

FUZZY CONTROL TYPE 2: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS

CONTROL DIFUSO TIPO 2: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

Ing. Jair E. Araujo V., MSc. Jorge L. Diaz R., MSc. Oscar M. Duque S.

Universidad de Pamplona.

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: (+57)(7) 5685303, Ext. 164

E-mail: jair.araujo@unipamplona.edu.co, jdiazcu@gmail.com,
omduke@hotmail.com

Abstract: In this work a review of the general conceptions of fuzzy type 2 control is made, starting from the very understanding of fuzzy type 2 logic seen as a system, and also the design and applications of that system. Additionally, they deal with some scientific contributions that have allowed these conceptions to evolve and take fuzzy type 2 logic systems to a new level, thus linking diffuse type 2 control as a fuzzy logic system in which their inputs contain feedback information on the effect of their output. In a certain process. Finally giving a review of some important implementations that have been made using this type of control.

Keywords: Fuzzy logic type 2, fuzzy logic system, fuzzy logic controller.

Resumen: En este trabajo se hace una revisión de las concepciones generales del control difuso tipo 2, comenzando desde el propio entendimiento de la lógica difusa tipo 2 vista como un sistema, y también el diseño y las aplicaciones de dicho sistema. Adicionalmente tratan algunos aportes científicos que han permitido evolucionar dichas concepciones y llevar a un nuevo nivel a los sistemas lógico difusos tipo 2. Vinculando así al control difuso tipo 2 como un sistema lógico difuso en el cual sus entradas contienen información retroalimentada del efecto de su salida en determinado proceso. Por último dando una revisión de algunas implementaciones importantes que se ha realizado empleando este tipo de control.

Palabras clave: *Lógica difusa tipo 2, sistema de lógica difusa, controlador lógico difuso.*

1 INTRODUCCIÓN

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que permite el análisis de la información del mundo real, con estrategias de pertenencia manejando conceptos del lenguaje natural los cuales no son precios, tales como “temperatura alta”, “temperatura baja”, “temperatura media”. A través de la lógica difusa se puede controlar o describir un sistema, realizando un mecanismo de inferencia basado en el sentido común e información dada por un experto. La lógica difusa actualmente es muy usada en diferentes sectores como por ejemplo el control y la robótica, aunque esta metodología se considera compleja, el ser humano todos los días maneja instrucciones con este tipo de enseñanza. Ejemplo: Un padre le da una bebida a su hijo, él le indica que la bebida está caliente para que este tenga prudencia a la hora de beberla, nunca el padre le dirá la temperatura en grados a la cual se encuentra la bebida; tan solo le dirá “muy caliente”, “poco caliente” y entonces el niño entenderá cuanto es mucho y cuanto es poco, determinando los rangos de temperatura dadas estas posibilidades.

En la actualidad la lógica difusa tiene una variante la cual es conocida como lógica difusa tipo II, esta se caracteriza principalmente por ser una extensión de la lógica difusa tipo I, donde el grado de pertenencia no está dado por un valor nítido de pertenencia en el conjunto difuso. Los controladores difusos tipo 2 pueden ser expuestos a variaciones en los parámetros del modelo del sistema, teniendo variaciones en la respuesta transitoria poco significativas, notándose un controlador más robusto, tolerante a ruido y perturbaciones. La lógica difusa tipo 2 aun cuando ofrece una variedad de ventajas con respecto a la respuesta transitoria del sistema, dado ruido y perturbaciones en el sistema siendo un controlador más robusto y contemplando que tuvo su nacimiento unos pocos años después de la lógica difusa tipo I, no ha sido usada con la misma frecuencia que la lógica difusa tipo 1, dada la heurística de la lógica difusa tipo 1 y tipo 2, no se logra evidenciar una metodología para el desarrollo para controladores difusos tipos 2, que facilite aplicar esta estrategia de control inteligente.

Los sistemas de lógica difusa se han aplicado con éxito a una extensa gama de problemas y aplicaciones. Un tipo de aplicación, de este tipo está relacionada con el uso de la lógica difusa para el modelado y la aproximación de sistemas donde se usa un sistema de inferencia difusa para modelar el conocimiento humano o para aproximar sistemas dinámicos y no lineales; y a partir de ello generar una estrategia de control realimentada. Sin embargo, la existencia de

incertidumbres y falta de información en muchos casos reales, hacen que estos problemas sean difíciles modelar a nivel difuso I utilizando únicamente el conocimiento experto. Los ejemplos de tales problemas incluyen la identificación de sistemas sin bases de reglas conocidas y sistemas altamente complejos, o cuando la estrategia de control no es expresable fácilmente a nivel heurístico. Resulta claro que, al diseñar un sistema de lógica difusa simple o tipo 1, los expertos pueden proporcionar reglas eficientes, pero, a medida que la complejidad del sistema crece, el establecimiento de base de reglas y membresía se vuelven difíciles de adquirir. Por lo tanto, algunos métodos para la creación de estos sistemas difusos suelen utilizarse. El objetivo de estos métodos es obtener las funciones parametrizadas que modelan mejor estos problemas. El uso de métodos automatizados para diseñar sistemas de lógica difusa ha ayudado a modelar muchos problemas del mundo real que son difíciles de entender por los expertos y ahora es una metodología bien establecida para aplicaciones de modelado y aproximación, lo mismo podría hacerse para lograr representaciones de control difuso tipo 2.

2 LÓGICA DIFUSA TIPO 2

El término de conjuntos difusos tipo II, fue introducido en 1975 por Zadeh como una extensión al concepto de los conjuntos difusos tipo I (D. Wu & Wan, 2006). Un conjunto difuso de tipo II se define por una función de pertenencia difusa, donde el valor o grado de pertenencia para cada elemento de este conjunto es un conjunto difuso en el intervalo $[0,1]$ en lugar de un valor nítido (Castillo, 2012). Donde si las circunstancias son tan borrosas, que incluso hay problemas para definir el grado de pertenencia como un valor puntual, se usa entonces un conjunto difuso tipo 2 (Marín, 2016). Los grados adicionales de libertad hacen que las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos tipo II sean funciones tridimensionales (Chaoui, Gueaieb, Biglarbegan, & Yagoub, 2013), como se observa en la figura 1. Por lo tanto, los conjuntos difusos de tipo II pueden manejar más tipos de incertidumbres con magnitudes mayores utilizando una base de reglas más pequeña que sus contrapartes de tipo I.

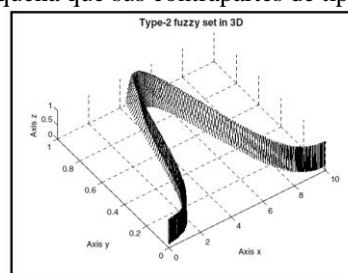


Figura 1 Vista tridimensional de una función de membresía tipo 2. (Castillo, 2012)

Un conjunto difuso de tipo II, denotado como \tilde{A} (Ecuación 4.1), se caracteriza por una función de pertenencia de tipo II $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$, donde $x \in X$ y $u \in J_x \subseteq U = [0,1]$,

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\} \quad (2.1)$$

donde $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$. Para un universo continuo de discurso, \tilde{A} puede expresarse como, reescribiendo (4.1) se expresa:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (2.2)$$

donde x es la variable primaria, J_x es un intervalo $[0,1]$ que representa la pertenencia primaria de x , u es la variable secundaria y $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ es la función de pertenencia secundaria de x (Chaoui et al., 2013).

Antes de adentrarse en los sistemas de lógica difusa tipo II, se debe comprender la totalidad de un conjunto difuso tipo II, para lo cual se deben conocer diversas definiciones de conceptos que uno a uno conforman lo que es en sí dicho conjunto y su fenomenología, como lo es un intervalo de tipo 2, la huella de incertidumbre, la distinción de las funciones de membresía superior e inferior y las operaciones que se pueden realizar con dichos conjuntos. La huella de incertidumbre (FOU), (FOU, footprint of uncertainty, por sus siglas en ingles) de los conjuntos difusos tipo II, define la incertidumbre de \tilde{A} como la unión de todas las funciones de membresías primarias (Mendel, Fellow, John, Liu, & Member, 2006; Rodríguez & Huertas, 2016). Esta consiste en una región delimitada como se observa en la región sombreada de la Figura 2. En el dominio empírico, la incertidumbre aparece asociada a los errores y resoluciones en los instrumentos de medición y en el dominio cognoscitivo, la incertidumbre emerge de la vaguedad y la ambigüedad del lenguaje natural (Marín, 2016)

Matemáticamente, esta unión de todas las funciones de membresía primaria puede denotarse en la ecuación (Mendel & John, 2002; Rodríguez & Huertas, 2016).

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad (2.3)$$

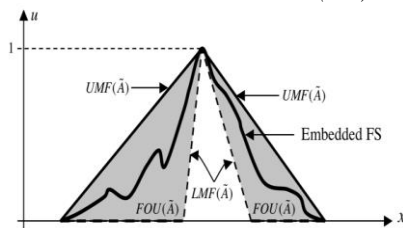


Figura 2 Uncertainty trace (FOU), superior membership function (UMF) and lower membership function (LMF). (Mendel et al., 2006)

La función de membresía superior (UMF, upper membership function, por sus siglas en ingles) y la función de membresía inferior (LMF, lower membership function, por sus siglas en inglés) son dos funciones de membresía de tipo I, las cuales representan los límites para la huella de incertidumbre (FOU) de un conjunto difuso tipo II (Liang, Karnik, Member, & Mendel, 2000).

La función de membresía superior (UMF) está asociada con el límite superior de la huella de incertidumbre (FOU), mientras que la función de membresía inferior (LMF) se asocia con el límite inferior de la huella de incertidumbre (FOU) (Liang et al., 2000; Liang & Mendel, 2017b, 2017a), donde matemáticamente la función de membresía superior es

$$upper(FOU(\tilde{A})) = N(m, \sigma 2; x) \quad (2.4)$$

Y la función de membresía inferior es

$$lower(FOU(\tilde{A})) = N(m, \sigma 1; x) \quad (2.5)$$

En cuanto a las operaciones de los conjuntos difusos tipo 2, Castillo y Melin (Castillo, 2008) describen que en el caso de los conjuntos difusos de tipo 2, i ($i = 1, \dots, r$), cuyas funciones de membresía secundarias son conjuntos difusos de tipo 1. Para calcular la unión, intersección y complemento de conjuntos difusos de tipo 2, se necesita extender las operaciones binarias de mínimo (o producto) y máximo, y la operación unitaria de negación, desde números nítidos hasta conjuntos difusos de tipo 1, porque en cada x , $\mu_i(x, u)$ es una función (a diferencia del caso de tipo 1, donde $\mu_i(x)$ es un número nítido). La herramienta para computar la unión, intersección y complemento de los conjuntos difusos tipo 2 es el principio de extensión de Zadeh (Zadeh, 1975).

Para exponer las operaciones Castillo y Melin consideran dos conjuntos difusos tipo 2 $\tilde{A}1$ y $\tilde{A}2$, es decir,

$$\tilde{A}1 = \int x \mu_{\tilde{A}1}(x) / x \quad (2.6)$$

y

$$\tilde{A}2 = \int x \mu_{\tilde{A}2}(x) / x \quad (2.7)$$

Y definen que la unión de $\tilde{A}1$ y $\tilde{A}2$ es otro conjunto difuso de tipo 2, así como la unión de difuso de tipo 1 los conjuntos $A1$ y $A2$ son otro conjunto difuso tipo 1. donde más formalmente, se tiene la siguiente expresión

$$\tilde{A}1 \cup \tilde{A}2 = \int x \in X \mu_{\tilde{A}1 \cup \tilde{A}2}(x) / x \quad (2.8)$$

Describiendo que básicamente, la unión entre dos funciones de membresía secundaria debe realizarse entre cada posible par de membresías primarias. Si hay más de una combinación de pares da el mismo punto, luego en la unión se mantiene el que tiene el máximo grado de membresía. Considerando un ejemplo simple para ilustrar la operación sindical. En La figura 3

se trazan dos funciones de membresía gaussianas de tipo 2, y la unión se muestra en la Figura 4.

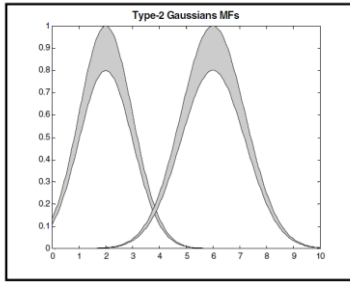


Figura 3 dos funciones de membresía gaussianas (Castillo, 2008)

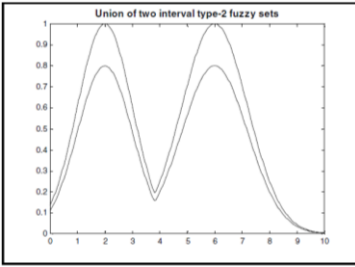


Figura 4 Unión de dos funciones de membresía gaussianas (Castillo, 2008)

La intersección de $\tilde{A}1$ y $\tilde{A}2$ es otro conjunto difuso de tipo 2, así como la intersección de los conjuntos difusos de tipo 1 $A1$ y $A2$ es otro conjunto difuso de tipo 1. Más formalmente, se tiene la siguiente expresión

$$\tilde{A}1 \cap \tilde{A}2 = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}1} \cap \mu_{\tilde{A}2}(x) / x \quad (2.9)$$

Se ilustra la intersección de dos funciones de membresía gaussianas de tipo 2 en la Figura 29.

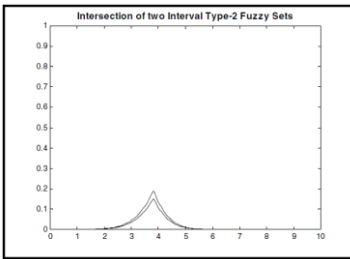


Figura 5 Intersección de dos funciones de membresía gaussianas (Castillo, 2008)

El complemento del conjunto \tilde{A} es otro conjunto difuso de tipo 2, así como el complemento del conjunto difuso de tipo 1 A es otro conjunto difuso de tipo 1. Más formalmente se tiene

$$\tilde{A}' = \{x \mid \mu_{\tilde{A}'}(x) / x \quad (2.10)$$

donde el primo denota complemento en la ecuación anterior. En esta ecuación, μ_1 es una función de membresía secundaria, es decir, en cada valor de x μ_1 es una función (a diferencia de caso de tipo 1 donde, en cada valor de x , μ_1 es un valor de punto).

3 SISTEMAS DIFUSOS TIPO 2

Un sistema de lógica difusa tipo II es un sistema basado en su estructura y componentes a un sistema de lógica difusa tipo I (Almaraashi, 2012; Baklouti, John, & Alimi, 2012). Un sistema de lógica difusa tipo II se compone de cinco componentes: un fuzzificador, una base de reglas, un motor de inferencia difuso, un reductor de tipo y un defuzzificador como se observa en la Figura 6 (Chaoui et al., 2013).

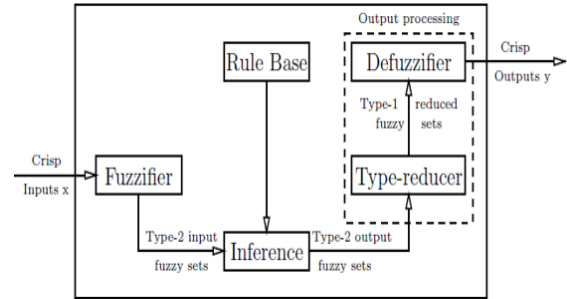


Figura 6 . Sistema lógico difuso tipo 2. (Chaoui et al., 2013)

En el bloque de procesamiento de salida este posee un componente adicional al de un sistema de lógica difusa tipo I, llamada reductor de tipo, la cual reduce un conjunto difuso tipo II a un conjunto difuso tipo I, para posteriormente mediante la defuzzificación se obtenga una salida nítida (Almaraashi, 2012; Chaoui et al., 2013).

En la etapa de fuzzificación, el fuzzificador asigna entradas nítidas a conjuntos difusos tipo II mediante el mapeo de un punto nítido $x = (x_1, \dots, x_p)^T$ (Chaoui et al., 2013). El fuzzificador mapea entradas en los conjuntos difusos asociados para determinar el grado de pertenencia de cada variable de entrada (Baklouti et al., 2012).

En la Figura 7 se representa de manera esquemática el proceso de fuzzificación para conjuntos difusos tipo II. El resultante de la fuzzificación es un conjunto difuso tipo I que representa los grados secundarios para cada entrada (Almaraashi, 2012). Las funciones de membresía superior e inferior se calculan para cada universo del discurso, obteniendo como resultado un conjunto de tipo 1 (Chaoui et al., 2013).

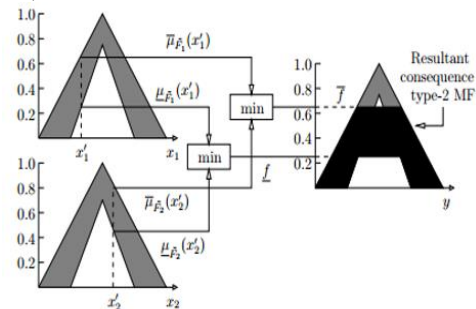


Figura 7 proceso de fusificación. (D. Wu et al., 2009).

La estructura de las reglas de un sistema de lógica difusa tipo II y tipo I es la misma, es una declaración condicional en forma IF-THEN, la parte IF llamada antecedente y la parte THEN llamada consecuente (Almaraashi, 2012).

Entonces, para un sistema de lógica difusa tipo II con p entradas $x_1 \in X_1, \dots, x_p \in X_p$ y una salida $y \in Y$, salida única de entrada múltiple (MISO) (Castillo, 2012).

Considerando que hay reglas M en un sistema de lógica difusa tipo II, la primera regla se puede escribir de la siguiente manera (Castillo, 2012) (donde F y G son conjuntos difusos apropiados para cada regla):

$$R^l = \text{IF } x_1 \text{ es } x_1^l, \dots, x_p \text{ es } x_p^l, \text{ THEN } y \text{ es } G^l \quad (3.1)$$

La reducción de tipo tiene como objetivo reducir los conjuntos difusos tipo II producidos por el motor de inferencia a un conjunto difuso tipo I que se denomina “conjunto de tipo reducido” (Almaraashi, 2012; Chaoui et al., 2013). El cálculo de conjuntos de tipo reducido se realiza en dos etapas, primero se calculan los centroides de los conjuntos consecuentes de intervalos de tipo II de las reglas difusas. Esto se realiza antes de tiempo y no es parte del ciclo de control (Chaoui et al., 2013). Por ejemplo, el centro de conjuntos de tipo reductor reemplaza cada conjunto consecuente de tipo II de regla por su centroide que es un conjunto de tipo I y luego calcula un promedio ponderado de estos centroides para obtener un conjunto difuso de tipo I (Almaraashi, 2012).

Este es el cuello de botella de los sistemas de lógica difusa de tipo II, ya que este proceso requiere costosos cálculos, especialmente cuando se usan conjuntos de tipo II de no intervalo. La reducción de tipo en conjuntos difusos tipo II de intervalo fue propuesto por Karnik y Mendel (Karnik, Mendel, & Liang, 1999), desarrollaron un algoritmo que calcula el centroide de un conjunto difuso de intervalo de tipo II, que se conoce como el algoritmo iterativo de Karnik-Mendel (KM), seguido de una versión mejorada llamada algoritmo mejorado de Karnik-Mendel en (D. Wu et al., 2009). Otro método fue presentado con el mismo propósito, conocido como el método de colapso con algunas variantes de las direcciones utilizadas al colapsar presentado por Greenfield, Chiclana, Coupland y John (Greenfield, Chiclana, Coupland, & John, s/f)

Se han publicado otros trabajos para reducir el intervalo entre tipos de conjuntos difusos de tipo II en la literatura, como los límites de incertidumbre Wu y Mendel (H. Wu & Mendel, 2002), el método WuTan (WT) (D. Wu & Tan, 2005), y el método Nie-Tan (NT) (Nie & Tan,

2008). Tales métodos alentaron a los investigadores a usar sistemas de lógica difusa de tipo II de intervalo en aplicaciones prácticas. Este proceso de reducción de tipo ha sido estudiado por varios investigadores para reducir el costo computacional de la evaluación de los IT2 FS. Y a pesar de que hoy en día (2019) existen muchos métodos de reducción de tipo. Al igual que Greenfield y Chiclana (Greenfield & Chiclana, 2018) Oscar Castillo (Castillo et al., 2019) coincide con que el más utilizado y el que ha inspirado varias variaciones es el algoritmo Karnik-Mendel, propuesto originalmente por Karnik y Mendel.

Por último, se tiene en un sistema difuso tipo 2 a el defusificador, siendo este quien asigna los conjuntos difusos de salida reducida de tipo I que han sido reducidos por el reductor de tipo en valores nítidos exactamente como el caso de defuzzificación en sistemas de lógica difusa de tipo I. Pueden usarse aquí cuales quiera métodos de defuzzificación de conjuntos difusos de tipo I.

4 APORTES EN SISTEMAS DIFUSOS

TIPO 2

En el 2014 Qing Hu y Yong presentan nuevas operaciones sobre el álgebra de valores de verdad difusos, supremum extendido e infimum extendido, que son generalizaciones de las operaciones extendidas de máximo y mínimo entre valores de verdad difusos para conjuntos difusos de tipo 2, respectivamente (Hu & Wang, 2014). Usando estas nuevas operaciones, se discuten las propiedades de las relaciones difusas de tipo 2, especialmente las composiciones de las relaciones difusas de tipo 2. Para el mismo año Mo, Wang, Zhou, Li y Xiao proponen una definición nueva y comprensible para los conjuntos difusos de tipo 2, y las funciones de membresía primaria y secundaria se definen respectivamente mediante el uso de mapeo de valores múltiples. Presentando también una nueva definición y fórmula para la huella de incertidumbre (FOU).

En cuanto a los métodos para comparar conjuntos difusos, Josie McCulloch realiza una investigación sobre la elección de medidas de similitud para conjuntos difusos tipo 2 (McCulloch & Wagner, 2020). Éste evalúa todas las medidas de similitud actuales en conjuntos difusos de tipo 2 para descubrir qué medidas tienen propiedades comunes de similitud y, para aquellas que no lo tienen, discute por qué las propiedades son diferentes, demostrando si y qué efecto tiene esto en las aplicaciones, y a su vez discute cómo una medida puede evitar perder una propiedad que se requiere. Anteriormente Hao y Mendel ya investigaban las medidas de similitud para

conjuntos difusos de tipo 2 generales basados en la representación α -plana (Hao & Mendel, 2014). A pesar de todas las investigaciones, decidir cómo medir la similitud y elegir qué medida existente usar puede ser difícil. Mientras que algunas medidas dan resultados que se correlacionan mucho entre sí, otras dan resultados considerablemente diferentes.

Un método de generación de conjuntos difusos tipo 2 de intervalo para la clasificación de imágenes de teledetección fue propuesto por Xing, He, Hu, Jiang y Yu en China (Xing, He, Hu, Jiang, & Yu, 2019), proponiendo un método para generar conjuntos difusos de intervalo tipo 2 que incorpora información del vecindario para mejorar la precisión de la clasificación.

Un método de reducción de tipo de aproximación analítica rápida para una clase de conjuntos difusos de tipo 2 cóncavos con púas fue desarrollado por Huang, Zhao y Chen (Huang, Zhao, & Chen, 2018), llamado método de reducción de tipo analítico cóncavo con picos (CATRS) de dos tipos de conjuntos difusos de tipo 2 cóncavos con púas.

Un enfoque concreto y racional para la construcción de medidas de similitud difusa y de subsistencia de tipo 2 a través de un modelo fundacional generalizado es dado por Shing y Ngan en 2019 (Ngan, 2019), la contribución de Shing y Ngan fue utilizar un modelo fundacional generalizado (introducido en Ngan en el 2018) para construir medidas de similitud T2FS de la manera más racional, concreta y sistemática posible, de modo que estas medidas T2FS sean aplicables verdaderamente a conjuntos difusos tipo 2, que las acciones de estas medidas pueden ser simplemente entendidas, analizadas e incluso personalizadas por los usuarios de T2FS, y que estas medidas de T2FS puedan procesar y generar resultados que mantengan y reflejen adecuadamente el alto grado de borrosidad involucrado en T2FS.

Los conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo (IT2FS) pueden proporcionar más flexibilidad que los conjuntos difusos de tipo 1 (T1FS) para representar información incierta, y los problemas de toma de decisiones de atributos múltiples (MADM) con información difusa de tipo 2 de intervalo han recibido una atención creciente. Razón por la cual Wang, Pan, Yan, Yao y He proponen un nuevo método de teoría de arrepentimiento basado en proyecciones para resolver problemas MADM en entornos IT2FS (Wang, Pan, Yan, Yao, & He, 2020). Donde obtuvieron como resultado que el análisis de sensibilidad muestra la estabilidad del método

propuesto, y el orden de clasificación no cambia con diferentes parámetros.

5 DISEÑO DE SISTEMAS DIFUSOS

TIPO 2

Actualmente los diseños de sistemas difusos tipo 2 son muchos, Ojha y Abraham y Václav realizan una revisión de 3 décadas de investigación del diseño heurístico de sistemas de inferencia difusos (Ojha, Abraham, & Snášel, 2019), proporcionan una revisión en profundidad del diseño óptimo de los sistemas de inferencia difusa (FIS) tipo 1 y tipo 2 utilizando cinco marcos computacionales bien conocidos: sistemas genéticos difusos (GFS), sistemas neuro-difusos (NFS), jerárquicos sistemas difusos (HFS), sistemas difusos en evolución (EFS) y sistemas difusos de múltiples objetivos (MFS), en vista de que algunos de ellos están vinculados entre sí. El diseño heurístico de GFS utiliza algoritmos evolutivos para optimizar los sistemas difusos de tipo Mamdani y Takagi-Sugeno-Kang. Mientras que, el NFS combina el FIS con los sistemas de aprendizaje de redes neuronales para mejorar la capacidad de aproximación. Un HFS combina dos o más unidades lógicas difusas de baja dimensión en un diseño jerárquico para superar la maldición de la dimensionalidad. Un EFS resuelve los problemas de transmisión de datos al evolucionar el sistema de forma incremental, y un MFS resuelve las compensaciones de objetivos múltiples, como la maximización simultánea de la interpretabilidad y la precisión. Dichos autores ofrecen una síntesis de estas dimensiones y exploran sus potenciales, desafíos y oportunidades en la investigación del FIS. dicha revisión también examina las complejas relaciones entre estas dimensiones y las posibilidades de combinar uno o más marcos computacionales agregando otra dimensión: sistemas difusos profundos.

6 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DIFUSOS TIPO 2

Las aplicaciones de la lógica difusa tipo 2 son muchas, de hecho, la lógica difusa tipo 2 por sus propiedades ha permitido solucionar muchos problemas complejos y se adapta mucho más a la realidad de las situaciones, lo que expande mucho más las áreas de aplicación de la misma en comparación de la lógica difusa tipo 1, si bien la lógica difusa tipo 1 tiene una gran área de aplicación, cuanto más la lógica difusa tipo 2. Se recopilan a continuación un estado del arte de algunas aplicaciones:

Un nuevo método integrado de intervalo difuso tipo 2 MCDM para mejorar la satisfacción del cliente en el transporte público de Estambul fue desarrollado por Celik, Billsik, Erdogan, Gumus y

Baracli (Celik, Nalan, Erdogan, Taskin, & Baracli, 2013), en su investigación se presenta una aplicación numérica en las empresas de transporte público de Estambul. Con lo que los autores concluyen que el método se puede aplicar a problemas complejos de toma de decisiones que se encuentran con vaguedad.

Estos sistemas también han permitido evolucionar en problemas complejos del área de la salud, como lo demuestra el trabajo de Esposito y Giuseppe, quienes proponen un enfoque novedoso para codificar automáticamente las Guías de Práctica Clínica (GPC) por medio de reglas if-then basadas en conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo (Esposito & Pietro, 2013), con el objetivo final de tratar dos tipos diferentes de incertidumbre.

Siguiendo con aplicaciones en el área de la salud, Palacios, desarrollo un sistema experto difuso tipo 2 para la evaluación del control de la nefropatía en pacientes con diabetes mellitus (Meza-palacios et al., 2017), donde el control de la nefropatía es un problema clínico que incluye incertidumbre e inexactitud, por lo que se recomienda el uso de un FES para superar este problema, ya que los sistemas difusos ayudan a evaluar el grado de incertidumbre inherente.

Un área donde se presenta mucha incertidumbre es en los videojuegos, donde enfocaron su investigación García, Hernández y Franco (Figueroa-garcía, 2016), quienes presentan algunas consideraciones computacionales y teóricas acerca de cómo incluir incertidumbre difusa en los parámetros de un problema clásico de juegos.

Otra área muy común de los sistemas difusos tipo 2 es el área de los clasificadores inteligentes, dando un aporte en esta área Shahparast y Mansoori, quien argumenta que se ha demostrado que los sistemas difusos generales de tipo 2 manejan más niveles de incertidumbre presentes en la mayoría de las aplicaciones del mundo real. Sin embargo, el rápido crecimiento de la generación de información no permite utilizar modelos generales de tipo 2 para su complejo proceso de aprendizaje. Por lo que realiza una investigación basada en el desarrollo de un clasificador difuso de tipo 2 general en línea utilizando reglas de tipo 1 en evolución (Shahparast & Mansoori, 2019), en la cual presenta un novedoso clasificador difuso general en línea tipo 2 (llamado oGT2FC). Su objetivo es reducir los cálculos necesarios para obtener los conjuntos difusos de tipo 2.

En clasificadores también se tiene la investigación de Xu, Feng, Zhao, Sun y Zhu, quienes trabajan en la clasificación de imágenes de teledetección

basada en el algoritmo de c-medias difuso de intervalo adaptativo semi-supervisado tipo 2 (Xu, Feng, Zhao, Sun, & Zhu, 2019), quienes argumentan que debido a la incertidumbre en las imágenes de teledetección y al mal planteamiento del problema, es difícil para los algoritmos de clasificación tradicionales sin supervisión crear un modelo de clasificación preciso.

Anderson Freitas y Ginalber de Oliveira Serra realizan un modelado de caja negra de espacio de estado a través de parámetros de Márkov basados en el sistema de inferencia neural-difuso tipo 2 en evolución para sistemas dinámicos multivariados no lineales (Pablo, Evangelista, Luiz, & Serra, 2019), donde se propone un enfoque para la identificación neural-difusa del intervalo de estado-espacio tipo 2 de sistemas dinámicos multivariados, en un contexto de aprendizaje progresivo e incremental.

Roy y Mukherjee trabajaron en la predicción del rendimiento máximo de aceite de semillas de almendras en una industria química basados en un nuevo enfoque de lógica difusa tipo 2 (Roy, Mukherjee, & Kumar, 2019), dichos autores desarrollan un modelo único que utiliza el enfoque del controlador de lógica difusa tipo 2 (T2FLC) para predecir las condiciones óptimas del proceso para la extracción de aceite al máximo de las semillas de almendras.

7 SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO

TIPO 2

Según Marco A. Márquez la lógica difusa tipo 2 sirvió para justificar la forma de los conjuntos difusos y se han conseguido mejores resultados que con la ahora llamada lógica difusa tipo 1, pero se requiere de programar un controlador más grande, con más parámetros y se emplea un mayor gasto computacional (Antonio & Samantha, 2018). En un controlador difuso convencional (también llamado controlador difuso tipo 1 (T1FLC)) no es posible hacer frente a la incertidumbre asociada a los parámetros del controlador, debido a esto, Zadeh desarrolló la teoría de sistemas difusos tipo 2 (T2FL) y superiores para eliminar la paradoja de que los límites de las funciones de membresía de un sistema difuso tipo 1 eran en sí mismos números reales es decir valores duros, lo cual conlleva la incapacidad de manejar la incertidumbre asociada a estos parámetros (Rivera et al., 2013). En otras palabras, los límites de las funciones de membresía en sistemas difusos tipo 2, son en sí conjuntos difusos tipo 1. La aplicación de los sistemas difusos tipo 2 en el control de sistemas, se le conoce como controladores difusos tipo 2 (T2FLC). La implementación genérica del controlador difuso en términos de conjuntos

difusos tipo 2 al igual que el tipo 1 tiene dos variables de entrada: el error $e(t)$, la diferencia entre la señal de referencia y la salida del proceso; y la variación de error $\Delta e(t)$ (Castillo & Melin, 2014),

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (7.1)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad (7.2)$$

Observando en la figura 8 el diagrama de bloques que dicho esquema de control genérico.

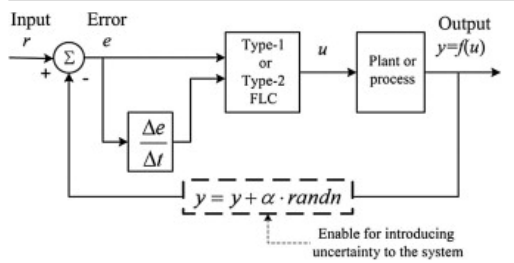


Figura 8 diagrama de bloques de sistema de control difuso tipo 1 y tipo 2 genérico (Castillo & Melin, 2014).

Otro diseño es el de tipo PI, como el planteado por Fayek (Fayek, Elamvazuthi, Perumal, & Venkatesh, 2014), quien seleccionó una estructura de tipo PI para eliminar cualquier error de estado estacionario que pueda resultar en el caso de una estructura de tipo derivado proporcional (PD), debido a la falta de función integral en la naturaleza de control de PD. En dicho diseño todas las entradas y salidas se asocian con siete funciones de pertenencia de forma triangular sobre un universo de unidad de discurso de intervalo $[-1, 1]$. Se implementa el método Mamdani, también conocido como método Max-Min. La base de reglas se basa en la base de reglas MacVicar-Whelan como se enumera en la Tabla 4, donde, BN es Negativo grande, MN es Negativo medio, N es Negativo, Z es Cero, P es Positivo, MP es Positivo medio y BP es Positivo grande. Donde la simetría de la base de reglas garantiza la estabilidad y robustez del controlador después del proceso de optimización. Fayek también plantea un método para reducir el costo computacional, el cual consiste en reducir los puntos que caracterizan las funciones de membresía, definiendo la relación entre $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ y a, b, c, σ como:

$$P1 = P - \sigma \mid P2 = P + \sigma \mid \forall \{(P, P1, P2)\} = \{(a, a_1, a_2), (b, b_1, b_2), (c, c_1, c_2)\} \quad (7.3)$$

Tabla 1 Base de reglas Mac Vicar-Whelan (Fayek et al., 2014)

E/DE	BN	MN	N	Z	P	MP	BP
BN	BN	BN	BN	MN	N	N	Z
MN	BN	MN	MN	MN	N	Z	P
N	BN	MN	N	N	Z	P	MP
Z	BN	MN	N	Z	P	MP	BP
P	MN	N	Z	P	P	MP	BP
MP	N	Z	P	MP	MP	MP	BP
BP	Z	P	P	MP	BP	BP	BP

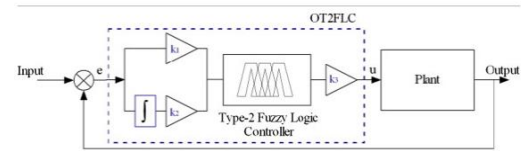


Figura 9 Controlador lógico difuso óptimo tipo 2 propuesto (OT2FLC) (Fayek et al., 2014)

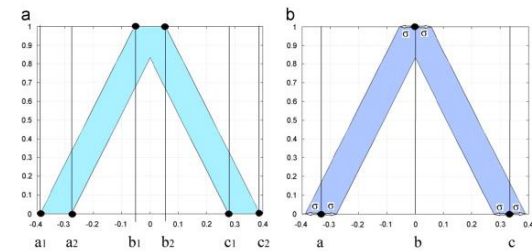


Figura 10 Representación de Membresía tipo 2 (Fayek et al., 2014)

Estos controladores son muy prácticos y flexibles, pero no pueden manejar la incertidumbre asociada con la estructura del convertidor, los dispositivos de medición y las señales de control medidas. Por lo tanto, Amir, utiliza un controlador PI neuronal difuso tipo 2 (T2FN PI) para superar todos los problemas propuestos (Shari et al., 2016). El controlador T2FN PI combina las ventajas del controlador PI convencional y el controlador inteligente para diseñar un controlador flexible y robusto. Además, este controlador puede manejar la incertidumbre asociada a la estructura del convertidor, los dispositivos de medición y las señales de control medidas. La estructura del controlador T2FN PI propuesta por Amir, se ilustra en la figura 11.

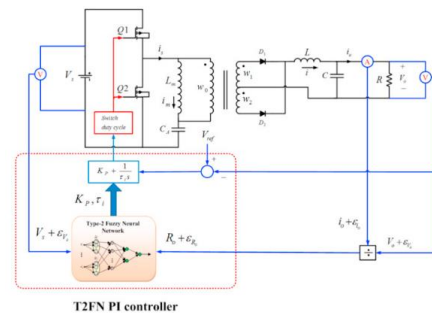


Figura 11 Propuesta de controlador tipo 2 neural difuso PI (T2FN PI). (Shari et al., 2016)

En este punto de la investigación ya muchas veces se ha mencionado que el control difuso tipo 2 ofrece más ventajas que el difuso tipo 1, pero no se ha corroborado con una comparación exhaustiva, como la que realiza Oscar Castillo, el cual realiza un estudio comparativo de sistemas de lógica difusa tipo 1, sistemas de lógica difusa tipo intervalo 2 y sistemas de lógica difusa tipo 2 generalizados en problemas de control (Castillo, Amador-angulo, Castro, & Garcia-valdez, 2016), donde en su investigación realiza pruebas de estos controladores sobre un mismo proceso, comparando el resultado en el proceso de control de nivel de un tanque, en un proceso de control de temperatura, control de un robot móvil y control de haz y bola, los cuales el los considera como procesos complejos que presentan no linealidades. Por ejemplo, en el caso del control del tanque obtuvo los siguientes resultados implementado un control difuso genérico, como el que se muestra en la figura 12

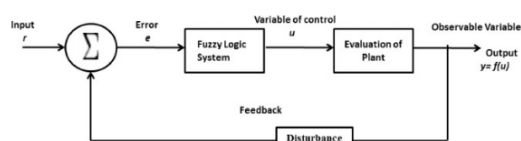


Figura 12 Representación de control difuso genérico (Castillo et al., 2016)

En la Figura 13 se puede observar que cuando se usa el modelo de GT2FLC, el controlador difuso presenta más estabilidad. La línea azul representa el comportamiento con el Sistema de lógica difusa Tipo -1, la línea verde indica el Sistema de lógica difusa Tipo 2 de intervalo y la línea roja representa el comportamiento del Sistema de lógica difusa Tipo 2 generalizado.

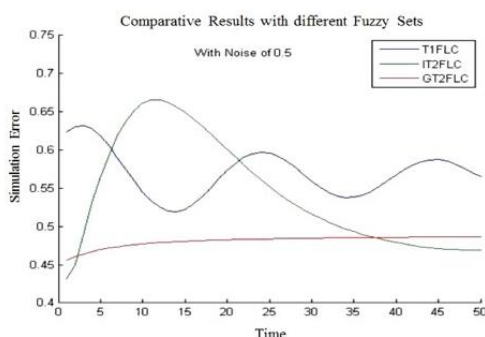


Figura 13 Resultados comparativos de T1FLC, IT2FLC y GT2FLC con un nivel de ruido de 0.5 (Castillo et al., 2016)

Otra consideración en el control difuso tipo 2, es la simplificación del mismo, Los zSlices y las representaciones en el plano α son dos métodos de simplificación que hacen que los procedimientos IT2FLS sean aplicables a los diseños GT2FLS, lo

que genera menos cálculos y representaciones matemáticas más simples.

Rong y Wang investigan el problema de estabilización de los sistemas de control basados en el modelo difuso de intervalo tipo 2 (IT2) Takagi-Sugeno (T – S) con retraso de tiempo (Rong, Wang, Ding, & Zhang, 2019). Extienden el modelo difuso T–S de conmutación tipo 1 para tratar con el modelo difuso IT2 T – S, y el nuevo modelo construido se define como el modelo difuso T – S de conmutación regional IT2. Además, proponen un nuevo controlador de retroalimentación de estados, teniendo en cuenta, el controlador difuso de conmutación regional IT2 que conmuta de acuerdo con los estados del sistema.

Chun Ming, Wan y Nie investigan sobre la diferencia en el rendimiento de control del sistema de control de PI difuso de tipo 2 con diferentes formas de FOU (Ming, Yip, Wan, & Nie, 2019), para ellos los controladores de lógica difusa tipo 2 de intervalo (IT2-FLC) han estado atrayendo mucha atención. Sin embargo, aún persisten los desafíos en el diseño de IT2-FLC. Uno de los principales desafíos es elegir la forma de FOU adecuada para los conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo (IT2-FS).

Otro problema común en los sistemas de control difuso de intervalo tipo 2, es el tratamiento de datos de muestreo, Du, Kao y Parque investigan sobre el problema de estabilización de dichos datos, obteniendo en esta área nuevos resultados (Du, Kao, & Park, 2019), para ellos algunas matrices de ponderación libre, matrices flojas y la información vinculada en las funciones de membresía se utilizan para mejorar el análisis de estabilidad.

Raj y Mohán presentan una nueva configuración del controlador Intervalo Tipo-2 (IT2) difuso Proporcional-Integral (PI) o controlador difuso Proporcional-Derivado (PD) del tipo Takagi-Sugeno (TS) (Raj & Mohan, 2020). Se intenta generalizar la estructura del controlador PI / PD difuso de IT2 utilizando múltiples conjuntos difusos.

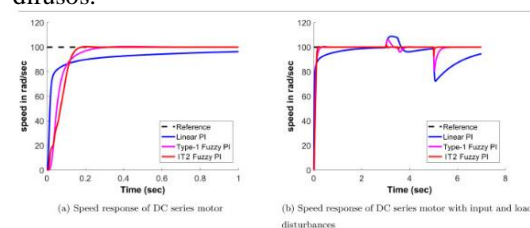


Figura 14 Comparación entre respuestas obtenidas con diferentes controladores en la investigación de Raj y Mohan (Raj & Mohan, 2020)

El diseño de controladores difusos tipo 2 hoy está muy robustecido, tanto así, que para lograr los mejores resultados y poder controlar sistemas muy complejos la tendencia es combinar este con otras técnicas de control, logrando así muy buenos resultados. Es esto lo que motiva a Seyed Moezi a realizar una investigación en la que propone y diseña un método SMC (AIT2FFOBSMC) de intervalo fraccionado difuso de orden difuso de intervalo adaptativo óptimo (Alireza, Zakeri, & Eghtesad, 2019), que puede reducir significativamente la charla y el error de seguimiento aplicando menos esfuerzo de control.

Otra investigación que integra diferentes técnicas es la de Wang, Luo y Xingyuan, quienes investigan sobre la sincronización e identificación de sistemas no lineales mediante el uso de una nueva red neural difusa LSTM de intervalo de evolución automática tipo 2 (Haiyue, Chao, & Xingyuan, 2019), donde mediante la estructura neural difusa y el mecanismo de memoria a largo plazo (LSTM), proponen una nueva estructura de inferencia de la red neural LSTM difusa de intervalo de evolución automática tipo 2 (eIT2FNN-LSTM) para la sincronización e identificación de dinámica no lineal.

Sarabakha mediante el uso de algunas observaciones atractivas, propone una metodología sistemática alternativa para derivar explícitamente FM para DI-T1-FLC y DI-IT2-FLC (Sarabakha, Fu, & Kayacan, 2019). El procedimiento propuesto para derivar una relación analítica de forma cerrada entre entradas y salidas proporciona información sobre el efecto de los parámetros FOU. Además, la metodología propuesta permite la generación de varias superficies de control (CS) al remodelar solo el tamaño de FOU.

Wu y Mendel dan algunas recomendaciones sobre el diseño de sistemas difusos prácticos de intervalo tipo 2 (D. Wu & Mendel, 2019), recomendaciones las cuales van orientadas a responder a las siguientes interrogantes ¿Se debe usar un fuzzificador singleton o no singleton? ¿Cuántas MF deben usarse para cada entrada? ¿Deben usarse MF lineales gaussianos o por partes? ¿Se debe utilizar la inferencia Mamdani o Takagi-Sugeno-Kang (TSK)? ¿Se debe utilizar mínimo o producto-Norma? ¿Debe el procesamiento de salida incluir reducción de tipo? Si se utiliza la reducción de tipo, ¿qué método se debe elegir? ¿Cómo optimizar el sistema difuso IT2? donde para dichos autores la solución a estas interrogantes hará que los sistemas difusos IT2 sea más accesibles para los diseñadores.

8 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DIFUSO TIPO 2

En el 2013 para Alfonso Vela (Rivera et al., 2013) Existían varias opciones para la implementación de controladores basados en lógica difusa tipo 2 (T2FLC). El método usualmente seleccionado, consistía en concebir al controlador difuso tipo 2 como una colección embebida de controladores difusos tipo 1 (T1FLCs). En esta opción de implementación, se presenta un problema de cómputo, ya que es necesario procesar y almacenar datos de n controladores difusos tipo 1, lo que implica un incremento en los tiempos de procesamiento, en los requerimientos del sistema, etc. En cambio, para él el método de implementación presentado por Castillo et al, solamente necesita la huella de incertidumbre superior e inferior de los conjuntos difusos tipo 2, para desarrollar toda la inferencia difusa del controlador.

Díaz Adolfo en el 2009 mucho antes de los análisis de Alfonso Vela ya investigaba la aplicación de la lógica difusa tipo dos en una planta didáctica en control de procesos industriales, respecto de las variables nivel y flujo (Díaz, López, Francisco, & Bravo, 2009), quien utiliza el software Matlab para desarrollar las máquinas de inferencia difuso tipo uno y dos tipo Mamdani, las cuales permitieron obtener los parámetros que se enviaron a través de una red neuronal multicapa al PLC, con la utilidad del OPC y para el control de las variables de proceso, flujo y nivel. Emilio R. un año previo a dicho análisis de Vela en el 2012 Farfán Martínez presenta el diseño de un controlador que combina la teoría de estabilidad de Lyapunov y los sistemas difusos tipo 2 para controlar la velocidad de un servomecanismo (Martínez, Hernández, Lara, & Autónoma, 2012). Este enfoque utiliza una función candidata de Lyapunov para obtener las reglas del controlador difuso.

Un controlador de voltaje no lineal basado en el sistema de control de lógica difusa tipo intervalo 2 para sistemas de energía de múltiples máquinas es desarrollado por A. Abbadi (Abbadi, Nezli, & Boukhetala, 2013). Abbadi propone un controlador difuso de intervalo tipo 2 que tiene la capacidad de mejorar la estabilidad transitoria y lograr la regulación de voltaje simultáneamente para sistemas de energía de múltiples máquinas.

Yu y Chen diseñaron un control de seguimiento adaptativo difuso de intervalo tipo 2 para un motor de corriente continua de imán permanente (PMD) con zonas muertas y perturbaciones externas (Yu & Chen, 2014). El modelo dinámico difuso tipo 2 es usado para aproximar la dinámica del motor sin construir el sector inverso de zona

muerta, donde los parámetros del modelo difuso se obtienen tanto de la inferencia difusa como de las leyes de actualización en línea

Ya para el 2015 para Shirin Toloue (Fartash, Akbarzadeh, & Akbarzadeh, 2015) los robots paralelos tenían estructuras complicadas, así como ecuaciones dinámicas y cinemáticas complejas, lo que hacía que los enfoques de control basados en modelos fueran ineficaces debido a su alto costo computacional y baja precisión. Razón por lo cual propone una arquitectura de control de crecimiento dinámico sin modelos para robots paralelos que combina los méritos de los sistemas autoorganizados con los sistemas neuronales difusos de tipo 2 de intervalo, el sistema neuro difuso propuesto es el DGIT2FNC.

En dicho año 2015 el objetivo para Mauricio Sánchez y Juan Castro era mostrar que un Sistema de control difuso tipo 2 generalizado puede superar a los sistemas de control difuso tipo 1 e intervalo tipo 2 cuando hay perturbaciones externas, su investigación llevaba por título “Sistemas difusos de tipo 2 generalizados para controlar un robot móvil y una comparación de rendimiento con los sistemas difusos de tipo 2 y tipo 1 de intervalo” (Sanchez, Castillo, & Castro, 2015).

Hongyi Li diseña un control de sistemas difusos de intervalo tipo 2 con falla del actuador enfocado en el control de datos muestreados (Li, Sun, Shi, & Lam, 2015). Su investigación se centra en el diseño del controlador de datos muestreados para sistemas difusos de intervalo tipo 2 (IT2) con falla del actuador.

Otra aplicación muy común del control difuso tipo 2 es el control de sistemas carro-péndulo, Ruvalcaba desarrolla un control adaptativo basándose en dichas técnicas difusas tipo 2 (Ruvalcaba & Llama, 2016), Ruvalcaba finalmente presenta los resultados obtenidos mediante una simulación numérica al implementar el controlador propuesto sobre el sistema carro-péndulo, donde demuestra como los sistemas difusos tipo 2 pueden ayudar a mejorar las respuestas de los sistemas difusos tipo 1.

En la medicina también existen diversas aplicaciones, Faiyaz Doctor trabaja los conjuntos difusos tipo 2 aplicados a controladores lógicos difusos autoorganizables multivariados para regular la anestesia (Doctor, Syue, Liu, Shieh, & Iqbal, 2016), en su investigación se proponen controladores novedosos de intervalo y controladores lógicos difusos de autoorganización de tipo 2 generales (SOFLC) para el control

automático de la anestesia durante los procedimientos quirúrgicos.

En la aplicación en energías renovables, para Krishnama Raju el generador de inducción doblemente alimentado es muy sensible a las variaciones de voltaje en la red, lo que representa una limitación para las plantas de energía eólica durante la operación integrada de la red. Manejar la incertidumbre en la velocidad del viento y las fallas de la red es un desafío importante para cumplir con los requisitos del código de la red moderna. Raju propone una nueva estrategia de control para el convertidor lateral Rotor utilizando conjuntos difusos de tipo 2 de intervalo que pueden modelar y manejar incertidumbres en los parámetros del sistema (Raju & Pillai, 2016).

Para Mohammad Hassan Khooban (Hassan, Niknam, & Blaabjerg, 2017) debido a la naturaleza intermitente de las energías renovables empleadas en redes inteligentes, se producen grandes fluctuaciones de frecuencia cuando la capacidad de control de frecuencia de carga (LFC) no es suficiente para compensar el desequilibrio de generación y demanda. En consecuencia, el control de potencia del vehículo a la red (V2G) se puede aplicar para compensar la capacidad inadecuada de LFC. Mohammad propone una combinación de los conjuntos de lógica difusa de tipo 2 general (GT2FLS) y la técnica de Algoritmo de búsqueda de armonía modificada (MHSA), como un nuevo algoritmo heurístico, para ajustar adaptativamente el controlador proporcional-integral (PI) para LFC.

Moo en el 2018 presenta una metodología para la aplicación de un controlador difuso tipo-2 en intervalos para el control de velocidad de un motor de corriente directa ante un gran disturbio estocástico y otro determinista (Medina, Romero, Nacional, & Zacatenco, 2018). Moo propone la arquitectura del control tipo-2 con el algoritmo mejorado de Karnik & Mendel (EKM por sus siglas en inglés).

Otra aplicación del control difuso tipo 2 está en la industria petrolera, una de dichas aplicaciones es la perforación de los pozos, para Zhang Chi y Zou Wei el sistema rotativo orientable (RSS) es una técnica de perforación direccional que se ha aplicado en la exploración de petróleo y gas en entornos complejos para los requisitos de energía fósil y prospección geológica. Las no linealidades e incertidumbres causadas por el dispositivo dinámico, la estructura mecánica, el entorno extremo del fondo del pozo y los requisitos del diseño de trayectoria compleja en el trabajo de perforación real aumentan las dificultades del seguimiento preciso de la trayectoria. Es por ello que Chi y Wei proponen un método de control

cooperativo de retroalimentación de doble circuito basado en un modelo basado en el control de lógica difusa de tipo 2 de intervalo (IT2FLC) y algoritmos de aprendizaje de refuerzo crítico de actor (RL) con filtros digitales de paso bajo (LPF) de un orden para seguimiento de trayectoria tridimensional de RSS (C. Zhang, Zou, Cheng, & Gao, 2018).

En los procesos químicos en los cuales un control riguroso de las proporciones también es útil el control difuso, Shiwen Xie desarrolla una estrategia híbrida de control difuso para el control del proceso de geothita (Xie, Xie, Li, Jiang, & Gui, 2019), el proceso de goetita es un sistema de reacción complicado que ocupa una posición importante en el proceso de hidrometalurgia de zinc.

El control difuso tipo 2 también ha sido muy utilizado en la robótica, en el control de manipuladores, un trabajo en esta área lo presenta Ethem Kalekci, quien desarrolló un control de trayectoria y vibración de un manipulador articular flexible utilizando lógica difusa de intervalo tipo 2 (Kelekci & Kizir, 2019). Los resultados muestran que el controlador propuesto mejora claramente la vibración del enlace y el comportamiento de seguimiento de trayectoria del sistema.

Otra aplicación se tiene en los vehículos aéreos no tripulados (UAV), como los drones, Samir Zeghlache desarrolló un control tolerante a fallas para un cuadrotor modificado a través de un control basado en backstepping y lógica difusa tipo 2 adaptable sujeto a fallas del actuador (Zeghlache, Djeriou, Benyettou, Benslimane, & Mekki, 2019). Adeleh Arabzadeh fue otro que vinculo en backstepping con la lógica difusa tipo 2 (Jafari, Mohammad, & Mohammadi, 2019), quien desarrollo un muy buen Control de backstep de tipo 2 adaptativo de sistemas no lineales de orden fraccional incierto con zona muerta desconocida.

El control de marcha de robots bípedos es otro de los enfoques actuales, en un estado del arte donde se busca que cada vez los robots asemejen más el comportamiento y movimientos del humano, Liang Yang desarrolla un Control de marcha eficiente energéticamente para robots bípedos utilizando sistemas de lógica difusa de intervalo tipo 2 y algoritmo de iteración optimizado, Liang propone un enfoque de eficiencia energética para el control de la marcha de los robots bípedos (Yang, Liu, & Chen, 2019).

Muchos de las investigaciones de la lógica difusa tipo 2 son aplicadas a procesos de energía renovable, Kanasottu Diseñó e implementó un controlador adaptativo basado en PI-lógica difusa

de intervalo tipo 2 para el sistema de energía eólica basado en DFIG (Anil, Prakash, & Fernandez, 2020). Kanasottu propone un controlador integral de intervalo difuso lógico-proporcional (PI) de intervalo avanzado tipo 2 para los bucles de control de torque y voltaje del convertidor del lado del rotor del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).

Otra aplicación en el área química fue desarrollada por H. Zhang, quien desarrollo un control robusto adaptativo de la relación de exceso de oxígeno para el sistema de suministro de aire de celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) basado en el sistema de lógica difusa tipo 2 (H. K. Zhang, Wang, Wang, & Wang, 2020).

9 CONCLUSIONES

El control difuso tipo 2 ha tenido un crecimiento notorio en la solución de problemas cada vez mas complejos, pero como factor negativo se observa un crecimiento en la dificultad de la implementación, teniendo en la mayoría de las investigaciones sistemas complejos, en los cuales se observa solo desarrollos matemáticos que no dejan un modelo o guía práctica para aquellos principiantes en el área, que toman dichas investigaciones para tener una asimilación y comprensión del tema.

Dados los aportes de los diferentes autores a la mejora de los sistemas difusos, se observa como la mayoría buscan mejorar el costo computacional, sin embargo, se sigue aconsejando la utilización del método KM, a pesar de ser uno de los métodos mas antiguos en el área de investigación, lo que deja como conclusión que aun no se desarrolla un método lo suficientemente bueno como el KM que mejore su funcionamiento en todos los aspectos.

Aun cuando la lógica difusa tipo 2 presenta una versatilidad en las aplicaciones de control, es de resaltar que no se tiene una metodología para el diseño y/o implementación de controladores de este tipo, como se puede encontrar con algunos métodos de control inteligente o clásico.

REFERENCIAS

- Abbadi, A., Nezli, L., & Boukhetala, D. (2013). Electrical Power and Energy Systems A nonlinear voltage controller based on interval type 2 fuzzy logic control system for multimachine power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 45(1), 456–467.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.09.020>
- Alireza, S., Zakeri, E., & Eghtesad, M. (2019). Optimal adaptive interval type-2 fuzzy fractional-order backstepping sliding mode control method for some classes of nonlinear systems. *ISA Transactions*, 93, 23–39.
<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.03.006>
- Almaraashi, M. (2012). *Learning of Type-2 Fuzzy Logic Systems using Simulated Annealing by Declaration of Authorship*. (September).
- Anil, K., Prakash, C., & Fernandez, E. (2020). Electrical Power and Energy Systems Design and implementation of interval type-2 fuzzy logic-PI based adaptive controller for DFIG based wind energy system. *Electrical Power and Energy Systems*, 115(October 2018), 105468.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105468>
- Antonio, M., & Samantha, N. (2018). Intervalo difuso tipo 2 con aprendizaje aplicado en control. *Revista de Simulación Computacional*, (February).
- Baghbani, F., Akbarzadeh-t, M., & Akbarzadeh, A. (2018). Indirect adaptive robust mixed H_2 / H_∞ general type-2 fuzzy control of uncertain nonlinear systems. *Applied Soft Computing Journal*, 72, 392–418.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.049>
- Baklouti, N., John, R., & Alimi, A. M. (2012). *Interval Type-2 Fuzzy Logic Control of Mobile Robots*. (January).
<https://doi.org/10.4236/jilsa.2012.44031>
- Castillo, O. (2008). *Type-2 Fuzzy Logic Theory and Applications* (Springer, Ed.). Berlin.
- Castillo, O. (2012). *Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications* (Springer).
- Castillo, O., Amador-angulo, L., Castro, J. R., & Garcia-valdez, M. (2016). A comparative study of type-1 fuzzy logic systems , interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems. 354, 257–274.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.026>
- Castillo, O., & Melin, P. (2014). A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control. *Information Sciences*, 279, 615–631.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.015>
- Castillo, O., Melin, P., Ontiveros, E., Peraza, C., Ochoa, P., Valdez, F., & Soria, J. (2019). A high-speed interval type 2 fuzzy system approach for dynamic parameter adaptation in metaheuristics ☆. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85(July), 666–680.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.07.020>
- Celik, E., Nalan, O., Erdogan, M., Taskin, A., & Baraclı, H. (2013). An integrated novel interval type-2 fuzzy MCDM method to improve customer satisfaction in public transportation for Istanbul. *Transportation Research Part E*, 58, 28–51.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.06.006>
- Chaoui, H., Gueaieb, W., Biglarbegan, M., & Yagoub, M. C. E. (2013). *Computationally Efficient Adaptive Type-2 Fuzzy Control of Flexible-Joint Manipulators*. 66–91.
<https://doi.org/10.3390/robotics2020066>
- Diaz, A., Lopez, J., Francisco, E., & Bravo, C. (2009). *Aplicación de la lógica difusa tipo dos en una planta didáctica en control de procesos industriales, respecto de las variables nivel y flujo*. (May 2014).
- Doctor, F., Syue, C., Liu, Y., Shieh, J., & Iqbal, R. (2016). Type-2 fuzzy sets applied to multivariable self-organizing fuzzy logic controllers for regulating anesthesia. *Applied Soft Computing Journal*, 38, 872–889.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.014>
- Du, Z., Kao, Y., & Park, J. H. (2019). New results for sampled-data control of interval type-2 fuzzy nonlinear systems. *Journal of the Franklin Institute*, (xxxx), 1–21.
<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.09.035>
- Esposito, M., & Pietro, G. De. (2013). Knowledge-Based Systems Interval type-2 fuzzy logic for encoding clinical practice guidelines. *Knowledge-Based Systems*, 54, 329–341.
<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.10.001>
- Fartash, S., Akbarzadeh, M., & Akbarzadeh, A. (2015). Position tracking of a 3-PSP parallel robot using dynamic growing interval type-2 fuzzy neural control. *Applied Soft Computing Journal*, 37, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.07.015>
- Fayek, H. M., Elamvazuthi, I., Perumal, N., & Venkatesh, B. (2014). A controller based on Optimal Type-2 Fuzzy Logic : Systematic design , optimization and real-time implementation. *ISA Transactions*, 53(5), 1583–1591.
<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.06.001>
- Figuerola-garcía, J. (2016). *Towards Solving Matrix Games with Interval Type-2 Fuzzy Optimization Abstract*. (June).
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.revising.2013.2.a06>
- Greenfield, S., & Chiclana, F. (2018). Type-Reduced Set structure and the truncated type-2 fuzzy set. *Fuzzy Sets and Systems*, 352, 119–141.
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.02.012>

- Greenfield, S., Chiclana, F., Coupland, S., & John, R. (s/f). *The Collapsing Method of Defuzzification for Discretised Interval Type-2 Fuzzy Sets*. (June 2008), 1–25.
- Haiyue, W., Chao, L., & Xingyuan, W. (2019). Synchronization and identification of nonlinear systems by using a novel self-evolving interval type-2 fuzzy LSTM-neural network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 81(July 2018), 79–93.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.02.002>
- Hao, M., & Mendel, J. M. (2014). Similarity measures for general type-2 fuzzy sets based on the α -plane representation. *Information Sciences*, 277, 197–215.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.01.050>
- Hassan, M., Niknam, T., & Blaabjerg, F. (2017). A new load frequency control strategy for micro-grids with considering electrical vehicles. 143, 585–598.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.057>
- Hu, B. Q., & Wang, C. Y. (2014). On type-2 fuzzy relations and interval-valued type-2 fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 236, 1–32.
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2013.07.011>
- Huang, S., Zhao, G., & Chen, M. (2018). A fast analytical approximation type-reduction method for a class of spiked concave type-2 fuzzy sets ☆. *International Journal of Approximate Reasoning*, 103(61603126), 212–226.
<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2018.10.002>
- Jafari, A. A., Mohammad, S., & Mohammadi, A. (2019). Adaptive type-2 fuzzy backstepping control of uncertain fractional-order nonlinear systems with unknown dead-zone. *Applied Mathematical Modelling*, 69, 506–532.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.01.002>
- Karnik, N. N., Mendel, J. M., & Liang, Q. (1999). *Type-2 Fuzzy Logic Systems*. 7(6), 643–658.
- Kelekci, E., & Kizir, S. (2019). Trajectory and vibration control of a flexible joint manipulator using interval type-2 fuzzy logic. *ISA Transactions*, (xxxx).
<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.04.001>
- Li, H., Sun, X., Shi, P., & Lam, H. (2015). Control design of interval type-2 fuzzy systems with actuator fault : Sampled-data control approach. *INFORMATION SCIENCES*, 302, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.01.008>
- Liang, Q., Karnik, N. N., Member, A., & Mendel, J. M. (2000). *Connection Admission Control in ATM Networks Using Survey-Based Type-2 Fuzzy Logic Systems*. 30(3), 329–339.
- Liang, Q., & Mendel, J. M. (2017a). *Equalization of Nonlinear Time-Varying Channels Using Type-2 Fuzzy Adaptive Filters*. (November 2000).
<https://doi.org/10.1109/91.873578>
- Liang, Q., & Mendel, J. M. (2017b). *Overcoming Time-Varying Co-Channel Interference Using Type-2 Fuzzy Adaptive Filters*. (January 2001).
<https://doi.org/10.1109/82.899635>
- Marín, L. G. (2016). *Introducción a Sistemas Difusos Modelo computacional Sistemas Difusos*.
- Martínez, R. F., Hernández, J. A. R., Lara, J. L. R., & Autónoma, U. (2012). *Control Difuso Tipo 2 en el Enfoque de Lyapunov Aplicado a un Servomecanismo*. 1–9.
- Mcculloch, J., & Wagner, C. (2020). On the choice of similarity measures for type-2 fuzzy sets. 510, 135–154.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.027>
- Medina, E. R. M., Romero, D. R., Nacional, I. P., & Zacatenco, S. (2018). *Controlador difuso tipo-2 para el control de velocidad de un motor de CD sujeto a un disturbio grande Speed Control of a DC Motor with a Type-2 Fuzzy Logic Controller Subject to a Large Disturbance*. 22(2), 521–536.
<https://doi.org/10.13053/CyS-22-2-2251>
- Mendel, J. M., Fellow, L., John, R. I., Liu, F., & Member, S. (2006). *Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple*. 14(6), 808–821.
- Mendel, J. M., & John, R. I. B. (2002). *Type-2 Fuzzy Sets Made Simple*. 10(2), 117–127.
- Meza-palacios, R., Aguilar-lasserre, A. A., Ureña-bogarín, E. L., Vázquez-rodríguez, C. F., Posada-gómez, R., & Trujillo-mata, A. (2017). Development of a fuzzy expert system for the nephropathy control assessment in patients with type 2 diabetes mellitus. *Expert Systems With Applications*, 72(1), 335–343.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.10.053>
- Ming, C., Yip, T., Wan, W., & Nie, M. (2019). On the difference in control performance of interval type-2 fuzzy PI control system with different FOU shapes. *Applied Soft Computing Journal*, 76, 517–532.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.12.039>
- Mo, H., Wang, F., Zhou, M., Li, R., & Xiao, Z. (2014). Footprint of uncertainty for type-2 fuzzy sets. *Information Sciences*, 272, 96–110.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.092>
- Ngan, S. (2019). A concrete and rational approach for building type-2 fuzzy subethood and similarity measures via a generalized foundational model. *Expert Systems With Applications*, 130, 236–264.

- <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.04.002>
- Nie, M., & Tan, W. W. (2008). *logic systems*. 2, 1425–1432.
- Ojha, V., Abraham, A., & Snášel, V. (2019). Heuristic design of fuzzy inference systems : A review of three decades of. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85(April), 845–864. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.010>
- Pablo, A., Evangelista, F., Luiz, G., & Serra, D. O. (2019). State space black-box modelling via Markov parameters based on evolving type-2 neural-fuzzy inference system for nonlinear multivariable dynamic systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 1–39. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.08.013>
- Raj, R., & Mohan, B. M. (2020). General structure of Interval Type-2 fuzzy PI / PD controller of Takagi – Sugeno. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87(May 2019), 103273. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.10.3273>
- Raju, S. K., & Pillai, G. N. (2016). Design and real time implementation of type-2 fuzzy vector control for DFIG based wind generators. *Renewable Energy*, 88, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.006>
- Rivera, A. V., Enrique, L., Miranda, A., Alejandro, L., Oropeza, F., & López, E. (2013). *TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA TIPO 2*. 2013.
- Rodríguez, M., & Huertas, Y. (2016). Metodología para el Diseño de Conjuntos Difusos Tipo-2 a partir de Opiniones de Expertos. *Revista Ingeniería*, 21(2), 121–137.
- Rong, N., Wang, Z., Ding, S., & Zhang, H. (2019). Interval type-2 regional switching T – S fuzzy control for time-delay systems via membership function dependent approach ☆. *Fuzzy Sets and Systems*, 374(61473070), 152–169. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.10.014>
- Roy, K., Mukherjee, A., & Kumar, D. (2019). South African Journal of Chemical Engineering Prediction of maximum oil-yield from almond seed in a chemical industry : A novel type-2 fuzzy logic approach. *South African Journal of Chemical Engineering*, 29(July 2018), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.03.001>
- Ruvalcaba, F., & Llama, M. (2016). CONTROL ADAPTABLE DIFUSO TIPO 2 APLICADO A UN SISTEMA CARRO-PENDULO. *Memorias del XVIII Congreso Mexicano de Robótica 2016*, (November), 50–55.
- Sanchez, M. A., Castillo, O., & Castro, J. R. (2015). Expert Systems with Applications Generalized Type-2 Fuzzy Systems for controlling a mobile robot and a performance comparison with Interval Type-2 and Type-1 Fuzzy Systems. *Expert Systems With Applications*, 42(14), 5904–5914. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.03.024>
- Sarabakha, A., Fu, C., & Kayacan, E. (2019). Intuit before tuning : Type-1 and type-2 fuzzy logic controllers. *Applied Soft Computing Journal*, 81, 105495. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105495>
- Shahparast, H., & Mansoori, E. G. (2019). Developing an online general type-2 fuzzy classifier using evolving type-1 rules. *International Journal of Approximate Reasoning*, 113, 336–353. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.07.011>
- Shari, A., Sasansara, S. F., & Balgori, A. A. (2016). *Neurocomputing A new control method based on type-2 fuzzy neural PI controller to improve dynamic performance of a half-bridge DC – DC converter*. 214, 718–728. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.07.011>
- Wang, H., Pan, X., Yan, J., Yao, J., & He, S. (2020). A projection-based regret theory method for multi-attribute decision making under interval type-2 fuzzy sets environment. *Information Sciences*, 512, 108–122. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.041>
- Wu, D., Member, S., Mendel, J. M., Fellow, L., The, A., & Mendel, K. (2009). *Enhanced Karnik – Mendel Algorithms*. 17(4), 923–934.
- Wu, D., & Mendel, J. M. (2019). Recommendations on designing practical interval type-2 fuzzy systems ☆. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85(February), 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.06.012>
- Wu, D., & Tan, W. W. (2005). *Computationally Efficient Type-Reduction Strategies for a Type-2 Fuzzy Logic Controller*. (June). <https://doi.org/10.1109/FUZZY.2005.1452419>
- Wu, D., & Wan, W. (2006). A simplified type-2 fuzzy logic controller for real-time control. 45(4), 503–516.
- Wu, H., & Mendel, J. M. (2002). *Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems*. 10(5), 622–639.

- Xie, S., Xie, Y., Li, F., Jiang, Z., & Gui, W. (2019). Hybrid fuzzy control for the goethite process in zinc production plant combining type-1 and type-2 fuzzy logics. *Neurocomputing*, 366, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.06.089>
- Xing, H., He, H., Hu, D., Jiang, T., & Yu, X. (2019). Computers and Geosciences An interval Type-2 fuzzy sets generation method for remote sensing imagery classification ☆. *Computers and Geosciences*, 133(July), 104287. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.008>
- Xu, J., Feng, G., Zhao, T., Sun, X., & Zhu, M. (2019). Computers and Geosciences Remote sensing image classification based on semi-supervised adaptive interval type-2 fuzzy c-means algorithm. *Computers and Geosciences*, 131(December 2018), 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.005>
- Yang, L., Liu, Z., & Chen, Y. (2019). Energy efficient walking control for biped robots using interval type-2 fuzzy logic systems and optimized iteration algorithm. *ISA Transactions*, 87, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.11.018>
- Yu, W., & Chen, H. (2014). Interval type-2 fuzzy adaptive tracking control design for PMDC motor with the sector dead-zones. *INFORMATION SCIENCES*, 288, 108–134. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.07.004>
- Zeghlache, S., Djerioui, A., Benyettou, L., Benslimane, T., & Mekki, H. (2019). Fault tolerant control for modified quadrotor via adaptive type-2 fuzzy backstepping subject to actuator faults. *ISA Transactions*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.04.034>
- Zhang, C., Zou, W., Cheng, N., & Gao, J. (2018). Trajectory tracking control for rotary steerable systems using interval type-2 fuzzy logic and reinforcement learning. *Journal of the Franklin Institute*, 355(2), 803–826. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2017.12.001>
- Zhang, H. K., Wang, Y. F., Wang, D. H., & Wang, Y. L. (2020). Adaptive robust control of oxygen excess ratio for PEMFC system based on type-2 fuzzy logic system. *Information Sciences*, 511, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.08.005>