



Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicaciones
Máster Oficial en Ingeniería Informática

Curso 2020/2021

LÓGICA DIFUSA APLICADA A VEHÍCULOS AÉREOS

Inteligencia Computacional

Breve descripción

Diseño de un control bajo lógica difusa para un vehículo aéreo

Autor

Álvaro de la Flor Bonilla y Antonio Manuel Salvat Pérez

Propiedad Intelectual

Universidad de Granada



RESUMEN

El objetivo de este proyecto es dar a conocer la aplicación de la lógica difusa para el control de vehículos aéreos.

1 ÍNDICE

Resumen	1
1 Introducción	6
1.1 Antecedentes.....	6
1.2 Objetivo	7
2 Fuerzas que actúan sobre un avión.....	8
3 Introducción a la lógica difusa	9
3.1 Operaciones básicas de la lógica difusa	10
3.1.1 Unión	10
3.1.2 Intersección	10
3.1.3 Complemento	11
3.1.4 Producto cartesiano.....	11
3.2 Relaciones difusas.....	11
3.2.1 Operador conectivo AND	11
3.2.2 Operador conectivo OR	12
3.2.3 Operador implicación THEN	12
3.3 Sistemas difusos tipo Mamdani	12
4 Lógica difusa aplicada al timón y elevador	13
4.1.1 Función Triangular.....	13
4.1.2 Función Trapecio o Pi.....	13
4.1.3 Función de saturación	13
4.1.4 Función hombro.....	14
4.2 Interfaz de difusificación	14
4.3 Base de conocimientos.....	15
4.4 Lógica de decisiones	15
4.5 Interfaz de desdifusificación.....	15
4.6 Método de centro de área o gravedad	15
4.7 Reglas básicas de control.....	15
4.8 Controlador difuso para la altura.....	16
4.9 Controlador difuso para dirección(cola)	19

5	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL	21
6	Diagrama de flujo del programa de control.....	22
7	Variantes del diseño del controlador difuso	23
7.1	Diseño del controlador difuso	23
7.2	Fusificación.....	23
7.3	Base de conocimiento	25
7.4	Motor de inferencias	28

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Muerte Osama Bin Laden	6
Ilustración 2 - APID-MK3	7
Ilustración 3 - Fuerzas del vuelo	8
Ilustración 4 - Controlador difuso	9
Ilustración 5 - Ecuación Unión	10
Ilustración 6 - Unión de conjuntos difusos.....	10
Ilustración 7 - Ecuación de intersección	10
Ilustración 8 - Intersección de conjuntos difusos	10
Ilustración 9 - Ecuación de complemento.....	11
Ilustración 10 - Complemento de un conjunto difuso.....	11
Ilustración 11 - Función de producto cartesiano.....	11
Ilustración 12 - Relación difusa U-V	11
Ilustración 13 - Operador conectivo AND	11
Ilustración 14 - Operador conectivo OR	12
Ilustración 15 - Operador THEN.....	12
Ilustración 16 - Reglas de sistemas Mamdani	12
Ilustración 17 - Función triangular	13
Ilustración 18 - Función trapecio	13
Ilustración 19 - Función de saturación	14
Ilustración 20 - Función hombro.....	14
Ilustración 21 - Particiones difusas con distinto número de términos	14
Ilustración 22 - Método del centroide para desdifusificación	15
Ilustración 23 - Arquitectura de navegación	16
Ilustración 24 - Matlab Control del elevador	16
Ilustración 25 - Reglas variable TA	17
Ilustración 26 - Variable de entrada Diffalt	17
Ilustración 27 - Variable elevador.....	18
Ilustración 28 - Reglas de control del alerón	18
Ilustración 29 - Reglas variable Ddireccion	19
Ilustración 30 - Reglas variable DTimon.....	20

Ilustración 31 - Variable de salida timón	20
Ilustración 32 - Reglas del controlador difuso del timón	21
Ilustración 33 - Diagrama de bloques del flujo del programa de control	21
Ilustración 34 - Diagrama de bloques de las reglas de pertenencia del sensor de altura	22
Ilustración 35 - Diagrama de bloques de las reglas de pertenencia de la dirección (Compás).....	22
Ilustración 36 - Conjunto de entrada para la variable error.....	23
Ilustración 37 - Conjunto de entrada para la variable d_error.....	24
Ilustración 38 - Conjunto de salida para la variable altura	24
Ilustración 39 - Regla de una sola entrada.....	25
Ilustración 40 - Valores lingüísticos.....	25
Ilustración 41 - Base de reglas.....	26
Ilustración 42 - Regla derivada del error.	26
Ilustración 43 - Reglas derivada del error.....	26
Ilustración 44 - Base de reglas FPD.....	27
Ilustración 45 - Operadores que realizarán el proceso de inferencia.....	28
Ilustración 46 - Método AND	28
Ilustración 47 - Regla de implicación.....	29
Ilustración 48 - Método de Implicación	29
Ilustración 49 - Método de agregación	29
Ilustración 50 - Configuración de los operadores en los controladores difusos.	29

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo claro de este proyecto es ser capaz de dirigir un vehículo aéreo sin la necesidad de depender de un ser humano.

Es muy importante que para este proyecto siempre seamos capaces de diferenciar un vehículo autónomo de un vehículo aéreo no tripulado. Con este proyecto se pretende lograr conseguir que el vehículo sea capaz de reaccionar autónomamente a las diferentes complicaciones a las que se puede enfrentar, es decir, la única función de un usuario humano será introducir el parámetro de destino y será función del vehículo actuar independientemente ante cualquier inclemencia que aparezca.

La idea de vuelos tripulados, aunque parezca mentira, forma parte ya de una temática de estudio con bastantes años de seguimiento y como casi ha ocurrido en muchas de las mejores invenciones, ha sido fruto de la investigación militar para conflictos bélicos.

Básicamente el sistema se basará en una unidad de navegación la cual consumirá los datos que le sirven varios tipos de sensores tales como:

1. Giroscopios
2. Acelerómetros
3. Brújula
4. GPS

En añadido, esta unidad de navegación tras procesar los datos producidos por esta lógica difusa actuará a través de serie de servomotores a los elementos principales de navegación:

1. Elevador
2. Timón de cola
3. Potencia del motor

1.1 Antecedentes

Como bien indiqué anteriormente, uno de los primeros desarrollos fue en la primera guerra mundial, empleado para entrenar a los operarios de cañones antiaéreos.

Realmente en el siglo XX con el uso de los **UAV** cuando realmente se explotó esta tecnología. Recordemos que los llamados **UAV** (*Unmanned Aerial Vehicle*) es un vehículo sin tripulación, reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido.

Uno de los casos que más nos ha impactado ha sido el de la siguiente foto:

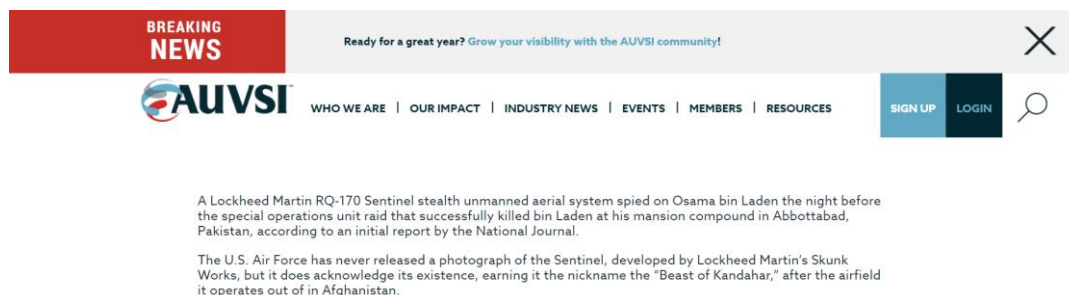


Ilustración 1 - Muerte Osama Bin Laden

Como puede ver en la noticia de la imagen superior, justo un día antes de la operación en la que se organizó su muerte, un sistema de vuelo no clasificado denotado como “*Lockheed Martin RQ-170*” realizó una batida de reconocimiento por la zona.

Por supuesto también han sido utilizados en numerosas guerras recientes como la Guerra del Golfo y en la Guerra de Bosnia.

En 2004 se diseñó un controlador para un helicóptero no tripulado APID-MK3. El controlador difuso estaba construido con un conjunto de 4 reglas y muestra resultados de simulaciones donde se controla la altitud (“*roll*”, “*yaw*” y “*pitch*”) y las velocidades en “*x*” como en “*y*” tanto con ruido como sin ruido externo.

El método empleado era tan bueno que era capaz de seguir diferentes trayectorias (circulares y rectangulares) en vuelos acrobáticos.



Ilustración 2 - APID-MK3

En 2007 se diseñó un controlador difuso para un mini helicóptero del modelo “XCell”. En este caso muestra una combinación de control, Difuso-PID. Difuso para el control de los movimientos tradicionales y PID (control simultáneo por realimentación) para controlar la altitud. En este caso los controladores difusos fueron diseñados con bases de reglas difusas sencillas de tres funciones de pertenencia.

1.2 Objetivo

Lo que realmente se intenta conseguir es lograr construir una nave que dado un objetivo sea capaz de realizarlo de forma completamente autónoma. El ejemplo más claro sería que un usuario le indicara a la aeronave unos puntos geográficos y a partir de ellos se completamente de su elección que ruta de vuelo tomar, así como el saber actuar antes los diferentes problemas que pueda encontrarse como por ejemplo inclemencias del tiempo que afecten de manera drástica al pilotaje.

En cuanto a la lógica difusa en sí, aplicada a nuestro proyecto tiene como gran diferencia frente a la lógica clásica que es capaz de reproducir los modos usuales del conocimiento, es decir, la certeza de una proposición es una cuestión de grado.

Lo más atractivo de la lógica difusa y que se amolda a la perfección a nuestro proyecto es que es capaz de aceptar flexibilidad, imprecisión y capacidad para modelar problemas no-lineales.

2 FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE UN AVIÓN

Existen cuatro fuerzas principales a las que se tiene que enfrentar un vehículo aéreo.



Ilustración 3 - Fuerzas del vuelo

En primer lugar, podemos hablar de la **sustentación** que es aquella fuerza ascendente que mantiene a la aeronave en vuelo y que se produce como efecto al Teorema de Bernoulli.

En **peso** es justo la fuerza que actúa en contra de la sustentación y que se produce como acción generada por la gravedad.

La **tracción** o empuje es la fuerza que genera el motor de la aeronave, empujan el objeto hacia el sentido contrario en el que se impulsa el aire.

Por último, podemos hablar de la **resistencia** que es justo la fuerza contraria a la tracción.

3 INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA

Básicamente, la lógica difusa se creó para tratar de imitar el comportamiento de la lógica humana y ser capaz de tomar decisiones acertadas en situaciones en la que la lógica y formulación matemática tradicional requeriría de mucha más información.

La lógica difusa está compuesta por un conjunto de principios matemáticos que se basan en diferentes grados de pertenencia, a diferencia de la lógica convencional, en la que el rango se limita al valor binario 0 y 1.

El uso de la lógica difusa en este proyecto permite poder introducir afirmaciones semejantes a la lógica humana como *"hace calor"*, en la que sabemos que hay alta temperatura, pero no conocemos exactamente cuál. De esta forma, seremos capaces de emular y automatizar el proceso que controla un piloto ya que los juicios realizados por este profesional para la toma de decisiones los realiza en forma lingüística y es esta la principal ventaja que incorpora el sistema difuso que se propone.

Otra de las principales ventajas que hemos observado que ofrece la lógica difusa es que no es necesario conocer el modelo matemático real, resumiéndolo en que tendremos una caja negra a la que le proporcionaremos entradas y generará la salida resultante. Para crear este sistema de control necesitaremos en este caso un piloto, del cual se tomará un registro de las situaciones que se le presentan y de las soluciones que él les da. Esta experiencia se traduce en reglas que usan variables lingüísticas.

Para llevar a cabo este control necesitaremos tener las entradas del sistema y éstas se van a mapear a variables lingüísticas. A este mapeo se le conoce como **difusificación**. Con estas variables se forman reglas, las cuáles serán las que regirán la acción de control que será la salida del sistema.

Un control difuso consta de tres partes:

1. **Inferencia (reglas).** Reglas que dictan la acción de control que se va a tomar, derivadas de un experto. Es decir, proceso por el cual se derivan conclusiones a partir de premisas. Estructuradas en forma de relaciones.
2. **Difusificador.** Es la unión entre las entradas reales y las difusas. Las entradas necesitan mapearse a una forma en que las reglas se pueden utilizar.
3. **Desfusificador.** Toma el valor difuso y genera una salida real.

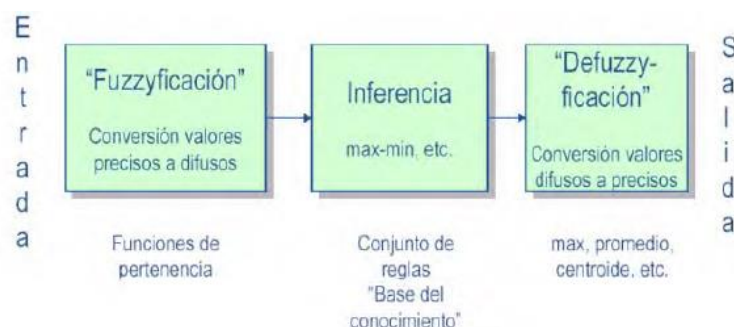


Ilustración 4 - Controlador difuso

3.1 Operaciones básicas de la lógica difusa

Dados dos conjuntos difusos A y B en un mismo universo X con sus respectivas funciones de pertenencia μ_A y μ_B se definen las siguientes operaciones básicas:

3.1.1 Unión

La función de pertenencia de la unión de A y B se define como la ecuación:

$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

Ilustración 5 - Ecuación Unión

Y su representación gráfica sería:

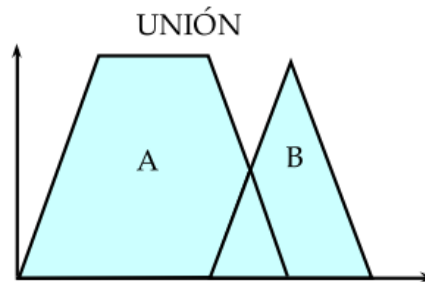


Ilustración 6 - Unión de conjuntos difusos

3.1.2 Intersección

La función de pertenencia de la intersección de A y B se define como:

$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

Ilustración 7 - Ecuación de intersección

Y su representación gráfica sería:

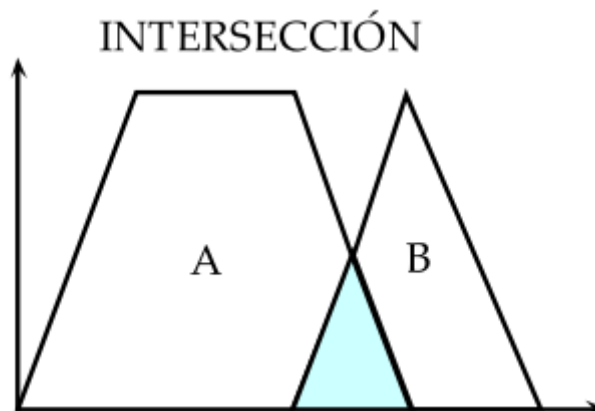


Ilustración 8 - Intersección de conjuntos difusos

3.1.3 Complemento

La función de pertenencia del complemento de A se define como:

$$\mu_{\overline{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Ilustración 9 - Ecuación de complemento

Y su representación gráfica sería:

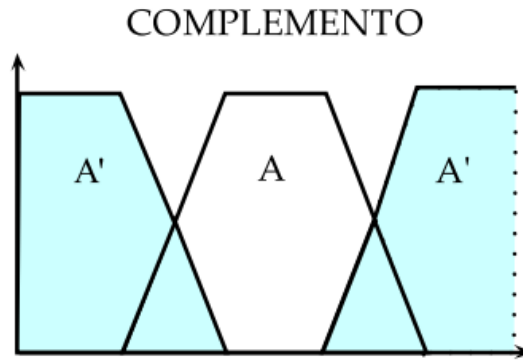


Ilustración 10 - Complemento de un conjunto difuso

3.1.4 Producto cartesiano

Dados los conjuntos difusos A_1, \dots, A_n con universos X_1, \dots, X_n se define el producto cartesiano con la siguiente función de pertenencia:

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(x_1, \dots, x_n) = \min\{\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n)\}$$

según (Mamdani, 1977),

Ilustración 11 - Función de producto cartesiano

3.2 Relaciones difusas

Una relación difusa representa el grado de presencia o ausencia de una asociación. Supongamos U y V dos universos, la relación difusa $R(U, V)$ es un conjunto difuso en el espacio producto $U \times V$, es decir:

$$R(U, V) = \{((x, y), \mu_R(x, y)) | (x, y) \in U \times V\}$$

Ilustración 12 - Relación difusa U-V

3.2.1 Operador conectivo AND

Si tenemos dos conjuntos difusos $A \subset U$ y $B \subset V$, y un par $(x, y) \in U \times V$, el conectivo AND en qué medida se puede implementar $x \in A$ e $y \in B$ de la siguiente manera:

$$\mu_{AND}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

Ilustración 13 - Operador conectivo AND

3.2.2 Operador conectivo OR

El conectivo OR, muestra la medida en que $x \in A$ ó $y \in B$ y se define de la siguiente manera:

$$\mu_{OR}(x, y) = \max(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

Ilustración 14 - Operador conectivo OR

3.2.3 Operador implicación THEN

Existen muchas formas de definir una implicación, pero nos mostraremos en la dada según Mamdani.

$$\mu_M(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad \text{Mamdani}$$

Ilustración 15 - Operador THEN

Cuando μ_A y μ_B solo toman los valores 0 y 1, es compatible con la implicación de la lógica clásica (correspondiendo 0 a falso y 1 a verdadero),

3.3 Sistemas difusos tipo Mamdani

Hay varios tipos de sistemas difusos, pero nos centraremos en el de tipo Mamdani ya que es el usado en este documento. Un sistema tipo Mamdani está compuesto por una base de conocimiento, un motor de inferencias y unas interfaces de fusificación y defusificación, estos sistemas tienen una serie de características:

- Pueden ser usados en aplicaciones del mundo real, ya que manejan entradas y salidas reales.
- Proporcionan un marco natural para la inclusión de conocimiento en forma de las reglas lingüísticas.
- Tienen gran libertad a la hora de elegir las interfaces de fusificación y defusificación.

Las reglas de este sistema son de la forma:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y..... } X_n \text{ es } A_n \text{ ENTONCES } Y \text{ es } B$$

Ilustración 16 - Reglas de sistemas Mamdani

Donde las X_1 y Y son números en lugar de términos lingüísticos y A_1 y B son conjuntos difusos sin interpretación directa.

4 LÓGICA DIFUSA APLICADA AL TIMÓN Y ELEVADOR

4.1.1 Función Triangular

Para el proyecto que hemos utilizado se ha utilizado esta función tanto en la etapa de “DIFUSICADOR” (entradas) como en la etapa de “DEFUSIFICADOR” (salidas).



Ilustración 17 - Función triangular

La función triangular tiene una pendiente positiva constante hasta que alcanza su máximo en la unidad, momento en el que vuelve a decrecer de manera uniforme.

La función triangular es muy adecuada para aquellas situaciones en las que se tiene un valor óptimo central, el cual se va perdiendo conforme se aleja de él.

Además de la función triangular, se han destacado algunas otras funciones que podrían haberse utilizado como, pero que presentaron peor rendimiento:

4.1.2 Función Trapecio o Pi

La función por usar no solo tiene un valor unitario, sino que tiene una franja de valores que varían dependiendo de los fenómenos existentes. La función trapecio se usa cuando tenemos un rango de valores óptimos que observan a su alrededor condiciones que no son las adecuadas.

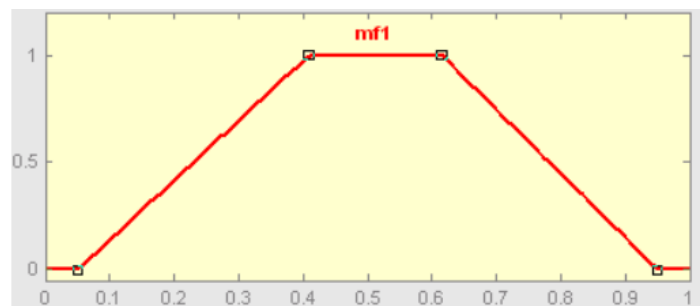


Ilustración 18 - Función trapecio

4.1.3 Función de saturación

Es la función más sencilla para usar. Su valor es 0 hasta un punto concreto que crece con pendiente constante hasta alcanzar el valor de 1. Este tipo de funciones describe situaciones donde alcanzamos un nivel máximo a partir de un punto.

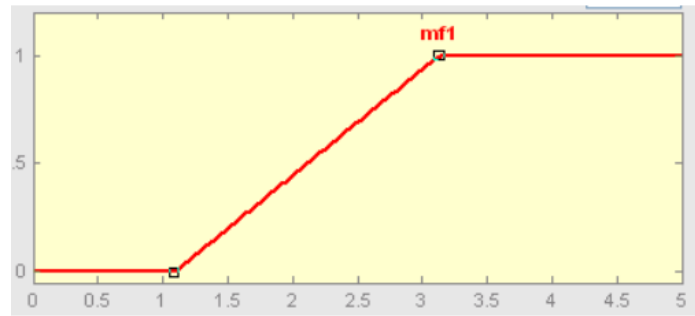


Ilustración 19 - Función de saturación

4.1.4 Función hombro

Es lo opuesto a la función anterior, en este caso se inicia con un valor igual a 1 y desciende constantemente hasta alcanzar el valor 0. Esta función es usada cuando el grado de pertenencia es completo en valores pequeños y decae cuando la variable aumenta.

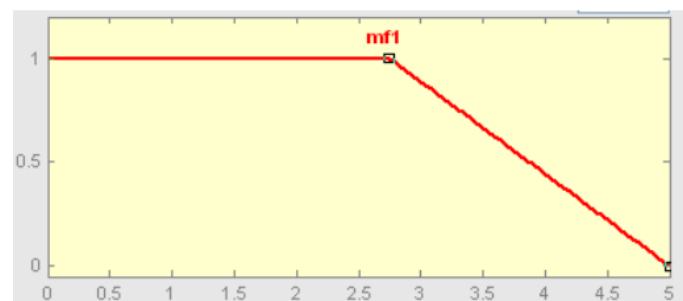


Ilustración 20 - Función hombro

4.2 Interfaz de difusificación

Mide los valores de entrada para realizar un mapeo que transforme el rango de valores a un universo difuso. En concreto en la difusificación se convierten los valores de entrada en valores lingüísticos.

Una variable lingüística se suele asociar a un grupo de términos. Para saber cuantos términos necesitamos empleamos particiones difusas. A su vez el número de conjuntos de términos determina que complejidad tendrá el controlador.

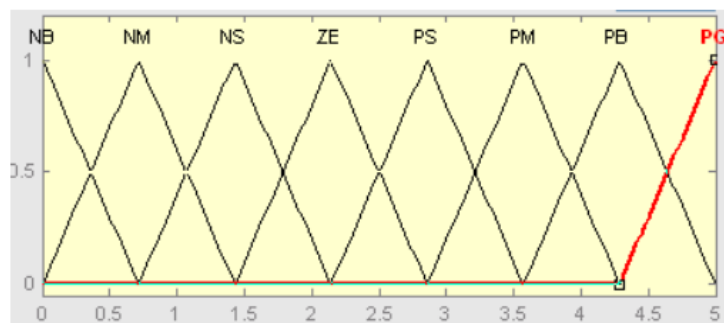


Ilustración 21 - Particiones difusas con distinto número de términos

4.3 Base de conocimientos

Esta base contiene toda la información de la aplicación que queremos controlar, como también los objetivos de dicho controlador. Consta de una base de datos y otra base para las reglas lingüísticas que usamos en el mapeo de variables. En la base de datos tenemos las definiciones para establecer las reglas y la manipulación de datos difusos.

4.4 Lógica de decisiones

La lógica de decisiones es el núcleo del controlador difuso. Con ella simulamos la lógica que una persona utilizaría al tomar una decisión basándonos en conceptos difusos usando las reglas que nos otorga la base de conocimientos.

4.5 Interfaz de desdifusificación

Al contrario que la anterior interfaz explicada la interfaz de desdifusificación se encarga del mapeo de los rangos de valores para las variables de salida.

4.6 Método de centro de área o gravedad

Este método es el usado para encontrar el valor de salida en el controlador. En este caso se usará el diseño con base en Mandani de la siguiente forma:

- 1- Entendemos por error a la diferencia entre el valor que deseamos y el valor real de la variable del controlador. $\epsilon = V_{deseada} - V_{real}$.
- 2- Posteriormente establecemos un conjunto de reglas según las condiciones seleccionadas. Y la interferencia se definirá como: $XT(x, z) = \forall y \in Y (XR(x, y) \wedge Xs(y, z))$.
- 3- Por último, seleccionamos las funciones de pertenencia de la desdifusificación y el método que usaremos para encontrar el valor de salida, para ello usaremos el método del centroide.

$$\frac{\sum \mu(x) \cdot x}{\sum \mu(x)} (\text{discreto}) \qquad \frac{\int \mu(x) \cdot x dx}{\int \mu(x) dx} (\text{continuo})$$

Ilustración 22 - Método del centroide para desdifusificación

4.7 Reglas básicas de control

Nuestro objetivo es que la lógica difusa sea capaz de guiar al avión de forma suave a lo largo de su recorrido. Las reglas del control difuso tomarán una forma muy similar a la siguiente:

IF Rad_E IS Positivo AND Rad_dE IS Zero THEN dtita Poco_Izquierda

IF Rad_E IS NearZero AND Rad_dE IS Zero THEN dtita Derecho

IF Rad_E IS Negativo AND Rad_dE IS Zero THEN dtita Poco_Derecha

Como puede comprobar también pueden entrar en juego errores como “Rad_E”. Todas estas reglas, adjetivos y sustantivos deben ser definidos para el proceso que se desea controlar y se debe configurar de forma que se asemeje al máximo a la acción que tendría que imitar un operador según las condiciones de las entradas y salidas.

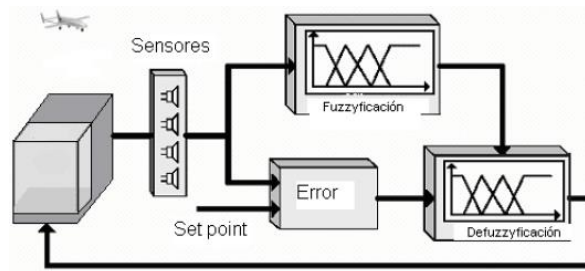


Ilustración 23 - Arquitectura de navegación

4.8 Controlador difuso para la altura

En este apartado pretendemos explicar cómo controlar por medio de la lógica difusa las variables del error en la altitud y la tasa de ascenso, es decir, controlar por medio de la lógica difusa el control de bajar o elevar el avión. Respecto al ascenso podemos ver tres zonas, la primera sería la más cercana al valor 0 y la usamos para aproximarnos a la referencia, la zona trapezoidal se usa para movimientos entre dos altitudes distintas, la zona más externa es la que debemos intentar evitar ya que sería una zona inestable para el control del avión. El ángulo que el elevador puede subir o bajar es de 10° .

Variables:

- Ta: Tasa de ascenso.
- Diffalt: Es la diferencia entre la altitud medida y su referencia.
- AN: variación Alta y negativa de altura
- BN: variación Baja y negativa de altura
- Z: variación pequeña de altura
- BP: variación Baja y positiva de altura
- AP: variación Alta y positiva de altura

A continuación, se muestra una serie de capturas de la simulación que realizaron en el artículo en Matlab. En la primera figura vemos dos entradas, TA y Diffalt, y una salida, que sería el elevador del avión.

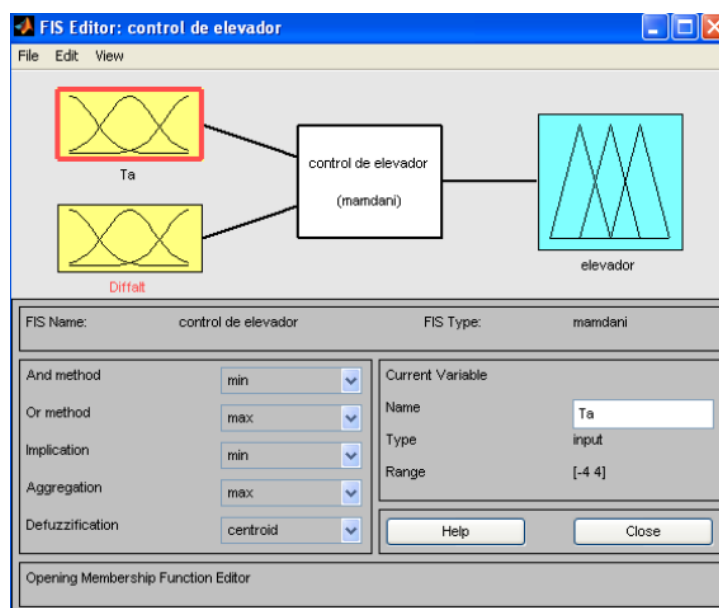


Ilustración 24 - Matlab Control del elevador

En la siguiente muestra se refleja 5 reglas que han sido utilizadas que se usan en la variable de entrada TA. Dos corresponden a la función trapecio y se utiliza cuando existen rangos de valores óptimos. Otra sería una función triangular en la parte central y en los extremos tenemos dos funciones, a la derecha una de saturación que describe cuando el valor máximo es de 4 (es la rapidez de subida y bajada del avión) y otra a la izquierda que sería una función hombro que muestra el grado de pertenencia en contraparte a la función de saturación.

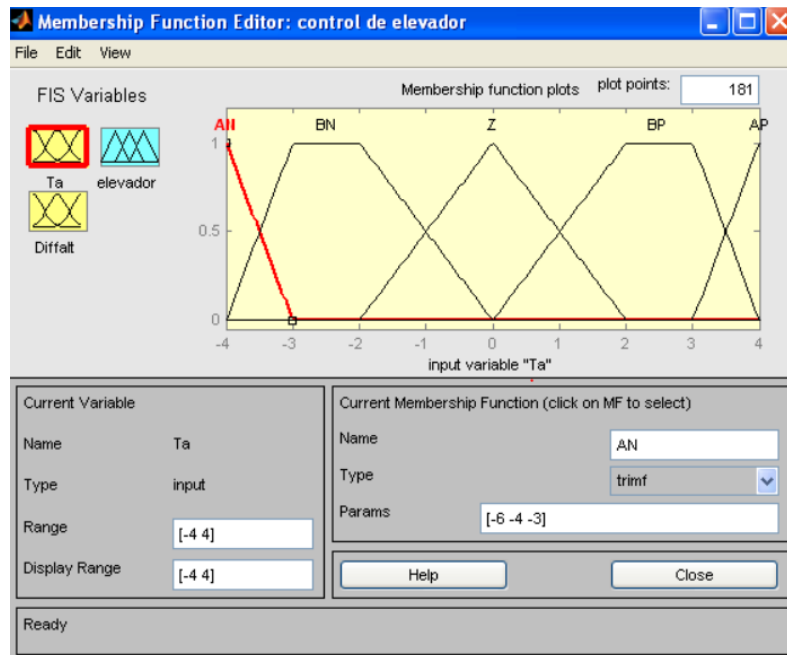


Ilustración 25 - Reglas variable TA

Para la variable de entrada Diffalt existen 5 funciones, 3 serían de tipo triangulares donde el valor óptimo son los puntos centrales, una de saturación y otra función hombro.

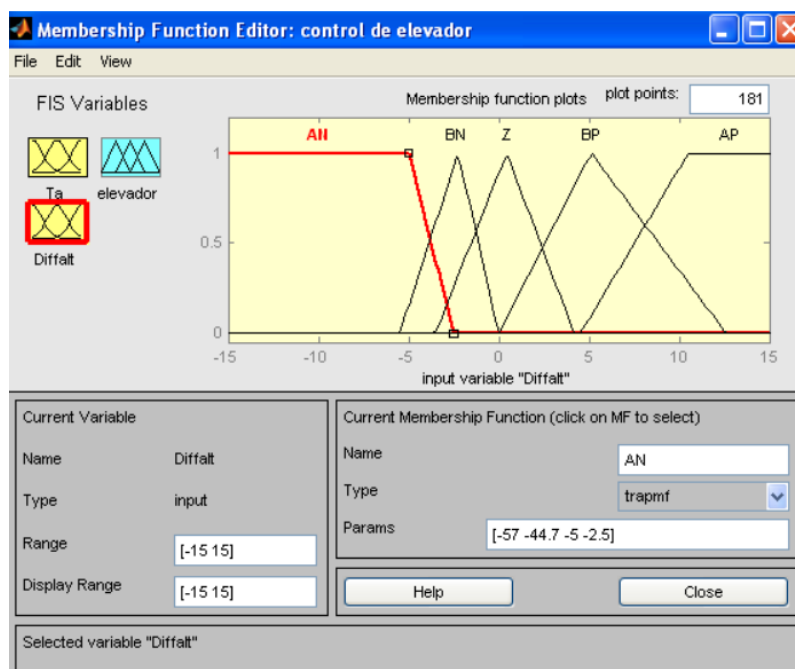


Ilustración 26 - Variable de entrada Diffalt

La salida sería la variable elevador que como hemos dicho puede variar entre 10 y -10 grados.

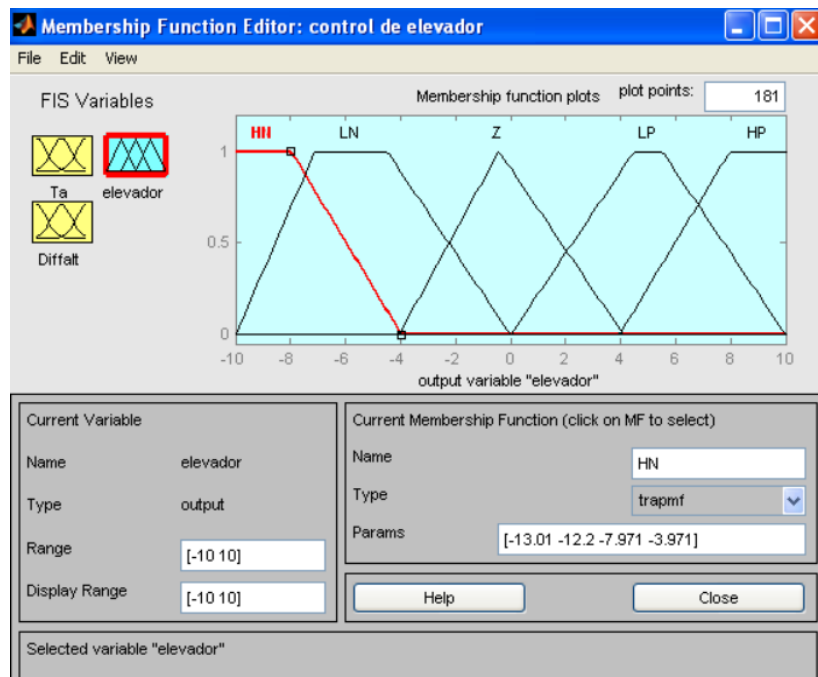


Ilustración 27 - Variable elevador

En total las reglas que forma la parte de la lógica difusa para controlar el alerón son 25.

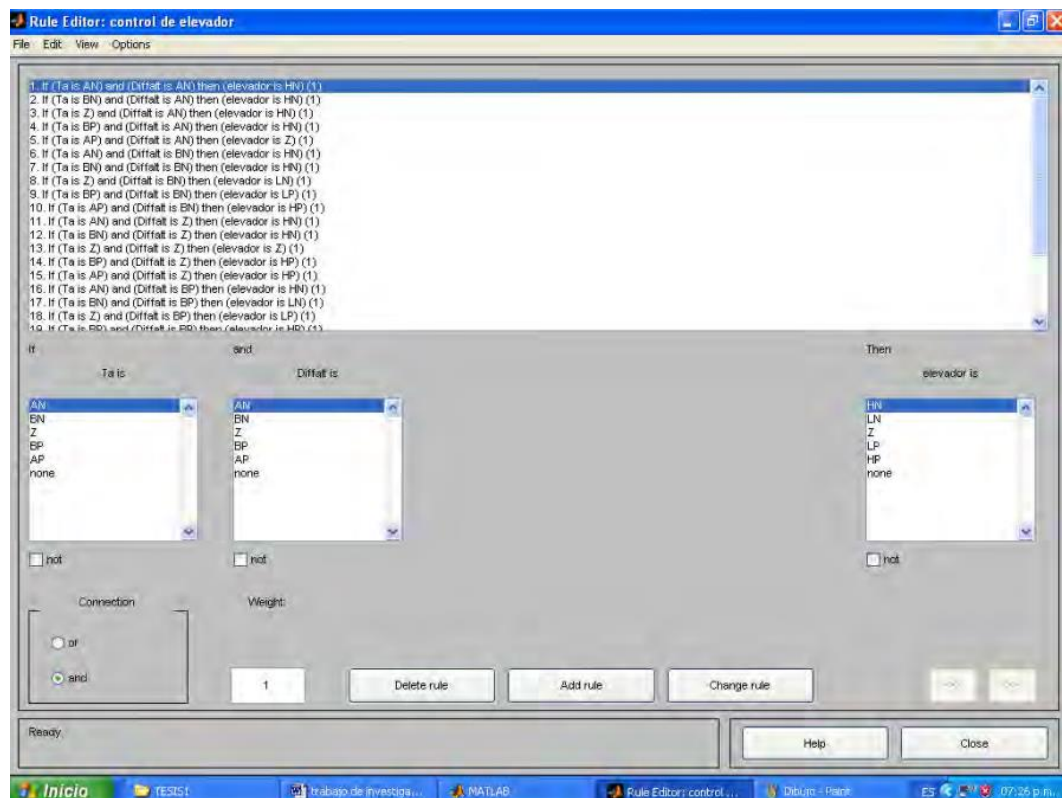


Ilustración 28 - Reglas de control del alerón

4.9 Controlador difuso para dirección(cola)

Para controlar la dirección del avión también se ha establecido un grupo de reglas y condiciones basado en la lógica difusa. Los ángulos de movimiento del timón de cola son de 8 a -8 grados.

Variables de entrada:

- DDirección: Razón de cambio de dirección.
- Dtimón: Es la diferencia entre la dirección medida y su la referencia.

Resto de variables:

- AN: variación Alta y negativa de timón.
- BN: variación Baja y negativa de timón.
- Z: variación pequeña de timón.
- BP: variación Baja y positiva de timón.
- AP: variación Alta y positiva de timón.

En la variable DDirección se aprecian 5 funciones. Una triangular, dos trapezios, una de saturación y otra función hombro.

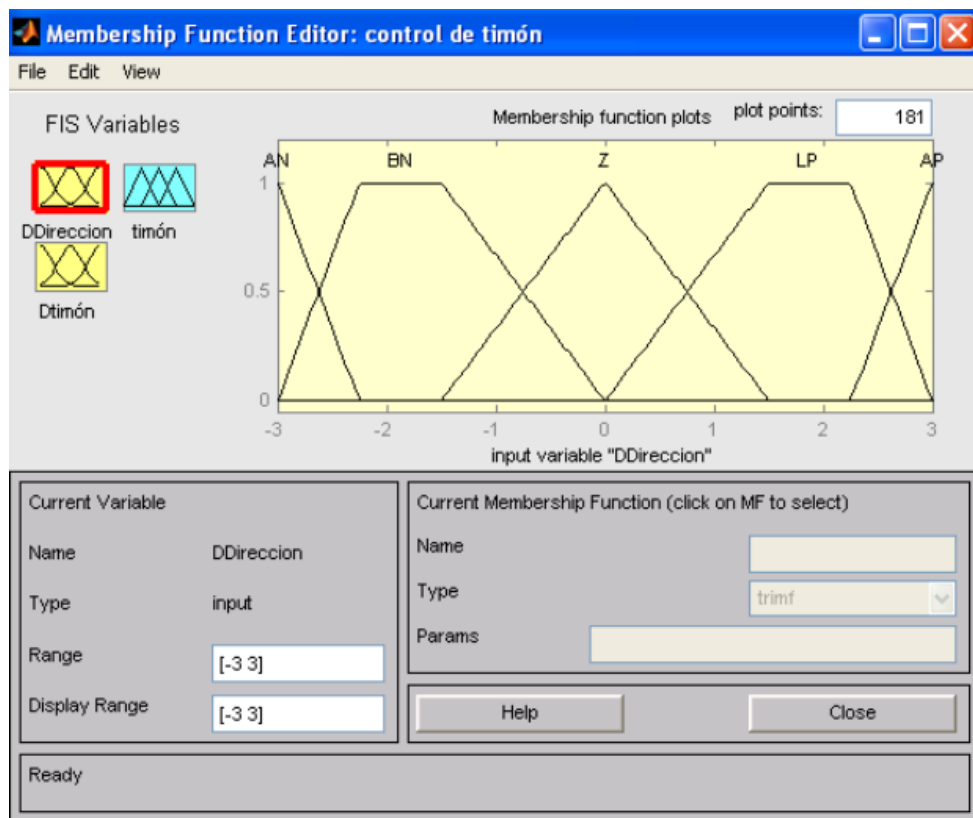


Ilustración 29 - Reglas variable Ddireccion

La variable DTimon indica la posición del servo en un momento concreto. Esta variable no puede tener más de 8 grados ya que el avión entraría en una situación fuera de control.

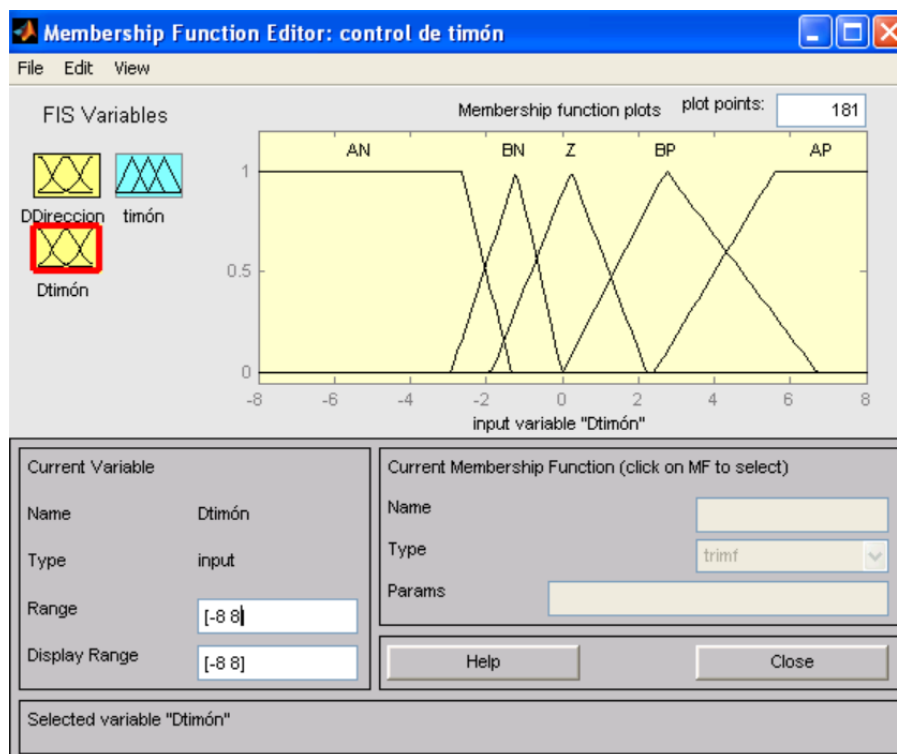


Ilustración 30 - Reglas variable DTimon

La salida del controlador difuso es la dirección del timón que sería el movimiento que proporciona el giro de la aeronave. El ángulo del movimiento del timón de cola es de 8 a -8 grados.

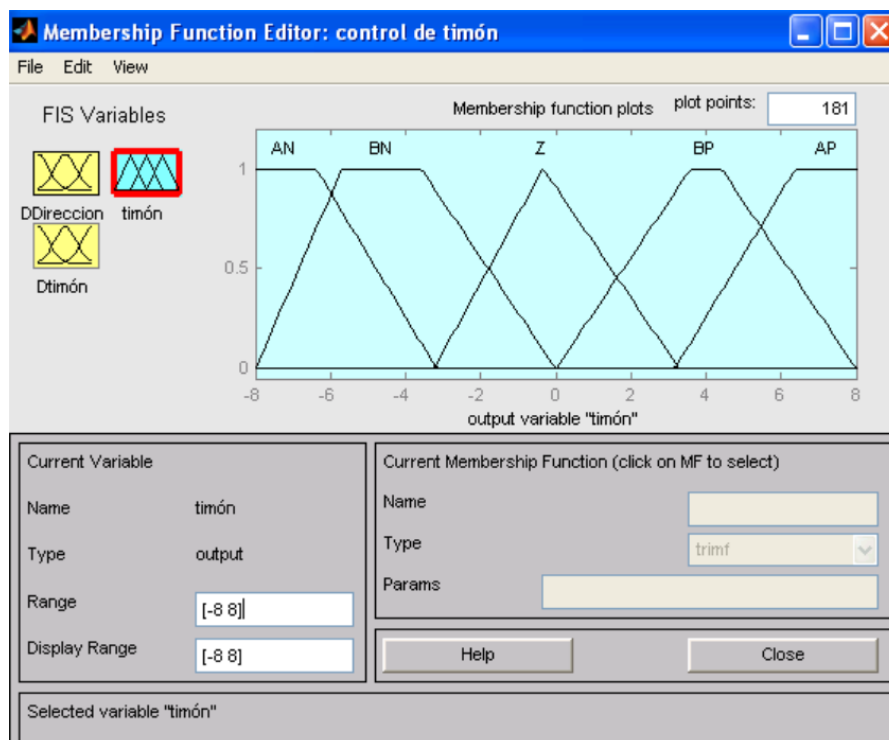


Ilustración 31 - Variable de salida timón

Las reglas que controlan el controlador difuso son casi 25 en este caso.

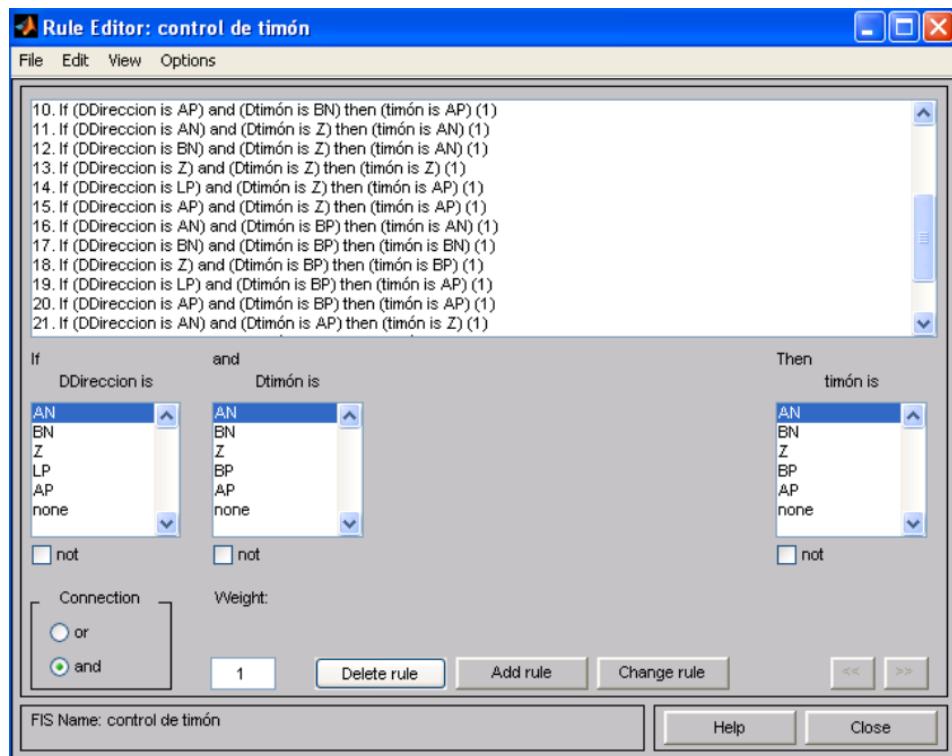


Ilustración 32 - Reglas del controlador difuso del timón

5 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL

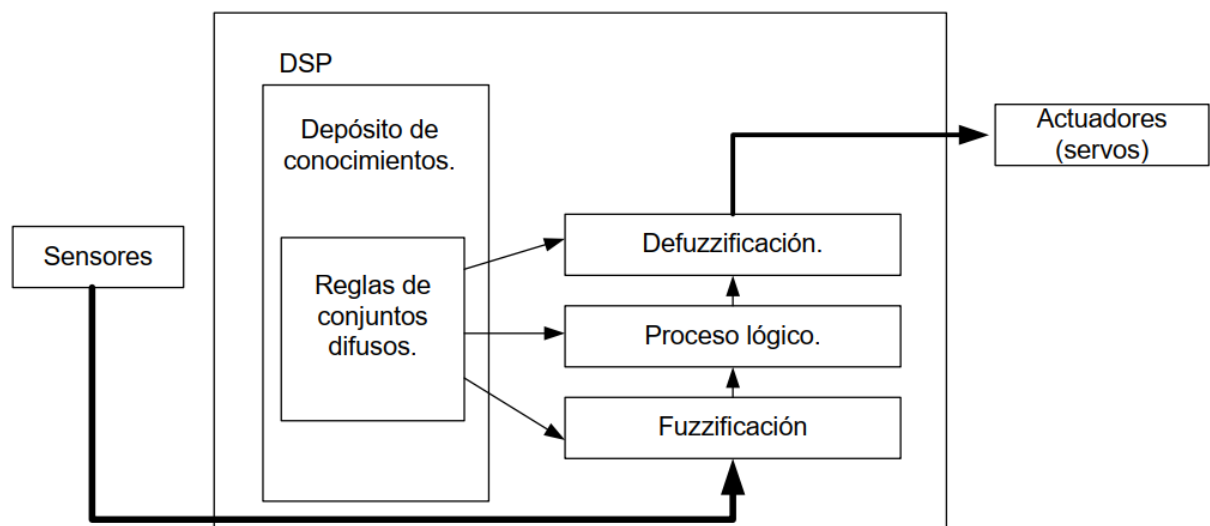


Ilustración 33 - Diagrama de bloques del flujo del programa de control

6 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL

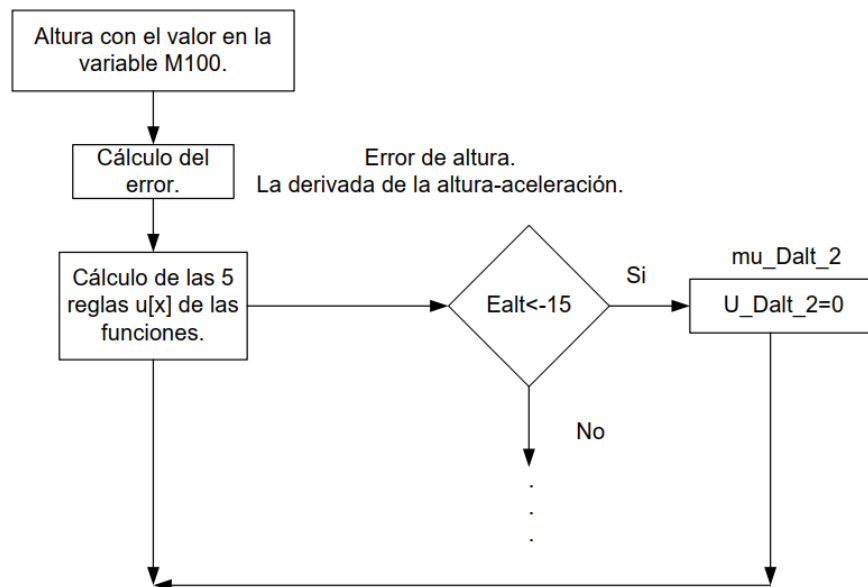


Ilustración 34 - Diagrama de bloques de las reglas de pertenencia del sensor de altura

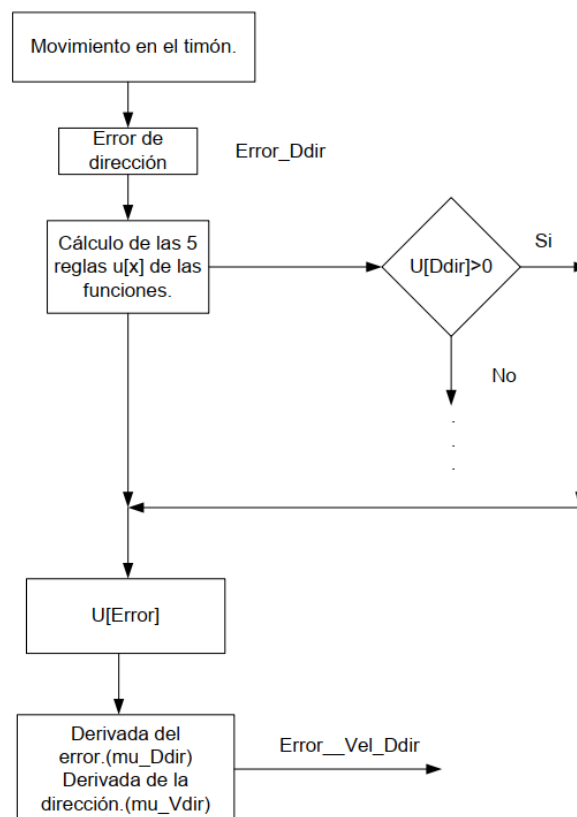


Ilustración 35 - Diagrama de bloques de las reglas de pertenencia de la dirección (Compás)

7 VARIANTES DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO

Aunque para este documento nos hayamos basado en el estudio de un autor, existe multitud de estudios y proyectos relacionados, por ello para no tener como referencia un único artículo vamos a mostrar las opciones usadas por otros investigadores para la realización del controlador difuso. Aunque anteriormente se haya explicado muchos bloques que aquí se darán, se hará un breve resumen de cada uno de ellos para tener el contenido siempre presente.

7.1 Diseño del controlador difuso

En este artículo también se toma como esquema general la lógica difusa de tipo Mamdani, como en el anterior también se usa la herramienta “Fuzzy Logic” de Matlab.

7.2 Fusificación

En este bloque se realiza un escalado de los valores de entrada para convertirlos en los valores típicos de un sistema y una “fusificación” que convierte los datos de entrada en los valores lingüísticos adecuados para manipular las entidades difusas, para ello se crean funciones de pertenencia. Las funciones de pertenencia más comunes son triangulares, trapezoidales, singleton, sigmoideas y gaussianas.

La literatura recomienda trabajar con cinco conjuntos, ya que es suficiente para cubrir todo el universo de entrada.

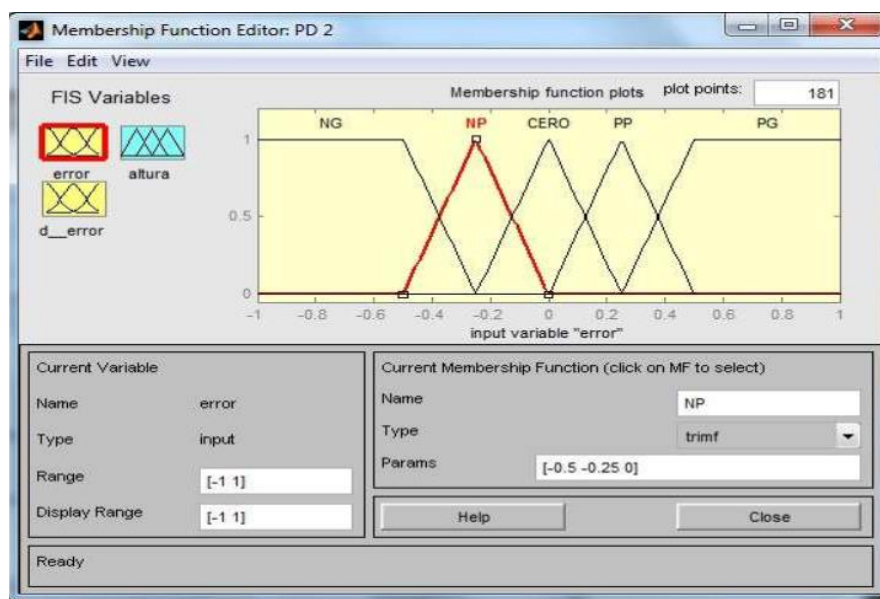


Ilustración 36 - Conjunto de entrada para la variable error

Dos de los conjuntos deben ser abiertos a los extremos para garantizar que cualquier dato que entre pueda ser convertido en un valor lingüístico tal es el caso de las funciones NG y PG que vemos en la anterior figura.

En este caso la variable que se está trabajando es la señal error, la cual se obtiene de la resta entre la señal del setpoint $r(t)$, que sería los valores de referencia, y la señal del sensor $y(t)$, que serían los valores reales.

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

Se definen las siguientes etiquetas lingüísticas para cada conjunto donde el error puede tomar valores como:

- NG: Negativo grande
- NP: Negativo pequeño
- CERO: cero
- PP: Positivo pequeño
- PG: Positivo grande

La variable de entrada d_error funciona igual que la variable error a excepción de que resulta de calcular la derivada a la señal de error. La derivada del error indica la tendencia del error, por lo que podemos usarlo como forma de predicción.

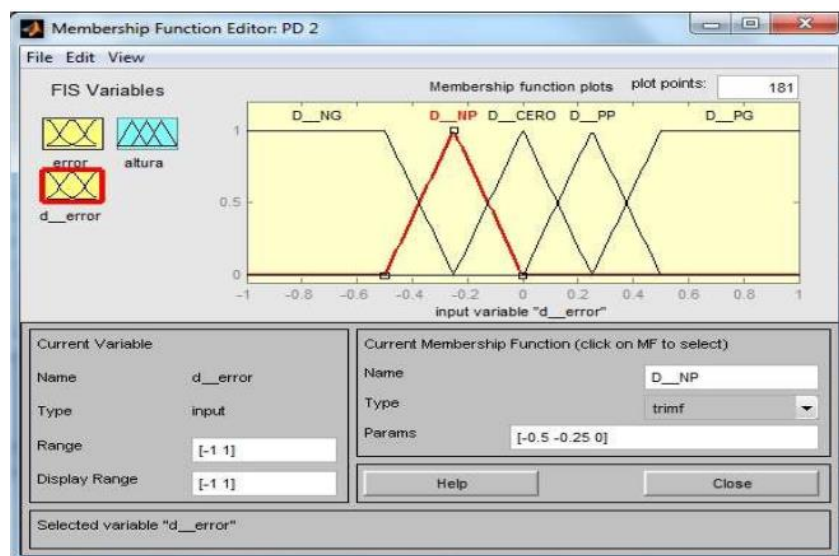


Ilustración 37 - Conjunto de entrada para la variable d_error

Para la salida, la literatura también recomienda 5 conjuntos, pero en este caso deben ser cerrados para determinar exactamente cuál debe ser la salida ante cualquier entrada.

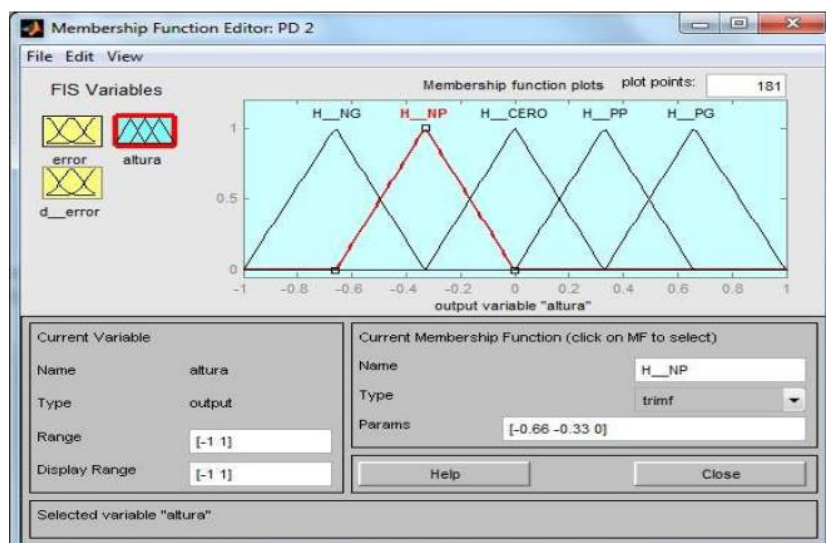


Ilustración 38 - Conjunto de salida para la variable altura

7.3 Base de conocimiento

Como ya vimos la base de conocimiento esta formada por una base de datos que recoge la definición de las funciones de pertenencia de las entradas y por una base de reglas que caracteriza y resume la política y objetivos del control.

La base de reglas es de tipo *modus ponens generalizado*, es decir que mediante un conjunto de reglas somos capaces de elaborar unas conclusiones a partir de hechos observados.

Hay varias formas de obtener reglas:

- Basados en los conocimientos de un experto, generalmente a través de una
- verbalización introspectiva de dicho conocimiento o a partir de cuestionarios cuidadosamente organizados.
- Basados en las acciones de control de un operador en función de los datos de
- entrada-salida observados.
- Basados en un modelo difuso del proceso.
- Basados en aprendizaje (controladores auto-organizados).

En este trabajo se basan en las acciones de control de un operador ya que nuestro objetivo es diseñar un controlador de tipo PID y necesitamos trabajar con el error y su derivada.

En el caso de que tuviéramos una sola entrada, la regla sería de la siguiente manera:

"Si el error es positivo pequeño ENTONCES la salida es Positiva Pequeña"

$$\text{Si } e \in PP, \text{ entonces } U \in PP$$

Ilustración 39 - Regla de una sola entrada

Si el error es positivo pequeño quiere decir que la señal del sensor aun no ha llegado a la referencia, por lo que se le aplicaría una señal de control Positiva Pequeña, si fuera Positivo grande significa que tampoco ha llegado a la referencia, pero necesita más acción de control. Siguiendo esta lógica se evalúan todos los posibles valores lingüísticos.

$$\begin{aligned} \text{SI } e = NG \text{ ENTONCES } U &= NG \\ \text{SI } e = NP \text{ ENTONCES } U &= NP \\ \text{SI } e = Z \text{ ENTONCES } U &= Z \\ \text{SI } e = PP \text{ ENTONCES } U &= PP \\ \text{SI } e = PG \text{ ENTONCES } U &= PG \end{aligned}$$

Ilustración 40 - Valores lingüísticos

Así generaríamos la base de reglas donde e es la señal de error y U es la señal de salida. Así se generaría la base de reglas:

e	NG	NP	Z	PP	PG
U	NG	NP	Z	PP	PG

Ilustración 41 - Base de reglas

Para los controladores difusos proporcional-derivativo se estableció la base de reglas similar, pero considerando la derivada del error, por ejemplo si el error es negativo grande y la derivada del error es positiva grande, la señal del sensor es mucho mayor que la señal de referencia entonces es necesario aplicar a la palanca una fuerza en sentido del valor de referencia en este caso negativa, esto nos da la regla:

"Si error es NG y la derivada del error es PG , ENTONCES, la salida es NG "
 Si $e \in NG$ y $d_e \in PG$, entonces, $U = NG$

Ilustración 42 - Regla derivada del error.

Si el error es negativo pequeño y la derivada del error es negativa pequeña significa que la señal del sensor es un poco mayor que la referencia y se acerca a esta, por lo que necesitamos aplicar una pequeña fuerza a la palanca hacia el valor de referencia. Esto nos da la regla:

"Si error es NP Y la derivada del error es NP , ENTONCES, la salida es NP "
 Si $e \in NP$ y $d_e \in NP$, entonces, $U = NP$

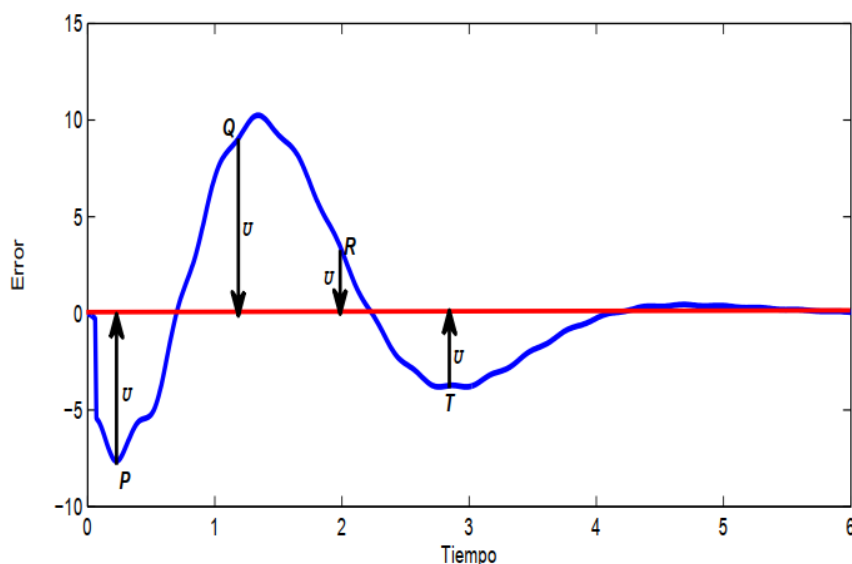


Ilustración 43 - Reglas derivada del error

El resultado de la evaluación de todos los posibles valores lingüísticos es:

- Si (e es NG) " Y "(d_e es NG) ENTONCES (U es NG)
- Si (e es NG) " Y "(d_e es NP) ENTONCES (U es NG)
- Si (e es NG) " Y "(d_e es Z) ENTONCES (U es NG)
- Si (e es NG) " Y "(d_e es PP) ENTONCES (U es NP)
- Si (e es NG) " Y "(d_e es PG) ENTONCES (U es NG)
- Si (e es NP) " Y "(d_e es NG) ENTONCES (U es NG)
- Si (e es NP) " Y "(d_e es NP) ENTONCES (U es NP)
- Si (e es NP) " Y "(d_e es Z) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es NP) " Y "(d_e es PP) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es NP) " Y "(d_e es PG) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es Z) " Y "(d_e es NG) ENTONCES (U es NP)
- Si (e es Z) " Y "(d_e es NP) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es Z) " Y "(d_e es Z) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es Z) " Y "(d_e es PP) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es Z) " Y "(d_e es PG) ENTONCES (U es PP)
- Si (e es PP) " Y "(d_e es NG) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es PP) " Y "(d_e es NP) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es PP) " Y "(d_e es Z) ENTONCES (U es Z)
- Si (e es PP) " Y "(d_e es PP) ENTONCES (U es PP)
- Si (e es PP) " Y "(d_e es PG) ENTONCES (U es PG)
- Si (e es PG) " Y "(d_e es NG) ENTONCES (U es PP)
- Si (e es PG) " Y "(d_e es NP) ENTONCES (U es PP)
- Si (e es PG) " Y "(d_e es Z) ENTONCES (U es PG)
- Si (e es PG) " Y "(d_e es PP) ENTONCES (U es PG)
- Si (e es PG) " Y "(d_e es PG) ENTONCES (U es PG)

Por lo que quedaría la siguiente base de reglas:

$de \backslash e$	NG	NP	Z	PP	PG
NG	NG	NG	NP	Z	PP
NP	NG	NP	Z	Z	PP
Z	NG	Z	Z	Z	PG
PP	NP	Z	Z	PP	PG
PG	NG	Z	PP	PG	PG

Ilustración 44 - Base de reglas FPD

7.4 Motor de inferencias

Este motor representa el núcleo de la lógica difusa. Para realizar la inferencia se deben definir los operadores que hacen el proceso.

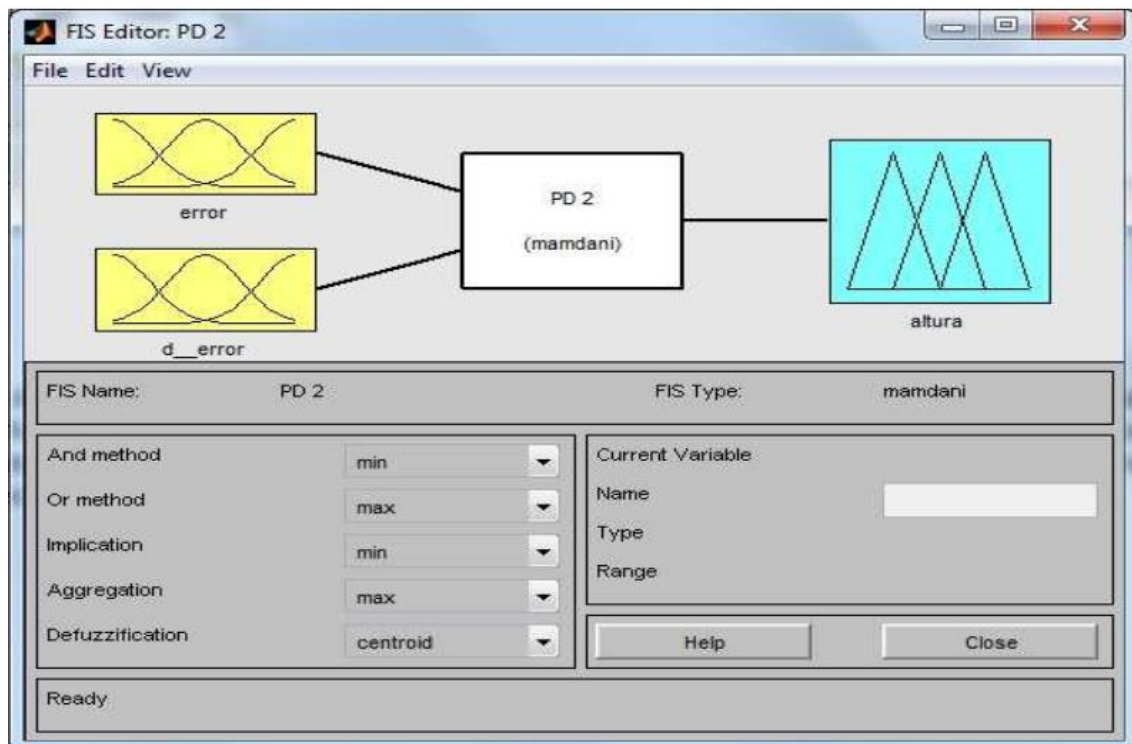


Ilustración 45 - Operadores que realizarán el proceso de inferencia

El motor de inferencias evalúa la entrada y la fusifica donde se tiene el método *AND* (mínimo).

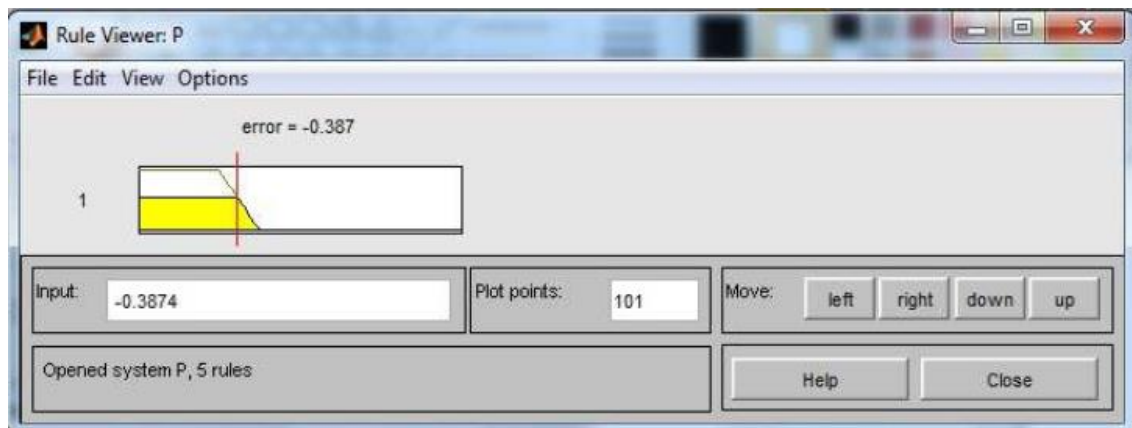


Ilustración 46 - Método AND

Como observamos en la figura la entrada es -0.387, un singleton fusifica la entrada en el conjunto NG y se obtiene el conjunto recortado sólido amarillo. Una vez se tiene el conjunto difuso para el cual se define el método de implicación.

Para este caso de implicación la regla es:

Si $(e \text{ es } Z) \text{ "Y"} (d_e \text{ es } PG) \text{ ENTONCES } (U \text{ es } PP)$

Ilustración 47 - Regla de implicación

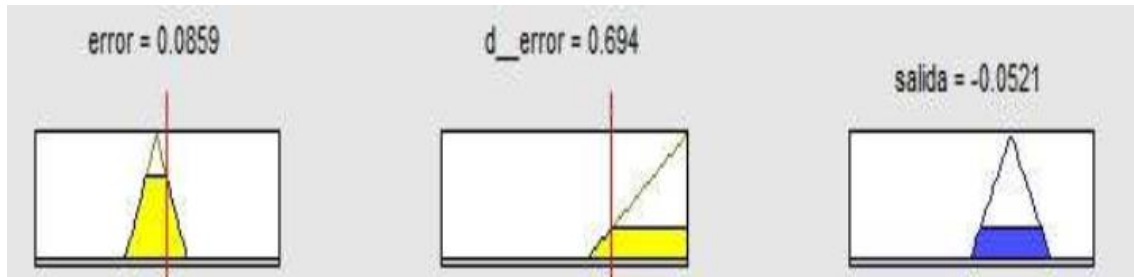


Ilustración 48 - Método de Implicación

Donde se observa que el valor reflejado en el conjunto difuso de salida es el valor mínimo de grado de pertenencia entre los conjuntos error y d_error.

Una vez se evalúan todas las reglas de acuerdo con los valores de entrada, se construye un conjunto de salida, para lo cual se utiliza el método de agregación.

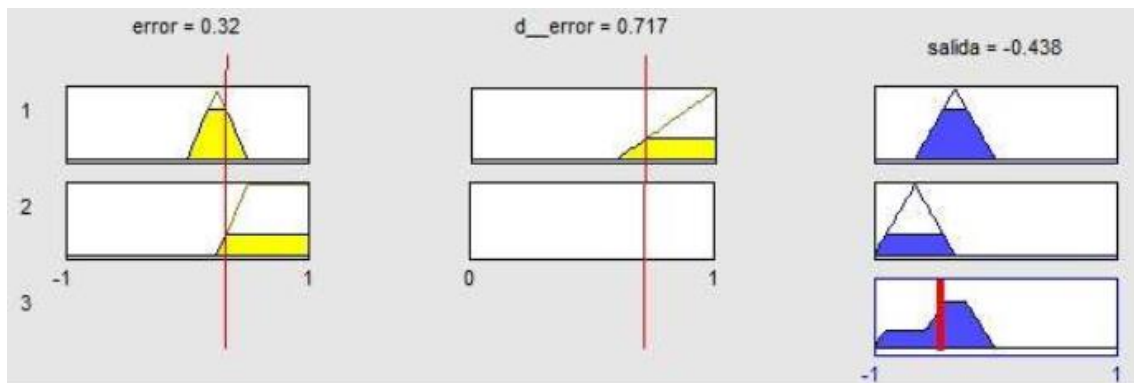


Ilustración 49 - Método de agregación

Se toman los valores máximos en los conjuntos de salida y contruimos el conjunto difuso de salida. Tras esto entramos en la etapa defusificadora para obtener un valor discreto en la salida. El método usado para la defusificación es el centro de gravedad.

Método And	=	mín
Método Or	=	máx
Implicación	=	mín
Agregación	=	máx
Defusificación	=	<i>centroide</i>

Ilustración 50 - Configuración de los operadores en los controladores difusos.

Se diseñaron dos tipos de controladores, controlador difuso proporcional y controlador difuso proporcional derivativo.