lograr un equilibrio adecuado en el uso de recursos y reducir la congestión, el controlador utiliza lógica difusa para tomar decisiones basadas en reglas lingüísticas, ajusta los parámetros para evitar la congestión en la red y reducir los tiempos de espera, favorece flujos de tráfico dependiendo de las necesidades y requisitos de calidad del servicio, permite asignar y distribuir el ancho de banda disponible de manera más eficiente entre diferentes flujos de tráfico, priorizando los más importantes o sensibles a la latencia, ajusta

dinámicamente los parámetros de velocidad de transmisión y evitar el retardo o la pérdida de paquetes para mejorar el rendimiento.

Sistema de control para un sistema de nivel en un autómata programable

En el sistema de control se implementó un controlador PD difuso de tipo Mamdani se requiere que tenga un mínimo de error y mínimo de velocidad de cambio de error, el controlador es utilizado para controlar el nivel en el tanque TK102 para regular el flujo de entrada de la válvula LCV100 ver Figura 14.

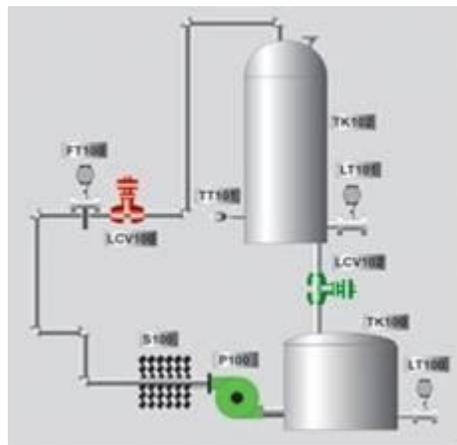


Figura 14. Diagrama P&ID del proceso a controlar.

(https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/download/14/3431/12859).

En la implementación del control difuso se definen las rutinas para las funciones de entrada, salida, base de reglas, defuzzificación y 5 funciones de pertenencia para la variable de error y para la derivada de error, la representación matemática de la función de pertenencia gaussiana se observa en la ecuación 5.

$$R_i(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

(5)

Sistema de control en medicina

En medicina oriental la mayoría de conceptos médicos son difusos, con el desarrollo del Sistema Neuro-difuso se puede detectar el envejecimiento arterial a partir de señales de distorsión de la arteria, también se pueden obtener en las instituciones médicas costos aproximados de diabéticos e hipertensivos internados, modelar y evaluar la sintomatología de los pacientes como los antecedentes médicos del paciente y resultados de pruebas de laboratorio, considerando la incertidumbre y la confusión para generar diagnósticos probables, esto ayuda a los médicos a tomar decisiones más informadas y precisas.

En la planificación de tratamientos evalúa múltiples factores como la edad del paciente, la gravedad de los síntomas, los resultados de pruebas médicas y la respuesta a tratamientos previos con el fin de sugerir terapias adecuadas y personalizadas. Monitoreo y control de enfermedades crónicas como la diabetes o la hipertensión, evaluando múltiples parámetros como los niveles de glucosa en la sangre o la presión arterial, tomando decisiones sobre ajustar la dosis o cambios en el tratamiento para mantener valores dentro de rangos óptimos. Predicción de enfermedades y pronosticar su progresión analizando factores de riesgo como son la edad, el historial médico, hábitos de vida y datos genéticos.

En el sector de la salud, los campos que han sido estudiados con lógica difusa fueron clasificados en cuatro categorías:

- Disciplinas conservadoras
- Medicina invasiva
- Disciplinas médicas definidas regionalmente
- Procesado de imágenes y señales

Sistema de conducción autónoma

Sistema de conducción autónoma en vehículos desarrollados en Australia e Inglaterra como son controles de dirección en semirremolques para

mejorar la maniobrabilidad, la desventaja será al aumentar el peso del vehículo, la pérdida de estabilidad aumenta, también en la velocidad del vehículo y la respuesta del sistema, a bajas velocidades el sistema ejecutará rápidamente ajustes angulares, pero a medida que aumenta la velocidad del vehículo los ajustes del volante se realizan más lentamente ver Figura 15.



Figura 15. Auto Lexus Ls Sedan con sensores frontales y cámara de largo alcance para detectar obstáculos (<https://www.carscoops.com/2013/01/toyota-believes-in-driver-assistance/>)

Otras aplicaciones en la conducción son:

- Toma de decisiones en situaciones de tráfico. Analiza múltiples variables, como la velocidad, la distancia al vehículo de adelante, las condiciones climáticas y las señales de tráfico, para determinar acciones adecuadas como la aceleración y el frenado o el cambio de carril.
- Control de velocidad y distancia. Ajusta la velocidad y mantiene una distancia segura con respecto a los vehículos, teniendo en cuenta factores como la visibilidad, la densidad del tráfico y las condiciones de la vía.

- Detección y respuesta a obstáculos. Evalúa la posición, la velocidad y las trayectorias de los objetos en el entorno del vehículo y tomar acciones defensivas como el frenado o el cambio de dirección para evitar colisiones o minimizar su impacto.
- Reconocimiento y clasificación de señales de tránsito. Analiza características visuales como formas, colores y patrones para identificar y clasificar correctamente las señales de tránsito, proporcionando información precisa al conductor o al sistema de asistencia.

Sistema de motores automotrices inteligentes

Sistema de uso en motores automotrices se utiliza para controlar y optimizar diversos aspectos del rendimiento del motor, como la inyección de combustible, el avance de encendido y la gestión de la transmisión. En un sistema difuso para motor automotriz, se definen variables de entrada y salida que describen las condiciones de funcionamiento del motor, estas variables pueden ser la velocidad del motor, la temperatura del refrigerante, la carga del motor, la presión del turbo, entre otras. En el siguiente ejemplo el objetivo del controlador es aumentar la velocidad inicial de 0 a 100 rpm con el menor sobre impulso y tiempo posible, el error puede estar entre -20 y 100 rpm las funciones de permanencia del sistema deben cubrir este rango como se observa en la Figura 16.

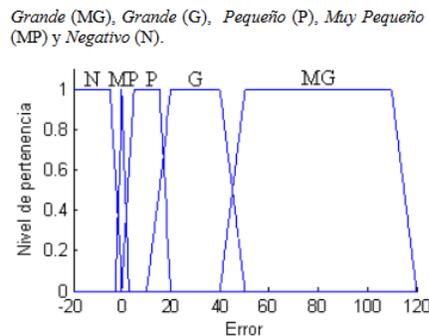


Figura 16. Funciones de permanencia para el error (www.dialnet.unirioja.es/control-de-un-motor-utilizando-logica-difusa)

Sistema de aire acondicionado

Sistema de aire acondicionado se emplea un controlador de tipo fuzzy o difuso el cual configura de forma automática el aire acondicionado partiendo de las condiciones ambientales interiores en la habitación como la temperatura y la humedad, permite ajustar parámetros de funcionamiento, como la velocidad del ventilador y la temperatura del enfriamiento de acuerdo con valores medidos y las preferencias del usuario, el medidor energético IoT realiza la medición de la corriente y el voltaje en una carga para determinar el consumo correcto de energía, adapta el funcionamiento del sistema en función de variables como la temperatura exterior, la ocupación de la habitación y los patrones de uso para minimizar el consumo de energía sin comprometer el confort del usuario, también se emplean sensores de detección de presencia tanto de reposo como en movimiento, incorpora controlador para que los usuarios puedan definir los horarios y temperaturas, evalúa y predice el estado de los componentes como filtros y compresores en función de diversos factores como el tiempo de uso y la calidad del aire, evitando la necesidad de establecer reglas precisas y difíciles, de esta manera, se puede lograr una mayor eficiencia energética y una mayor comodidad para los ocupantes del espacio.

Sistema de control de CO₂

En plantas de energía o fabricas que generan grandes emisiones de CO₂ utilizan controles difusos para generar estrategias de control para mantener las emisiones dentro de límites aceptables y minimizar el impacto ambiental, toman en cuenta variables como la producción, la demanda de energía, la eficiencia del proceso y la calidad del aire. En transporte se aplica para gestionar el flujo de tráfico y reducir las emisiones de CO₂ en áreas urbanas. En sistemas de climatización de edificios y espacios, puede utilizarse para regular el suministro de energía y mantener un ambiente confortable, ver Figura 17.

prolongada en un área en específico y comportamientos agresivos, permitiendo generar alertas de seguridad.

Optimización de parámetros en la imagen como el enfoque, la exposición y la compensación de la luz, ajustar automáticamente estos parámetros en función de las condiciones ambientales como la iluminación, el clima y la hora del día, con el fin de mejorar la calidad de las imágenes y facilitar la detección de objetos.

Sistema de inteligencia en ascensores

El controlador difuso permite que se incluyan varios objetos que serán tomados en cuenta simultáneamente al comparar las reglas establecidas, el controlador debe conocer el piso origen y el piso destino para determinar el mejor ascensor disponible y asignarlo al pasajero en función de la ubicación deseada, la demanda de tráfico, la cantidad de personas esperando y la ubicación de los ascensores en diferentes momentos, con estos valores permite minimizar el tiempo de espera, tiempo de viaje, tráfico y consumo de energía, como el modo ahorro de energía o el modo de alta demanda, teniendo en cuenta lo anterior las reglas de inferencia evalúan los objetivos y darán prioridades dependiendo la situación que se presente ver Figura 18 (Rosso,2008; Soriano, 2008).

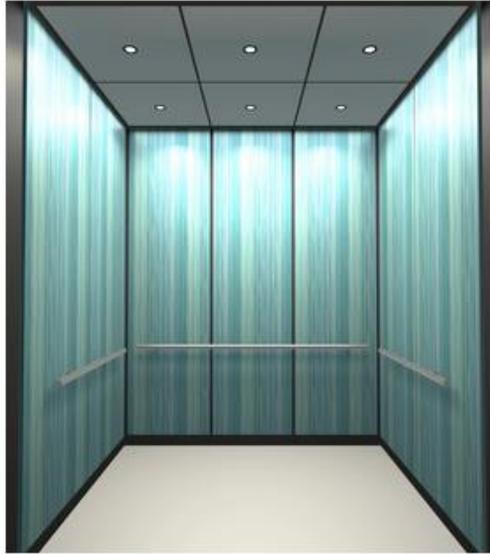


Figura 18. Ascensor Diamond-Trac de Mitsubishi Electric con lógica difusa
(<https://www.mitsubishielectric.com/news/2021/1104.html/>)

Sistema de control de vuelo y vehículo aéreo no tripulado

Es especialmente útil en situaciones donde la física del vuelo y los fenómenos aerodinámicos pueden ser difíciles de modelar de manera exacta, generalmente siguen un enfoque de controlador difuso, este tipo de controlador utiliza reglas if-then basadas en el conocimiento experto para mapear las entradas del sistema a las salidas de control correspondientes. Las entradas del sistema pueden incluir variables como la velocidad, la altitud, la inclinación, el ángulo de ataque, etc., mientras que las salidas pueden ser acciones de control, como el ajuste de los alerones, el timón, los flaps, etc. Las reglas y funciones de membresía se definen a partir del conocimiento experto en el campo de la aviación y la dinámica de vuelo.

La lógica difusa se aplica también en la gestión de calles de rodaje en aeropuertos, son las vías de circulación en un aeropuerto utilizadas por las aeronaves para moverse entre pista de despegue, aterrizaje, las puertas de embarque y otros lugares, se utilizan barreras de microondas como el ERMO 482X PRO son sistemas de seguridad que utiliza tecnología de microondas

digitales con algoritmos de lógica difusa, están diseñados para la detección de intrusos en áreas protegidas, emiten ondas electromagnéticas de alta frecuencia y detectan cambios en el patrón de las ondas cuando un objeto o persona cruza el campo de detección, equipados con antenas de gran intensidad con alcances de 500 metros que viajan a frecuencias de 24 GHz, esto ayuda a la detección de presencia en tiempo real de aviones y/o vehículos en las pistas o el área ver Figura 19.



Figura 19. ERMO 482X PRO dispositivos de barreras de microondas con algoritmo de lógica difusa (<https://www.sicuralia.com/barreras-de-microondas-cias-serie-ermo-482x-pro/>)

Sistema de iluminación automática

El controlador difuso incluye un microcontrolador Arduino, sensores de calor, sensores de presencia, relés, persianas y focos. El relé en su interior está compuesto por electroimanes, esto permite abrir o cerrar el circuito eléctrico, cada uno de los relés tienen la tarea de abrir o cerrar la persiana, encender o apagar los focos, mientras que los sensores proporcionan al controlador la distancia para detener el motor de la persiana dependiendo del resultado que se quiera obtener (Negrete,2015).

La intensidad de iluminación en función de las condiciones ambientales y las necesidades del usuario son medidas con:

- Control de luminosidad permite ajustar la intensidad de la iluminación de acuerdo con el nivel de luz ambiental y las preferencias de los usuarios, asegurando un nivel óptimo de iluminación.
- Adaptación a diferentes condiciones ambientales como la hora del día, la estación del año y la calidad de la luz natural, ajusta automáticamente la temperatura de color, la distribución de la luz y la intensidad de acuerdo con estas condiciones cambiantes, creando un ambiente óptimo en cada situación.
- Detección de presencia de personas en un espacio, evaluando la información de los sensores de movimiento y ajustando la iluminación en función de la detección de personas, proporcionando luz adecuada solo cuando es necesario, lo que ayuda a ahorrar energía.
- Gestión energética optimiza el consumo de energía al ajustar la intensidad de la iluminación en función de factores como la ocupación del espacio, los patrones de uso y la iluminación natural disponible.
- Personalización de la iluminación, permite ajustar la temperatura de color, la intensidad y la distribución de la luz de acuerdo con las preferencias y las necesidades de cada persona, mejorando el confort visual y la satisfacción del usuario

Sistema de estacionamiento automático

Se utiliza sistemas de estacionamiento automático para ayudar a los vehículos a realizar maniobras de estacionamiento de manera segura y eficiente. Entre sus aplicaciones de la lógica difusa existen, la detección de espacios de estacionamiento disponibles en su entorno, evaluando características como el tamaño, la forma y la disponibilidad de los espacios para determinar si son adecuados para ocupar el lugar destinado. Control de frenado

y cambio de marchas determina el momento adecuado para frenar, cambiar la marcha y mantener la estabilidad del vehículo al entrar o salir del estacionamiento. Adaptación a diferentes condiciones evaluando la posición y alineación del vehículo, también diversas características como son el tamaño de espacio y la presencia de obstáculos permiten ajustar los parámetros y las estrategias de estacionamiento, ver Figura 20.



Figura 20. Auto BMW Serie 1 con sistemas de asistencia de aparcamiento autónomo (<https://www.motorpasion.com/tecnologia/todos-los-coches-que-tienen-asistencia-al-aparcamiento-estos-son-los-modelos-mas-baratos-de-cada-marca/>)

Control de la dirección y la aceleración, en este sistema se utilizan cámaras delanteras y traseras, se tomarán fotografías, analizarán la distancia y la posición entre un automóvil y otro manteniendo un movimiento suave y evitando colisiones, se obtendrán los resultados que serán enviados al controlador para calcular la acción que tomara el automóvil el controlador contiene una red neuronal compuesta por 72 neuronas entrenadas para localizar los alerones delanteros y traseros de los automóviles (Acosta,2003).

Sistema difuso en control de calidad

Se realiza mediante la identificación de variables relevantes que afectan la calidad del producto o proceso, estas variables pueden incluir parámetros de rendimiento, características físicas o químicas, datos de sensores, entre otros.

Para cada variable de entrada, define los conjuntos difusos que representan los diferentes niveles o categorías de calidad, define las reglas difusas que relacionan las variables de entrada con las categorías de calidad, estas reglas se basan en conocimientos expertos y experiencia.

Para cada variable de entrada se asigna un grado de membresía a cada conjunto difuso en función de la similitud entre el valor de la variable y los límites del conjunto difuso, aplica las reglas difusas para determinar la calidad difusa del producto o proceso, utiliza operaciones de inferencia difusa como la composición y la agregación para combinar las reglas difusas y obtener una medida de calidad difusa.

La medida de calidad difusa es convertida en un valor numérico o una categoría de calidad definida, utiliza técnicas de defuzzificación como el centroide o el máximo grado de membresía para obtener una salida clara y comprensible. Basado en el valor numérico o la categoría de calidad definida toma decisiones relacionadas con la adaptación, rechazo o la corrección del producto o proceso, estas decisiones pueden estar basadas en criterios predefinidos de calidad o estándares establecidos.

Al finalizar el proceso hace una retroalimentación de los resultados del control de calidad para mejorar las reglas y conjuntos difusos en el sistema, esto permite una adaptación continua y una mejora en la capacidad del sistema para controlar la calidad de manera efectiva.

Sistema de control difuso en hornos y estufas

El control difuso multivariable utiliza la lógica difusa para ajustar los parámetros de cocción como la temperatura y el tiempo. En la actualidad, especialistas (conocidos como estuferos) son responsables de operar las máquinas utilizadas en el proceso de secado del tabaco. Siguen una serie de instrucciones que no pueden ser representadas de manera precisa mediante la lógica tradicional, la manipulación de la válvula de gas es otra variable difusa, ya que el experto en el campo determina el grado de apertura o cierre utilizando

términos lingüísticos imprecisos. Las variables relevantes del proceso, como la temperatura, la humedad relativa, el flujo de aire y el color de las hojas, se convierten en conjuntos difusos utilizando funciones de membresía adecuadas, los métodos como el Centroide y el Bisector que fueron utilizados, estos en sistemas de lógica difusa pueden requerir una mayor capacidad de cómputo en comparación con otros métodos más simples, esto se debe a que el cálculo del Centroide y el Bisector implica operaciones matemáticas más complejas, como la integración y el análisis de áreas bajo las curvas de membresía.

El costo computacional asociado a estos métodos se traduce en un tiempo de respuesta mayor del sistema fuzzy, lo que puede afectar su rendimiento en aplicaciones en tiempo real o en sistemas con requisitos de respuesta rápida ver Figura 21.

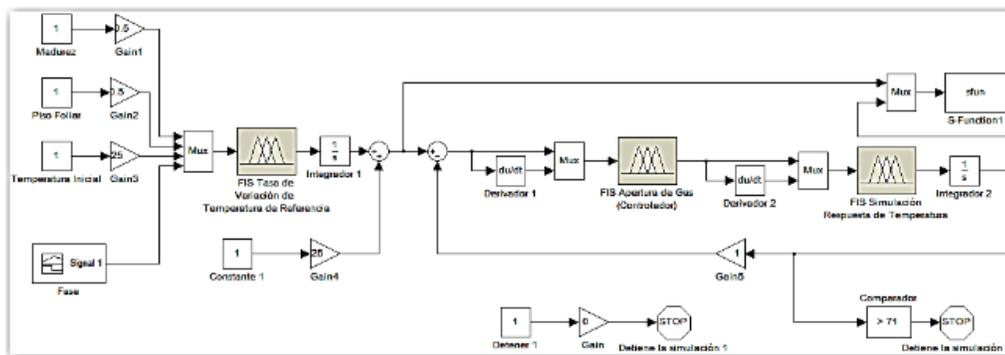


Figura 21. Modelado en MATLAB de esquema para secado de hojas de tabaco (<https://fcf.unse.edu.ar/archivos/publicaciones/codinoa-2013/trabajos/computacion/14-azar.pdf>)

Sistema de control difuso para el monitoreo de pH

El modelado de este sistema difuso está compuesto por librerías de programación de tipo fuzzy, sensores de pH y CE, plataformas Arduino y una interfaz gráfica para la comunicación con el usuario. La lógica difusa se puede utilizar para controlar y ajustar el pH del suelo de manera más precisa y adaptativa, en lugar de aplicar un enfoque de control tradicional basado en reglas rígidas, la lógica difusa permite considerar múltiples factores y

condiciones en el suelo para tomar decisiones más informadas y eficientes en la corrección del pH.

Se toman mediciones del pH y CE del suelo utilizando el sensor para obtener datos en tiempo real, se definen los conjuntos difusos que representan diferentes categorías de pH, como “muy ácido”, “ácido”, “neutro”, “alcalino” y “muy alcalino”, y “baja”, “media” y “alta” para la CE. Se asigna una función de membresía a cada conjunto difuso para describir la probabilidad de pertenencia del pH y la CE medido a cada categoría. Se definen reglas de control basadas en el conocimiento experto y las mejores prácticas agrícolas, estas reglas relacionan las mediciones del pH, la CE y otras variables relevantes (por ejemplo, tipo de cultivo, condiciones climáticas) con las acciones de corrección del pH. Se utiliza la inferencia difusa para combinar las mediciones del pH, la CE y las reglas de control y obtener un resultado difuso que indica las acciones recomendadas para corregir ambos parámetros del suelo.

Sistema de control difuso en la producción de *Candida utilis*

Se desarrolló un sistema automatizado de control utilizando lógica difusa, el software Eagle, microcode, Visual Basic y MATLAB para medir el oxígeno disuelto, temperatura y pH, para la producción de biomasa de *Candida utilis*, una levadura ampliamente utilizada en la industria alimentaria como fuente de proteínas y otros nutrientes, el control difuso del nivel de oxígeno disuelto, pH y temperatura demostró ser superior al control proporcional, se caracterizó por mantener el valor muy próximo al punto de referencia deseado y una menor variabilidad en los resultados.

Desde la interfaz Visual Basic, se llevó a cabo el control mediante la lectura de la temperatura, pH y nivel de oxígeno disuelto (OD), ayudo en la activación de diferentes componentes del sistema: las resistencias según la temperatura, las válvulas ácido/base de acuerdo al valor del pH, y la válvula de aire según lo indicado por el oxímetro ver Figura 22.

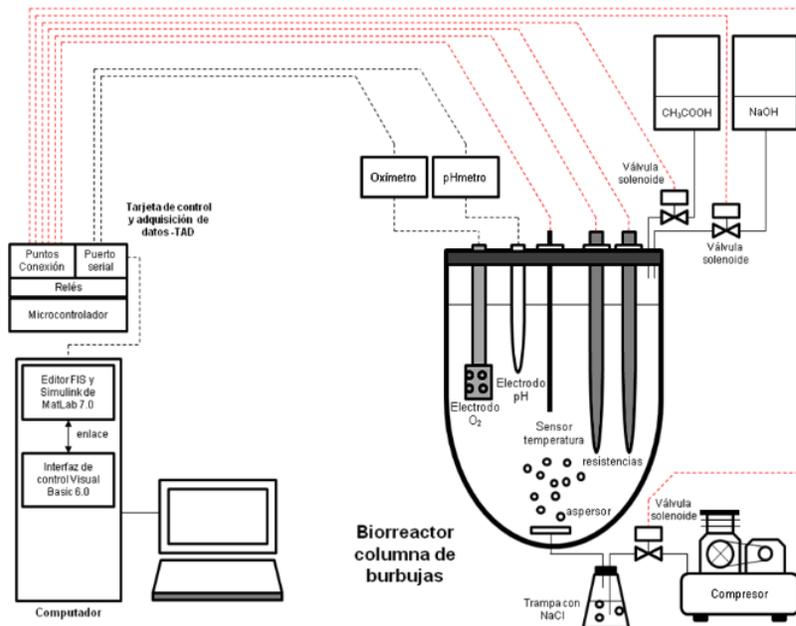


Figura 22. Controlador difuso para producción de *Candida utilis*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3986202>

Sistema de control difuso en la producción de cerveza artesanal

La lógica difusa se implementa en el control del proceso de producción de cerveza artesanal en las etapas de maceración y cocción de la malta, estos procesos son puntos clave en la fabricación de cerveza, ya que influyen significativamente en la calidad y características del producto final, durante la maceración, se mezcla la malta molida con agua caliente para activar las enzimas que convierten el almidón en azúcares fermentables.

La temperatura y el tiempo de maceración son factores críticos que afectan la eficiencia de esta etapa, el control difuso ayuda ajustar la temperatura y el tiempo de maceración en función de las características de la malta, la cantidad de agua, control de bombas, calefactores y electroválvulas, la lógica difusa permite examinar las variaciones en la concentración de enzimas, la temperatura ambiente y otras condiciones cambiantes para optimizar el proceso ver Figura 23.

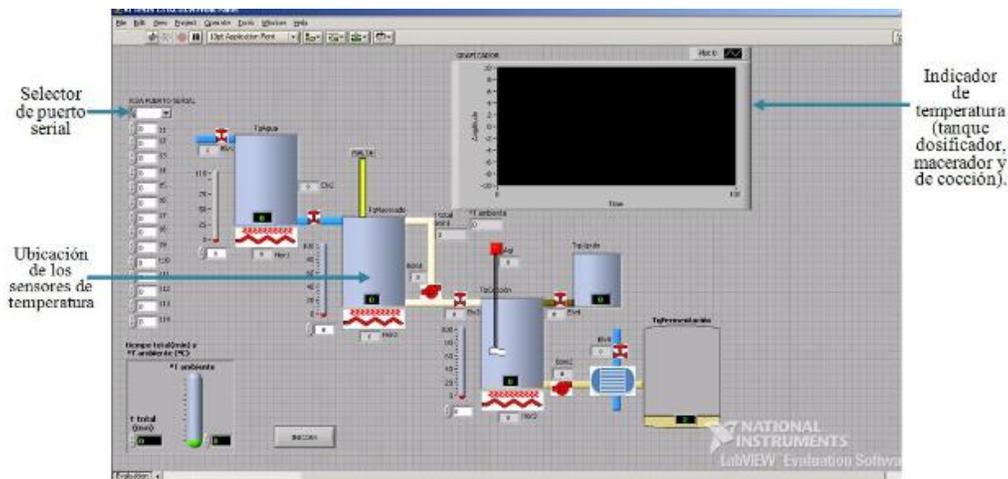


Figura 23. Sistema de maceración y cocción para producción de cerveza artesanal controlado por lógica difusa (<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=357633695003>)

Sistema de control difuso en refrigeradores

En los refrigeradores el controlador difuso está compuesto por un microcontrolador, once termopares tipo j y un termopar para medir la temperatura ambiental, compresor con control de lógica difusa y frecuencia máxima para ON y OFF, advertencias y notificaciones. El microcontrolador fue programado con lógica difusa, estableciendo tres reglas de temperatura, caliente, set point y frío. Considerando variables como la temperatura exterior, la carga de alimentos y las preferencias del usuario, el sistema difuso ajusta la temperatura de enfriamiento para mantenerla en un rango óptimo.

En el control de humedad se consideran variables como la humedad externa, los alimentos almacenados y las condiciones ambientales, el sistema difuso puede regular la humedad en el interior del refrigerador para evitar la deshidratación o la acumulación excesiva de humedad, esto para preservar la frescura y calidad de los alimentos.

Para el compresor de igual manera se programaron tres reglas de velocidad, máxima, set point, baja. Basándose en factores como la carga de alimentos, la frecuencia de apertura de la puerta y el consumo de energía, el sistema difuso puede ajustar el funcionamiento del compresor, si las reglas

indican caliente la velocidad del compresor estará en máxima, si indica set point estará en frío y si indica frío el compresor permanecerá apagado para minimizar el consumo de energía sin comprometer la calidad de refrigeración.

Las advertencias de puerta abierta se emplean para detectar y notificar la apertura prolongada de la puerta del refrigerador, al considerar la duración y la frecuencia de la apertura de la puerta, el sistema difuso puede generar alertas o activar alarmas para recordar al usuario que cierre la puerta y así evitar el aumento innecesario de la temperatura interna.

Sistema de control difuso en lavadoras y secadoras de ropa

En secadoras de ropa “Whirlpool” y “LG”, se utilizó un controlador programado con lógica difusa, primero se selecciona el tipo de ciclo de lavado y secado, el controlador monitorea el nivel de humedad que genera una carga de ropa, el peso y el tipo de tejido. En lugar de seguir reglas rígidas predefinidas, la lógica difusa permite que la lavadora realice ajustes graduales y tome decisiones basadas en la información disponible, determinaran la velocidad de rotación, la cantidad de agua necesaria, el tiempo de lavado, secado y las veces que será monitoreada la humedad de la carga hasta lograr el objetivo deseado, es importante tener en cuenta que la implementación exacta de la lógica difusa en las lavadoras puede variar según el fabricante y el modelo, algunas lavadoras pueden utilizar técnicas de inteligencia artificial más avanzadas, como redes neuronales, junto con la lógica difusa para mejorar aún más su rendimiento ver Figura 24.



Figura 24. Lavadora LG con controlador difuso para escoger la cantidad de agua y el tiempo de lavado (<http://www.lg.com/in/washing-machines/lg-FH4G6TDNL42>)

Algunos ejemplos de aplicaciones de sistemas difusos:

- Sistema de foco automático en cámaras fotográficas
- Mejora del medio ambiente
- Emuladores de comportamiento del ser humano
- Análisis de riesgos financieros
- Modelado de sistemas complejos
- Optimización de recursos
- Diagnóstico y detección de fallas
- Control de procesos
- Electrodomésticos (Lavadora, Refrigerador, Routers)
- Campo aeroespacial para el control de altitud de naves espaciales y satélites.
- Controla el proceso de pH, secado, destilación química en la industria química.
- Sistemas de defensa naval.

Esta tecnología ha demostrado ser extremadamente útil en una variedad de campos y situaciones, el consumo de energía en edificios, sistemas de transporte, redes eléctricas, se ha beneficiado por la gestión de energía con lógica difusa, permite que las nuevas tecnologías se alineen mejor con el modo en que los humanos perciben y toman decisiones en situaciones cotidianas, en sistemas de recomendación y asistentes virtuales, como el pensar de cada persona es diferente al implementar la lógica difusa, la experiencia del usuario puede mejorar, ya que es adaptable a todo tipo de edades, en el campo de la medicina ha mejorado en el diagnóstico de enfermedades, malformaciones o predicción de ciertos síntomas a largo plazo esto puede ayudar a los médicos a tomar decisiones informadas y a diseñar tratamientos personalizados, en el ámbito de la ciberseguridad un beneficio es que tiene la posibilidad de representar el modo en que los usuarios y las amenazas se comportan, es posible detectar actividades potencialmente sospechosas y tomar decisiones instantáneas sobre cómo abordar posibles riesgos.

CONCLUSIONES

La lógica difusa es una tecnología que se clasifica dentro de la inteligencia artificial; como se ha visto, es una tecnología cuyos valores se evalúan en un rango de 0 a 1, a diferencia de la lógica clásica, cuyos valores son 1 o 0.

La lógica sirve básicamente para construir sistemas electrónicos, como en lavadoras y secadoras se utiliza para ajustar automáticamente los parámetros de funcionamiento (como temperatura, velocidad, duración, peso, ciclos de lavado, etc.) en función de las condiciones que el usuario requiera como el tipo de tejido y suciedad, en agricultura se utiliza para ajustar los sistemas de riego en función de factores como la humedad del suelo, la temperatura y las necesidades de la planta, la elección de cultivos adecuados para una región, generando recomendaciones basadas en datos sobre el clima, tipo y pH del suelo. En medicina, en el área de radiología se utiliza la lógica difusa para analizar y diagnosticar imágenes médicas, evaluando la presencia y la extensión de anomalías en la apariencia de los tejidos, en la predicción de resultados médicos, como la respuesta a un tratamiento o medicación, es implementado en el control de bombas de infusión y ventiladores, en implementado en la evaluación de riesgo de desarrollar ciertas enfermedades o a predecir el progreso de una enfermedad.

La lógica difusa también sirve para analizar cuestiones gubernamentales o aplicados a la sociedad utilizando mapas cognitivos difusos, utilizan lógica difusa para representar la incertidumbre y la imprecisión en la información, a diferencia de los mapas binarios, los mapas cognitivos difusos utilizan valores difusos para expresar grados de activación y relaciones flexibles entre conceptos, esto los hace adaptables a cambios y útiles para tomar decisiones.

Son aplicables en sistemas expertos, sistemas en tiempo real y sistemas de apoyo a la toma de decisiones, lo que es especialmente útil en áreas como la automatización, la robótica y el control de proceso, puede proporcionar resultados que se asemejan más a la forma en que las personas abordan

problemas complejos, especialmente cuando se trata de escenarios donde la información es subjetiva, cualitativa o incierta, lo que permite mejorar la eficiencia y la precisión de las operaciones sin tener que rediseñar por completo los sistemas.

Muchos sistemas en el mundo real tienen relaciones no lineales entre las variables, es importante conocer diferentes tecnologías que forman parte de la inteligencia artificial, ya que es la nueva era en la que estaremos inmersos; si se conoce más los fundamentos teóricos de esta tecnología estaremos dispuestos a aplicarla y hacer innovaciones. Es así que la lógica difusa es una técnica que ayuda a resolver problemas de diferentes tipos, presentando soluciones que incluyen el lenguaje humano, pues sus valores se conjuntan en grados de pertenencia a un conjunto que contiene valores de membresía entre un 0 a un 1, esos valores son vagos en pertenencia, pero precisamente por eso es que la lógica difusa permite ahorrar recursos en su implementación, pues depende del grado de un valor, que actúa para la solución.

REFERENCIAS DE CONSULTA

- Acosta, N., Aciti, C., Berlusconi, M., Autoguiado, V., Difusa, L., & Control, E. (s/f). Estacionamiento Automático de un Vehículo Autoguiado usando Lógica Difusa. Edu.ar. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/22784/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Aguiló I., Suñer J., Torrens J., (2010), "A characterization of residual implications derived from left-continuous uninorms," *Information Sciences*, 180, 3992–4005.
- Albusac, J., Castro-Schez, J. J., Vallejo, D., & Jimenez-Linares, L. (s/f). APRENDIZAJE DE REGLAS DIFUSAS PARA LA CLASIFICACION DE COMPORTAMIENTOS EN UN SISTEMA DE VIDEOVIGILANCIA COGNITIVA. Uclm.es. Recuperado el 27 de abril de 2023, de <http://www.esi.uclm.es/www/jalbusac/doc/estylf08.pdf>
- Arroyave, M. R. M., Vázquez, M. L., & Estrada, A. F. (2016). Modelado y Análisis de Indicadores de Ciencia y Tecnología mediante Mapas Cognitivos Difusos. *Ciencias de la Información*, 47(1), 17-24. <https://www.redalyc.org/pdf/1814/181445720002.pdf>
- Askari, S. & Montazerin, N. (2015). A high-order multi-variable fuzzy time series forecasting algorithm based on fuzzy clustering. *Expert Systems with Applications*, 42(4):2121 - 2135.
- Autores, C. E., De Vito, E. L., & Zadeh, L. A. (s/f). Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. Ramr.org. Recuperado el 24 de abril de 2023, de https://www.ramr.org/articulos/volumen_6_numero_3/articulo_especial/articulo_especial_introduccion_al_razonamiento_aproximado_logica_difusa.pdf
- Azar, M. A., Martínez, S. L., & Manero, J. M. (s/f). Prototipo de Sistema de Control Fuzzy Aplicado al Proceso de Curado de Tabaco Virginia. Edu.ar. Recuperado el 11 de julio de 2023, de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/27322/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Basados, S., Neuronales, R., Patiño, S., Rosas, N., Mario, O., & Varela, D. T. (s/f). Controlador Difuso para un Sistema de Riego Automático. Unam.mx. Recuperado el 20 de abril de 2023, de http://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/wp-content/uploads/2021/06/Controlador_Difuso_para_un_Sistema_de_Riego_Autom_tico_compressed.pdf
- Bases de datos difusas. (s/f). Koala-soft.com. Recuperado el 27 de abril de 2023, de <http://www.koala-soft.com/bases-de-datos-difusas>
- Bortoni-Anzures, L., Gómez-Meléndez, D., Herrera-Ruíz, G., & Martínez-Madrid, M.. (2013). Fuzzy Controller for Automatic Steering in Heavy Vehicle Semi-Trailers. Ingeniería, investigación y tecnología, 14(1), 01-09. Recuperado em 27 de abril de 2023, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432013000100001&lng=pt&tlng=.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432013000100001&lng=pt&tlng=)
- Botella, L. (2007). Usos potenciales de la lógica borrosa. aplicación de mapas cognitivos borrosos (mcbs) para el manejo de los casos clínicos en psicoterapia. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281921793001>
- Bouchet, A., Pastore, J., & Ballarin, V. (2007). Segmentation of Medical Images using Fuzzy Mathematical Morphology. Journal of Computer Science and Technology, 7(03),256-262. ISSN: 1666-6046. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=638067339006>
- Bravo, Y., Atiencia, N., & Ramírez, V. (2014). Control de Tráfico Vehicular usando un Sistema Neuro-difuso tipo ANFIS. Revista Politécnica, 33(1). Recuperado a partir de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/88
- Cabello San Martín, F. (2011). Sistema de Control Difuso para Velocidad y Dirección en Vehículo de Escala Real. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104283>
- Camargo, S., María, A., Hurtado, M., & Medina Hurtado, S. (s/f). DESARROLLO DE UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO PARA LA EVALUACIÓN DE CREDITO POR PARTE DE UNA EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS.

Redalyc.org. Recuperado el 21 de abril de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49614303.pdf>

Caparrini, F. S. (s. f.). Introducción a la Lógica Difusa - Fernando Sancho Caparrini. <http://www.cs.us.es/%7Efsancho/?e=97>

Cardona, J. E., Muñoz, P. A., & López, J. A. (2007). Control De Un Motor Utilizando Lógica Difusa Con Reglas Sintonizadas Por Algoritmos Genéticos. *Scientia et Technica*, 5(37), 121–125. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4784024>

Ceballos, J. B., & Vivas, Ó. A. (2019). Mathematical model of controllers for progressive cavity pumps. *Revista UIS Ingenierías*, 18(2),17-29. ISSN: 1657-4583. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553762533003>

Chen, S.-M. & Chen, S. (2015). Fuzzy forecasting based on two-factors second-order fuzzy-trend logical relationship groups and the probabilities of trends of fuzzy logical relationships. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 45(3):391 - 403.

Cheng, C.-H. & Chen, C.-H. (2018). Fuzzy time series model based on weighted association rule for _nancial market forecasting. *Expert Systems*, 35(4): e12271. e12271 EXSY-Jul-17-163.R1.

Clase No. 4: Modus Ponendo Ponens - lógicasimbólica. (s. f.). <https://sites.google.com/a/lasallehn.net/logicasimbolica/trabajo-en-clase/claseno4>

Colaboradores de Wikipedia. (2023, 20 febrero). Lógica difusa. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%B3gica_difusa

Conde Perez dos Santos, E., Peres Krykhtine, F. L., Nunes Cosenza, C. A., & Gonçalves Neto, A. C. (2017). FUZZY LOGIC APPLICATION FOR EXTRUDERS REPLACEMENT PROBLEM. *Independent Journal of Management & Production*, 8(1),159-169. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449549996012>

Cruz Martínez, Alejandro, & Alarcón Armenteros, Adelfa D.. (2017). La lógica difusa en la modelización del riesgo operacional. Una solución desde la inteligencia artificial en la banca cubana. *Cofin Habana*, 11(2), 122-135. Recuperado en 29

de junio de 2023, de
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612017000200009&lng=es&tlng=es.

Curia, L. (2011, 1 diciembre). Estrategias de decisión en sistemas dinámicos: aplicando mapas cognitivos difusos aplicación a un ejemplo socio - económico.
<https://www.scielo.br/j/jistm/a/zYvMZmm93FRgvwxvr5kZFxw/?lang=es>

De computación llamada, L. S. N.-D. F. P. de U. N. T. (s/f). II. SISTEMAS NEURO-DIFUSOS. Edu.pe. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de
https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/chahuara_qj/cap2.pdf

Delgado Rocha, J. E. (2019). Desarrollo de un controlador inteligente para aires acondicionados utilizando lógica difusa y comunicación infrarroja IR.

Díaz Córdova, J. F., Coba Molina, E., & Navarrete, P. (2017). Lógica difusa y el riesgo financiero. Una propuesta de clasificación de riesgo financiero al sector cooperativo. *Contaduría y administración*, 62(5), 1670–1686.
<https://doi.org/10.1016/j.cya.2017.09.001>

Duarte V., O. G. (2000). Aplicaciones de la lógica difusa. *Ingeniería e Investigación*, (45), 5–12. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n45.21308>

Grimalt, M. M., Aguilera, D. A., & Sastre, J. T. (2017). Modus Ponens generalizado para (U, N)-implicaciones. XVIII Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial (CAEPIA 2018) 23-26 de octubre de 2018 Granada, España: Avances en Inteligencia Artificial, 2018, ISBN 978-84-09-05643-9, págs. 210-215, 210-215.

Escobar Díaz, Andrés, Hernández, Cesar, & Arguello Fajardo, Juan Pablo. (2011). Control difuso adaptativo aplicado a un sistema de fermentación de flujo continuo de alcohol. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (58), 105-113. Retrieved April 23, 2023, from
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302011000200011&lng=en&tlng=es.

Flores Gallegos Eduardo, V. R. J. y. G. D. N. (04-diciembre-2017). Modelado de sistema difuso para monitoreo de pH en cultivos de plantas ornamentales.

Simulación y *Laboratorio*, 4, 8-18.

https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Simulacion_y_Laboratorio/vol4num13/Revista_de_Simulacion_y_Laboratorio_V4_N13_2.pdf

Fuzzy Logic - Approximate Reasoning. (s/f). Tutorialspoint.com. Recuperado el 18 de mayo de 2023, de https://www.tutorialspoint.com/fuzzy_logic/fuzzy_logic_approximate_reasoning.htm

Fuzzy reasoning. (s/f). Researchhubs.com. Recuperado el 23 de abril de 2023, de <https://researchhubs.com/post/engineering/fuzzy-system/fuzzy-reasoning.html>

¿Qué es la lógica difusa en una lavadora? (s/f). Washerhouse.com. Recuperado el 14 de junio de 2023, de <https://washerhouse.com/es/fuzzy-logic/>

Gamba Ortiz, I. S., Rodríguez Valderrama, D. A., & Belman Flores, J. M. (2018). EVALUACIÓN DE HÁBITOS DE USO EN REFRIGERACIÓN DOMÉSTICA. JÓVENES EN LA CIENCIA, 4(1), 2839–2844. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2751>

Grimalt, M. M. (2018). Modus Ponens generalizado para (U, N)-implicaciones. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7373784>

Hernández-Hernández, M. (2022). The Technological Adaptation of SMES Through Fuzzy Cognitive Maps. *Studies in Systems, Decision and Control*, 283-304. https://doi.org/10.1007/978-3-031-00856-6_13

Khokhar, S. U. D., Peng, Q., Asif, A., Noor, M. Y., & Inam, A. (2020). A Simple Tuning Algorithm of Augmented Fuzzy Membership Functions. *IEEE Access*, 8, 35805-35814. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2974533>

Kumar, A., & Kaur, J. (2013). General Form of Linear Programming Problems with Fuzzy Parameters. *Journal of Applied Research and Technology*, 11(5), 629-635. ISSN: 1665-6423. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47429697001>

- L. E. Hernández Gómez, K. A. Hernández Santiago, Á. Anzueto Ríos (Ed.). (28-Septiembre-2016). Sistema de procesamiento de imágenes basado en lógica difusa para la detección vascular. <https://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/view/3/2>
- Lemus, C. G. (2012). Metodología para la implementación de controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en PLC s7-300. Tecnura. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2011.2.a04>
- López-Cruz, Irineo L., & Hernández-Larragoiti, Leopoldo. (2010). Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos tipo cenital y capilla en el centro de México. *Agrociencia*, 44(7), 791-805. Recuperado en 27 de abril de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000700006&lng=es&tIng=es.
- Luján Corro, M., & Vásquez Villalobos, V. (2010). Control automático con lógica difusa de la producción de cerveza artesanal en las etapas de maceración y cocción. *Scientia Agropecuaria*, 1(2), 125-137.
- López, D. J., García, D., Davico, L., Verrastro, S., Verrastro, I. C., Alicia, D., & Trigubó, B. (s/f). Controlador Difuso Multivariable del Perfil de Temperatura de un Horno. *Edu.ar*. Recuperado el 11 de julio de 2023, de <https://www.frba.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2021/02/IAR03.pdf>
- M.M.Gupta. (1988) ."Cognition, Perception and Uncertainty", *Fuzzy Logic in Knowledge-Based Systems, Decision and Control* (M.M.Gupta, T.Yamakawa, eds.), North Holland, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands.
- Marinelli, M., Acosta, N., Toloza, J., & Kornuta, C. (2017). Fuzzy Control of a Germination Chamber. *Journal of Computer Science and Technology*, 17(01),74-78. ISSN: 1666-6046. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=638067255009>

- Marroquín, W. G., & Sotelo, J. a. L. (2011). Control difuso para un sistema de nivel implementado en un autómata programable. *Informador Técnico*, 75. <https://doi.org/10.23850/22565035.14>
- Mateo, J. A., Macià, H., Ruiz, M. C., Pardo, J. J., & Ortiz, A. M. (2013). Formal study of a novel network role-based routing intelligent algorithm. *Procedia Computer Science*, 18, 2525–2528. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.433>
- Miñano, H. A., & Villalobos, V. V. (2012). Control difuso del oxígeno disuelto, pH y temperatura de un biorreactor columna de burbujas en la producción de biomasa de *Candida utilis*. *Scientia agropecuaria*, 3(2), 139–148. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3986202>
- Monteiro Klen , A., & Sabino Lana , M. (2014). Fuzzy Algorithm of discontinuity sets. *Rem: Revista Escola de Minas*, 67(4),439-445. ISSN: 0370-4467. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56432577012>
- Negrete, J. F., Albusac, J. A., & Curso, J. (s/f). CONTROL DIFUSO E INTELIGENTE DE LA ILUMINACIÓN DE UNA VIVIENDA. *Uclm.es*. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de <http://www.esi.uclm.es/www/jalbusac/doc/jon15.pdf>
- Pérez, M., Javier, G., & Castellanos, G. (2022, junio). Lógica difusa y redes in Lámblicas. *Unam.mx*. https://www.ties.unam.mx/num05/pdf/art_03.pdf
- Pérez-Silva, J. L., Garcés-Madrugal, A., Miranda-Vitela, A., & Lara-Rosano, F. (2008). DYNAMIC FUZZY LOGIC FUNCTOR. *Journal of Applied Research and Technology*, 6(2),84-94. ISSN: 1665-6423. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47413104002>
- Pulido, M. E., Hernández, A. F. V., & Robledo, J. C. (2013). Sistema de inferencia difuso para la inflación en Colombia. *Ensayos sobre Política Económica*, 31(71), 73-84. [https://doi.org/10.1016/s0120-4483\(13\)70012-5](https://doi.org/10.1016/s0120-4483(13)70012-5)
- Rangel, D., Rivera, A. L., Alaníz, P., Castañeda, R., & Castaño, V. (2010). Intelligent Positioning Fuzzy Servomechanism Under PWM Nonlinear Loads. *Journal of Applied Research and Technology*, 8(1),87-100. ISSN: 1665-6423. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47412950006>

- Reseña histórica Lógica Difusa. (2016, 1 agosto). Lcdo. José Ocanto. <https://joseocanto.wordpress.com/resena-historica-del-metodo-difusa/>
- Romero, L. A. (s/f). Diseño de Sistemas Borrosos (Nebulosos). Usal.es. Recuperado el 19 de mayo de 2023, de http://avellano.fis.usal.es/~lalonso/Cursos/SistemasInteligentes/LectureNotes/lo_gborr2_cetsi.pdf
- Rosso Mateus, A. E., & Soriano, J. J. (2008). SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE PARA UN GRUPO DE ELEVADORES. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 18(2).
- Sabadell, M. Á. (2022, diciembre 29). Así piensan los ordenadores: la lógica difusa. Muy Interesante. <https://www.muyinteresante.es/ciencia/58119.html>
- Serrano-M., A., Amorocho-G., M. T., Aldana-P., A., & Lovera-B., H. (1997). A las puertas del siglo XXI: Lógica difusa - una tecnología que está revolucionando el mundo. *Ingeniería Y Universidad*, 1(1), 30–37. Retrieved from <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/34102>
- Serna, M. D. A., Urán, C. M. U., & Builes, A. C. G. (2012). FUZZY INFERENCE APPLIED TO CONCURRENT ENGINEERING FOR MANUFACTURING PRODUCT DESIGN UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(21), 127-138. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v11n21/v11n21a11.pdf>
- Mata-García, M. G. (s/f). SISTEMA DE RIEGO INTELIGENTE BORROSO. Ucm.es. Recuperado el 23 de abril de 2023, de https://eprints.ucm.es/id/eprint/9119/1/Sistema_de_Riego_Inteligente_Borroso.pdf
- Souza Oliveira, S. A. D., (2003). Algunos comentarios sobre la teoría Fuzzy. *Exacta*, (1), 139-147. ISSN: 1678-5428. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81000114>
- Teijeiro, P. (2015). Lógicas no clásicas de la vaguedad. *Revista de humanidades de Valparaíso*, 5, 7. <https://doi.org/10.22370/rhv.2015.5.135>

- Tremante, P., & Brea, E. (s/f). Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias. Redalyc.org. Recuperado el 17 de abril de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/2150/215037911010.pdf>
- Quiroga, T. R. (2017, mayo 6). *Reguladores Difusos de Tráfico en Disciplinas de Colas de Routers de internet*. Silo.Tips. <https://silo.tips/download/reguladores-difusos-de-trafico-en-disciplinas-de-colas-de-routers-de-internet>
- Woerdehoff, C. J., Glotzbach, P. J., Reck, A. C., Szynal, J. M., & Maddix, B. A. (2002). Fuzzy logic control for an electric clothes dryer (Patent Núm. 6446357). En US Patent (Núm. 6446357).