



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIEROS EN ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: “CONTROL DE ESTABILIZACIÓN DE UN QUADCOPTER  
BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA ENTORNOS CON  
PERTURBACIONES TIPO RÁFAGAS DE VIENTO MODERADAS”**

**AUTORES:**

**CHICA RUALES, JOSÉ ANTONIO**

**NAULA GARCÍA, ERIK ANDRÉS**

**DIRECTOR: DR. AGUILAR CASTILLO, WILBERT GEOVANNY**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "*CONTROL DE ESTABILIZACIÓN DE UN QUADCOPTER BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA ENTORNOS CON PERTURBACIONES TIPO RÁFAGAS DE VIENTO MODERADAS*", fue realizado por los señores *Chica Rúales, José Antonio* y *Naula García, Erik Andrés* y fue culminado en su totalidad, el mismo que ha sido revisado conjuntamente en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 05 de julio del 2019

Dr. Aguilar Castillo Wilbert Geovanny

C.C. 0703844696



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Chica Rúales, José Antonio y Naula García, Erik Andrés* declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"CONTROL DE ESTABILIZACIÓN DE UN QUADCOPTER BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA ENTORNOS CON PERTURBACIONES TIPO RÁFAGAS DE VIENTO MODERADAS"**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciado las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 05 de julio del 2019

Chica Rúales José Antonio  
C.C.: 2300118953

Naula García Erik Andrés  
C.C.: 1720963329



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

#### AUTORIZACIÓN

Nosotros, *Chica Rúales, José Antonio* y *Naula García, Erik Andrés*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“CONTROL DE ESTABILIZACIÓN DE UN QUADCOPTER BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA ENTORNOS CON PERTURBACIONES TIPO RÁFAGAS DE VIENTO MODERADAS”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 05 de julio del 2019

Chica Rúales José Antonio  
C.C.: 2300118953

Naula García Erik Andrés  
C.C.: 1720963329

## DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicarlo a mis padres Lida y Antonio, ya que gracias a ellos pude concluir este gran logro.

A mi madre Lida por guiarme y aconsejarme en los momentos difíciles, ser mi apoyo incondicional en todo momento y darme esas palabras que necesitaba.

A mi padre Antonio por sus consejos, por inculcarme sus valores y sobre todo saber encaminarme por el camino correcto.

A mi hermana Adriana, por aconsejarme y apoyarme en todo momento. Sus consejos me han servido de mucho en toda mi vida.

A mi tío Over por aconsejarme y apoyarme en todo momento y una mención especial a mi Tía Lorena, que también formo parte de este proyecto de vida.

A mi novia Mairalys, por apoyarme en los buenos y malos momentos demostrando ser un parte importante en mi vida.

Y sobre todo este trabajo es constancia de los sacrificios que he realizado durante este arduo camino.

José A. Chica R.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo con mucho amor a Dios por guiarme y protegerme en este arduo camino por culminar mi carrera.

A mi familia por todo su apoyo incondicional, principalmente a mis padres Iván Naula y Carmen García por todo su esfuerzo y amor, por haberme inculcado buenos valores que me permiten seguir adelante día tras día.

A mi novia Emily y a mi hijo que viene en camino.

Erik A. Naula G.

## AGRADECIMIENTO

Quiero Agradecer a mi tutor Dr. Wilbert Aguilar, por encaminarme en todo el desarrollo de este trabajo, por sus consejos y sobre todo su paciencia y dedicación. También agradecer principalmente a mi compañero de titulación Erik, por ser parte importante del desarrollo de este trabajo.

A mi familia, porque gracias a ustedes que siempre estuvieron a mi lado, pude lograr este objetivo tan importante para mí.

A mi novia Mairalys, por saber comprender lo duro que fue este camino y sobre todo apoyarme en los momentos más difíciles.

Gracias a mis amigos y docentes de Universidad, Jaime, Cristian, Jairo, Fernanda, Ingrid, Bryan, Juan, Jorge y especialmente a Mateo y Víctor que son amigos incondicionales, que me extendieron la mano sin esperar nada a cambio.

José A. Chica R.

## AGRADECIMIENTO

Al concluir el presente trabajo de titulación, quiero enunciar mis más sinceros agradecimientos.

Al Dr. Wilbert Aguilar, tutor de tesis por su gran aporte de conocimiento durante el transcurso de esta etapa, por su entero compromiso, respeto y confianza.

A mi compañero de titulación Antonio por su gran esfuerzo que permitió cumplir con el objetivo propuesto.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, y sus docentes por su enseñanza académica.

A mis compañeros de deporte “No Manchester” que formaron parte en esta actividad extracurricular.

A mis tíos y primos más cercanos por todo su apoyo incondicional, sus palabras que me generaron valor para poder culminar esta gran etapa de mi vida.

A mis abuelitos José Naula, María Veloz, Segundo García, y en especial a mi querida abuelita María Luisa Castillo, por sus consejos llenos de sabiduría y su gran amor.

Erik A. Naula. G.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICADO DEL DIRECTOR</b> .....	i
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	ii
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	iii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	viii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>ABSTRACT</b> .....	xv
<b>CAPITULO I</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Robots Móviles.....	5
1.3. Justificación e Importancia.....	6
1.4. Alcance del Proyecto .....	7
1.5. Objetivos.....	9
1.5.1. Objetivo General .....	9
1.5.2. Objetivos Específicos .....	9
<b>CAPITULO II</b> .....	11
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	11
2.1. Control de vehículos aéreos no tripulados.....	11
2.2. Aplicaciones de Lógica Difusa en la Robótica.....	13
2.3. Control del Quadcopter mediante Lógica Difusa .....	14
<b>CAPITULO III</b> .....	16
<b>QUADCOPTER UAV</b> .....	16
3.1. Características del dron.....	16
3.1.1. Chasis .....	16

3.1.2.	Motores.....	17
3.1.3.	Hélices.....	19
3.1.4.	Tarjeta Controladora .....	22
3.1.5.	Control electrónico de Velocidad (ESC).....	26
3.1.6.	Control Remoto RC.....	28
3.1.7.	Batería .....	30
3.2.	Funcionamiento del Quadcopter.....	31
3.2.1.	MISION PLANNER (Programa de Control) .....	32
3.2.2.	DJI NAZAM Assistant_2.40 (Programa de Control).....	36
3.3.	Método de control.....	40
3.3.1.	Lógica Difusa .....	42
3.4.	Sistema de Comunicación .....	52
3.5.	Instrumentación. ....	53
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>55</b>
<b>CONTROLADOR DIFUSO.....</b>		<b>55</b>
4.1.	Base de Conocimiento .....	55
4.1.1.	Relación Empuje – Potencia .....	55
4.1.2.	Configuración, Sistemas Referenciales y Orientaciones.....	57
4.2.	Fusificación .....	59
4.2.1.	Variables de Entrada .....	59
4.2.2.	Variable de Salida .....	60
4.2.3.	Interfaz de Fusificación.....	61
4.3.	Leyes de Inferencia.....	63
4.3.1.	Método de Mamdani .....	63
4.4.	Defusificación.....	66
<b>CAPITULO V .....</b>		<b>70</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN .....</b>		<b>70</b>
5.1.	Funcionamiento .....	70
5.2.	Desarrollo de los módulos del sistema .....	71
5.3.	Plataforma Real .....	77
<b>CAPITULO VI .....</b>		<b>79</b>

	X
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	79
6.1. Pruebas.....	79
6.1.1. Pruebas de precisión.....	79
6.1.2. Tiempo de respuesta a las perturbaciones .....	79
6.2. Análisis de Resultados.....	82
6.3. Trabajos Futuros. ....	82
<b>CAPITULO VII</b> .....	83
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	83
7.1. Conclusiones.....	83
7.2. Recomendaciones .....	84
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Características técnicas T- Motor MN3510</i> .....	3
<b>Tabla 2</b> <i>Características técnicas Módulo T BRAIN- 4 X 25A (Programable)</i> .....	4
<b>Tabla 3</b> <i>Características de los motores MN3510</i> .....	18
<b>Tabla 4</b> <i>Especificaciones de Hélices para motores MN3510. Obtenido de (2017)</i> .....	21
<b>Tabla 5</b> <i>Procesador y Sensores</i> .....	23
<b>Tabla 6</b> <i>Puertos de entradas y Salida</i> .....	24
<b>Tabla 7</b> <i>Aplicaciones y Otros – PixHawk</i> .....	24
<b>Tabla 8</b> <i>Condiciones del vuelo básico en la tarjeta Naza- M V2</i> .....	25
<b>Tabla 9</b> <i>Precisiones y Velocidades</i> .....	25
<b>Tabla 10</b> <i>Características de Naza M V2</i> .....	26
<b>Tabla 11</b> <i>Características del ESC T Brain- 4X25</i> .....	27
<b>Tabla 12</b> <i>Características del Radio Control</i> .....	28
<b>Tabla 13</b> <i>Características de la Batería LiPo modelo Turnigy 5.0</i> .....	31
<b>Tabla 14</b> <i>Usos de la Lógica Difusa</i> .....	41
<b>Tabla 15</b> <i>Ventajas y Desventajas del Control Difuso</i> .....	47
<b>Tabla 16</b> <i>Relación Empuje - Potencia</i> .....	55
<b>Tabla 17</b> <i>Variable Lingüística Error del ángulo</i> .....	59
<b>Tabla 18</b> <i>Variable Lingüística Velocidad Angular</i> .....	60
<b>Tabla 19</b> <i>Variable Lingüística PWM</i> .....	60
<b>Tabla 20</b> <i>Base de Reglas</i> .....	64
<b>Tabla 21</b> <i>Error en estado Estacionario</i> .....	80
<b>Tabla 22</b> <i>Tiempo de respuesta al 30% de potencia nominal</i> .....	81
<b>Tabla 23</b> <i>Tiempo de respuesta al 30% de potencia nominal</i> .....	81
<b>Tabla 24</b> <i>Tiempo de respuesta al 50% de potencia nominal</i> .....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Prototipo de Quadcopter .....	3
<b>Figura 2.</b> T-Motor 3510.....	4
<b>Figura 3.</b> Módulo de driver T BRAIN 4 X25A.....	4
<b>Figura 4.</b> Variaciones de Helicópteros: (a) Tricóptero; (b) Quadcopter; (c) Pentacóptero; (d) Hexacóptero; (e) Octocóptero .....	5
<b>Figura 5.</b> Diagrama general de la técnica de control del Quadcopter .....	8
<b>Figura 6.</b> Aplicaciones Tecnológicas (Ramirez).....	13
<b>Figura 7.</b> Características del Drone.....	16
<b>Figura 8.</b> Motor MN3510.....	17
<b>Figura 9.</b> Dimensiones de los motores MN3510, (DroneCenter, 2016) .....	18
<b>Figura 10.</b> Tipos de hélices de 2 aspas.....	20
<b>Figura 11.</b> Colación de Hélices, (JuegaTrónica, 2017).....	20
<b>Figura 12.</b> Tarjeta Controladora Pixhawk.....	22
<b>Figura 13.</b> Tarjeta controladora NAZA- M V2 (DJI, 2018) .....	26
<b>Figura 14.</b> Diagrama de un ESC, obtenido de (Fpvradiocontrol, 2018) .....	27
<b>Figura 15.</b> Módulo de ESC T Brain4x25A .....	27
<b>Figura 16.</b> Características FLY SKY FS-TH9X (ModelTronic, 2004) .....	28
<b>Figura 17.</b> Fly Sky FS- TH9X (ModelTronic, 2004).....	29
<b>Figura 18.</b> Batería LiPo Turnigy 5.0 .....	31
<b>Figura 19.</b> Frame Type. Mission Planner.....	32
<b>Figura 20.</b> Accel Calibration- Mission Planer.....	33
<b>Figura 21.</b> Calibración del GPS- Mission Planner .....	33
<b>Figura 22.</b> Calibración del RC - Mission Planner.....	34
<b>Figura 23.</b> Tipos de Vuelo- Mission Planner .....	34
<b>Figura 24.</b> Modo a prueba de fallos- Mission Planner .....	35
<b>Figura 25.</b> Parámetros recomendados - Mission Planner.....	35
<b>Figura 26.</b> Conexión Recomendada para NAZA- M V2 .....	36
<b>Figura 27.</b> Software NAZA- MV2.....	36
<b>Figura 28.</b> Mixer Type - NAZA- M V2 .....	37
<b>Figura 29.</b> Prueba de sentido de giro de motores - NAZA- M V2.....	37
<b>Figura 30.</b> Posicionamiento del GPS y Controlador NAZA .....	38
<b>Figura 31.</b> Distancias de los ejes del controlador al GPS .....	38
<b>Figura 32.</b> Calibración del RC - NAZA- M V2 .....	39
<b>Figura 33.</b> Ajuste de Ganancias - NAZA- M V2 .....	39
<b>Figura 34.</b> Lógica Difusa.....	41
<b>Figura 35.</b> Función Triangular .....	43
<b>Figura 36.</b> Función Trapezoidal .....	43
<b>Figura 37.</b> Función Gamma.....	44
<b>Figura 38.</b> Función Gaussiana.....	44

<b>Figura 39.</b> Función Sigmoïdal.....	45
<b>Figura 40.</b> Conjunto Difuso. Obtenido de [35] .....	46
<b>Figura 41.</b> Esquema de un Control Difuso. Obtenido [35] .....	47
<b>Figura 42.</b> Método de inferencia de Mamdani, Obtenido de [42].....	50
<b>Figura 43.</b> Método de Inferencia de Sugeno. Obtenido de [42].....	51
<b>Figura 44.</b> Cabeceo, Alabeo) y Guiñada del Drone. Obtenido de [36].....	52
<b>Figura 45.</b> PPM- Modulaci3n de Posici3n de Puntos .....	53
<b>Figura 46.</b> Relaci3n de Empuje - Potencia de motores .....	56
<b>Figura 47.</b> Configuraci3n PPM en el RC .....	57
<b>Figura 48.</b> Configuraci3n en Equis del Cuadric3ptero, tomado de (OpenPilot, 2017).....	58
<b>Figura 49.</b> Fusificaci3n, Variable Error del 3ngulo.....	61
<b>Figura 50.</b> Fusificaci3n, Velocidad Angular.....	62
<b>Figura 51.</b> Interfaz del Controlador Fuzzy .....	63
<b>Figura 52.</b> Reglas de Fusificaci3n.....	65
<b>Figura 53.</b> Visualizaci3n de Reglas.....	65
<b>Figura 54.</b> Defusificaci3n, Variable de Salida PWM.....	66
<b>Figura 55.</b> Tri3ngulo- Centro de gravedad.....	67
<b>Figura 56.</b> Grafica de la Defusificaci3n, m3todo del centroide. ....	69
<b>Figura 57.</b> Descripci3n del sistema.....	70
<b>Figura 58.</b> Esquema del Controlador .....	71
<b>Figura 59.</b> Editor del Fuzzy Logic Toolbox, FIS .....	71
<b>Figura 60.</b> Relaci3n Error Grados – PWM.....	73
<b>Figura 61.</b> Relaci3n Velocidad angular – PWM.....	73
<b>Figura 62.</b> Superficie de Control 3D.....	74
<b>Figura 63.</b> Esquema de simulaci3n en Simulink.....	76
<b>Figura 64.</b> Resultado de la simulaci3n. ....	76
<b>Figura 65.</b> Diagrama de bloque de Simulink .....	77

## RESUMEN

El sistema consta de tres factores principales: Teleoperador, Drone Tarot 650 y el controlador Fuzzy. La tarjeta encargada de ejecutar el control posee una unidad de medición inercial (IMU) cuya información es procesada en tiempo real. Esta posee los siguientes sensores: acelerómetro y giroscopio. El UAV está conectado por radiofrecuencia al control del operador de radio. Para el sistema de estabilización, se implementaron 25 reglas de control, ya que el Quadcopter tiene cinco funciones de pertenencia a la entrada del error y en la entrada del derivado del error tiene cinco funciones más.

Después de recibir la información de los sensores y procesarla, el sistema de control evalúa los errores de velocidad y error angular, prevé las acciones de control y genera una señal PPM. El sistema propuesto utiliza una tarjeta controladora PixHawk 2 que tiene una IMU incluida.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **VEHICULO AÉREO NO TRIPULADO**
- **QUADCOPTER**
- **CONTROL FUZZY**

## **ABSTRACT**

The system consists of three main factors: Teleoperator, Drone Tarot 650 and the Fuzzy controller. The card is responsible for executing the control has an inertial measurement unit (IMU) whose information is processed in real time. It has the following sensors: accelerometer and gyroscope. The UAV is connected by radio frequency to the control of the radio operator. For the stabilization system, set 25 control rules, since the Quadcopter has five functions of belonging to the error input and the input of the error derivative has five more functions.

After receiving the information from the sensors and processing it, the control system evaluates the errors of speed and error, provides for control actions and generates a PPM signal. The system used uses a PixHawk 2 controller card that has an included IMU.

### **KEYWORDS:**

- **UNMANNED AERIAL VEHICLE**
- **QUADCOPTER,**
- **FUZZY CONTROL**



# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

El capítulo de robótica del Manual de la robótica (B & Khatib, 2008) y (Puri, Valavanis, & M, 2007) da una revisión general de la historia UAV, conceptos y aplicaciones de vuelo. Dentro del grupo de los UAV (*Vehículo aéreo no tripulado por sus siglas en inglés*), los helicópteros reciben una diferente nomenclatura dependiendo del número de motores con los que cuente, desde 1 hasta n, siempre y cuando el tamaño lo permita. Los helicópteros que poseen cuatro hélices han tenido una gran aceptación como elementos de entretenimiento (Traxxas qr1 Quadrotor, 2018) o de investigación (RobotsLab, 2015). Esta clase de helicópteros son llamados Quadcopter, Quadricóptero o Quadrotor, los mismos que poseen cuatro motores para lograr una propulsión y estabilización adecuada. Para conseguir que el Quadcopter se conserve estable de manera horizontal en relación con su eje de orientación, se necesita que dos hélices roten en un sentido y las otras dos roten en sentido contrario. Estos UAV están equipados con cuatro rotores con el propósito de estabilidad, pero esto hace que sea más complejo su modelamiento y control (Sattar, 2017).

Este trabajo de investigación se enfoca en los Quadcopter, ya que esta configuración posee el mínimo número de rotores que se necesitan para efectuar un control óptimo de estabilización. El Quadcopter es un “helicóptero Multirotor con cuatro brazos, cada uno de los cuales tienen un motor y una hélice en sus extremos”. Estos se hayan clasificados en la categoría de alas giratorias de

vehículos aéreos no tripulados, que se implementan generalmente en las aplicaciones que requerían vuelos, estos pueden ser en operaciones de búsqueda y rescate. Estos poseen seis grados de libertad: tres grados de libertad se encargan de controlar su posición en: altura, desplazamiento vertical y horizontal; y los otros tres grados de libertad que precisan la disposición del objeto en el espacio: Pitch, Roll y Yaw (Luna, 2002).

Uno de los retos más complejos dentro del manejo de los drones es lograr una estabilización adecuada, para que el mismo no se derribe del aire de manera estrepitosa. Las perturbaciones que son sometidos los Quadcopter, es a ráfagas de viento moderadas, lo cual implica que el control sea más difícil de realizar, ya que se necesita que cada rotor tenga una velocidad y sentido de giro distinto para mantener una estabilidad adecuada. Se han utilizado distintos tipos de control, como, por ejemplo: Control PID, Redes Neuronales Artificiales, Aprendizaje por Reforzamiento, Lógica Difusa, entre otros; donde la lógica difusa es una técnica moderna que permite que el manejo de los sistemas sea en mayor medida adaptables, más confiables y que incrementen la robustez del controlador.

En la última década, la diversidad de estudios y aplicaciones técnicas de la lógica difusa ha crecido de manera paulatinamente. Las implicaciones tecnológicas se muestran en productos tales como: dispositivos de audio y video, hornos industriales y en aplicaciones industriales como lo son cementeras, embotelladoras, textiles, ensambladoras, etc. Para comprender por qué este método es tan utilizado hay que analizar primero lo que se entiende por lógica difusa. Esta pertenece al grupo de las llamadas lógicas multivaluadas, en los cuales se maneja un mayor número de representación de valores de verdad, a diferencia de los valores comunes de verdadero (1 lógico) y falso (0 lógico).

A los valores de verdad se les considera grados de veracidad o falsedad. Estos valores de verdad son considerados no deterministas ya que esta lógica procura generar resultados precisos y exactos a partir de datos imprecisos, donde los valores de verdad tienen cierta incertidumbre (Menhaj & Fakurian, 2014).

En la figura 1. se presenta el prototipo del Quadrotor, donde se instalará el algoritmo de control que basado en lógica difusa para la estabilización del mismo.



**Figura 1.** Prototipo de Quadcopter

Este prototipo consta con 4 motores sin escobillas, el módulo de drivers para los mismos y respectivas hélices, las principales características son:

**Tabla 1**

*Características técnicas T- Motor MN3510*

Diámetro del estator	35 [mm]
Longitud del estator	10 [m]
Diámetro del eje	4 [mm]
Peso	97 [g]
Máxima corriente continua	15 [A]
Potencia continua máxima	330 [W]
Máxima corriente de eficiencia	(2-8A) > 85%
Resistencia interna	188 [mΩ]
Temperatura de funcionamiento	44 [°C]



**Figura 2.** T-Motor 3510

**Tabla 2**

*Características técnicas Módulo T BRAIN- 4 X 25A (Programmable)*

Voltaje de entrada	7,4– 14,8 [V]
BEC de salida	5.25[V]
Corriente continua	25 [A]
Dimensiones	69x62x11 [mm]
Peso	112 [g]



**Figura 3.** Módulo de driver T BRAIN 4 X25A

## 1.2. Robots Móviles

La categorización de los robots móviles, un campo muy importante son los helicópteros, los cuales por su número de motores tienen diferente nombre y configuración. Los cuales van desde un motor hasta  $n$  motores, por ejemplo, un helicóptero con 4 motores recibe el nombre de Quadcopter, uno con 6 motores se llama Hexacóptero y uno con 8 motores se llama Octocopter. En la figura 4 se puede observar las distintas variantes de Helicópteros y multicopteros.



**Figura 4.** Variaciones de Helicópteros: (a) Tricóptero; (b) Quadcopter; (c) Pentacóptero; (d) Hexacóptero; (e) Octocóptero

La configuración más utilizada por brindar mayor estabilización con el menor uso de motores es la del Quadcopter. Este tipo de helicópteros posee cuatro motores para su propulsión y estabilización. El cual, para lograr mantenerse de modo horizontal con respecto a su eje de orientación, es necesario que dos hélices roten en sentido horario y los otros dos rótenes en sentido antihorario.

Los UAV en la actualidad se los usa en aplicaciones en el ámbito civil como militares. Ya que brindan innumerables ventajas, al ser comparados con vehículos obligatoriamente tripulados, como por ejemplo seguridad de la vida humana en lugares peligroso. En aplicaciones civiles son utilizados en la agricultura, entretenimiento, fines comerciales, mantenimiento de centrales nucleares, etc. En el ámbito militares son utilizados para vigilancia, balísticos, etc.

### 1.3. Justificación e Importancia

El propósito de esta investigación es la implementación, desarrollo y diseño de un control de estabilización de un UAV, ya que estos han adquirido una gran aceptación en la última década por SU alto grado de aplicación en diversas actividades e autonomía de vuelo, a continuación se enumera las principales aplicaciones: Localización de objetos, Control de Plagas, Videovigilancia, Adquisición de datos, Topografía, Control de Fronteras Rastreo, Detección y rastreo de focos incendiarios, seguimiento y planificación de rutas, entre otras (Chmai & ., 2015).

Además, con el desarrollo de este proyecto se puede llevar a la práctica algunos conceptos de la carrera de Ingeniería Electrónica, Automatización y Control. Pudiendo utilizar el módulo de control generado en materias como: Instrumentación y Sensores, Control Digital, Robótica

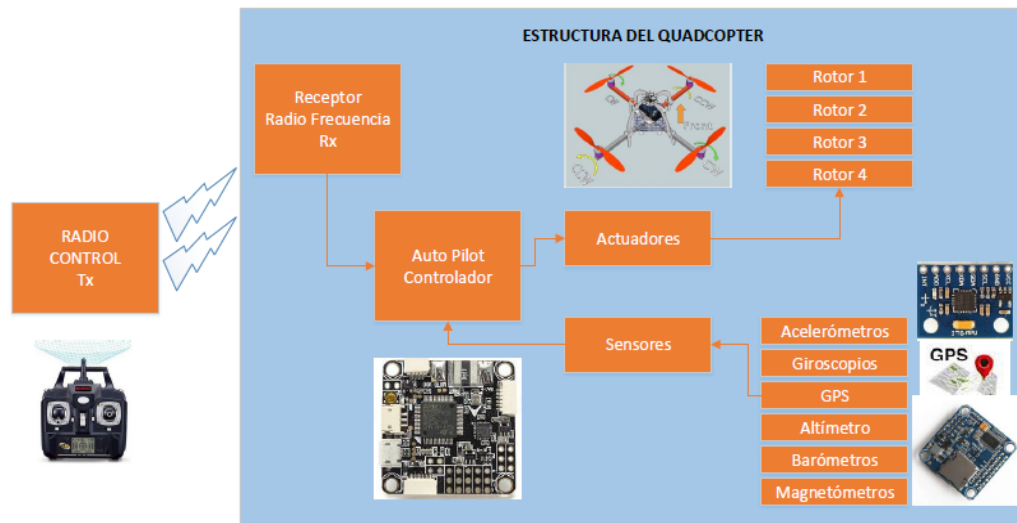
Industrial, Control Inteligente, etc. Considerando que en dichas materias el presente trabajo se podría mostrar como un ejemplo práctico del estudio de los conocimientos teóricos impartidos.

Asimismo, con el desarrollo del controlador de estabilidad propio, se puede realizar movimientos del UAV que con otros controladores comerciales no se podrían ejecutar, como, por ejemplo: Realizar un vuelo vertical para enfrentar una ráfaga de viento moderada y no ser derribada por la misma. Cabe recalcar que los sistemas de control comerciales, al ser de código propietario, no permiten modificar su algoritmo; consecuentemente, al realizar un algoritmo de estabilización propio, se lo puede modificar arbitrariamente.

Por lo cual la investigación sobre el control de estabilización de un UAV se implementó con el propósito que cualquier persona con o sin experiencia previa en el manejo de un Quadcopter, pueda manejar el drone de manera fácil y sencilla.

#### 1.4. Alcance del Proyecto

El proyecto de investigación desarrolla un algoritmo basado en lógica difusa, el cual permita controlar posición y orientación en seis grados de libertad de un prototipo aéreo Multirotor ya disponible con su radio control. A este prototipo se le añadirá una tarjeta controladora de tal manera que sea un módulo adaptable sobre el mismo junto con los otros recursos de instrumentación necesarios para el correcto control como son: Acelerómetros, giroscopios y altímetros. En la figura 5., se muestra cómo será el control del drone.



**Figura 5.** Diagrama general de la técnica de control del Quadcopter

Donde la metodología de control se fracciona en cinco fases:

- Comunicación

En la primera fase del proyecto, se realizará la comunicación por medio de radio frecuencia entre el Radio control y la tarjeta controladora, para realizar el manejo del Quadcopter.

- Adquisición de Datos

En la segunda fase, se realizará la toma de valores transmitidos desde los sensores del Quadcopter, los cuales serán utilizados al realizar las reglas de Fusificación.

- Control de Actuadores

Posteriormente se realizará el control de cada rotor, en lo que corresponde a sentido de giro y velocidad relativa del mismo. El cual permitirá al dron ir hacia adelante, atrás, izquierda, derecha, hacia abajo o hacia arriba. Paro lo cual se utilizará un drive controlador conectado al rotor y la tarjeta controladora.



- Controlador Auto Pilot

En la cuarta fase del proyecto consiste en la realización del control Difuso, para lo cual se establecerá las reglas de Fusificación, leyes de inferencias y Defusificación.

- Pruebas de Funcionamiento

En la fase final del proyecto se orienta a la valoración experimental del funcionamiento del Drone, se analiza la precisión y velocidad de respuesta del controlador, realizando pruebas de vuelo en diferentes áreas y condiciones atmosféricas (velocidad del viento, humedad, temperatura, etc.). Se realizará distintas pruebas en las cuales se realizará una comparación del sistema implementado frente al sistema tradicional PID, para el control de estabilización.

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo General

- Desarrollar un algoritmo para el control de estabilización mediante el uso de una tarjeta controladora para el manejo de un vehículo aéreo no tripulado.

### 1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar el estudio del Arte sobre los UAV, tipos de control utilizados y configuraciones existentes por el número de rotores.
- Estudiar el funcionamiento y características técnicas de los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos del Quadcopter.
- Seleccionar la tarjeta controladora adecuada para la implementación del Control Difuso.
- Diseñar el algoritmo de control Difuso para estabilización del prototipo ante perturbaciones tipo ráfagas de viento moderadas que se presenten en ambientes externos.

- Evaluar mediante pruebas de funcionamiento la precisión complejidad de uso del sistema estabilización del dron.

## **CAPITULO II**

### **ESTADO DEL ARTE**

#### 2.1. Control de vehículos aéreos no tripulados

Para el avance y progreso de la tecnología de los UAV, se han creado varias aplicaciones tanto en interiores como exteriores, a continuación, se menciona algunas las más representativas comercialmente: Servicios de mensajería y paquetería (Amazon Prime air , 2016), Vigilancia área de fronteras limítrofes de Países (UAV´S para monitoreo de fronteras, 2011), Industria Pesquera e Agroalimentaria (Sagarpa, 2015) y Seguridad y vigilancia (Seguridad y Vigilancia , 2017).

Para el avance de las aplicaciones previamente mencionadas se necesitan diferentes grados de sistemas de control, algunos de ellos necesitan un mayor grado de precisión y exactitud que otros. La robustez y confiabilidad del sistema es un factor importante para tener en cuenta para lograr un vuelo en óptimas condiciones.

A continuación, se describe el trabajo realizado en la tesis del Ingeniero Dijkshoorn (Simultaneous localization and mapping with the ar.drone, 2012) (M, Haomann, Huang, & L, 2007)en donde se ejecuta la investigación enfocada en el mapeo y localización de forma paralela. En la cual se utiliza como plataforma de pruebas el dispositivo Parrot AR. Drone 2.0. Para que el dispositivo pueda orientarse alrededor de sí mismo, se utiliza su cámara HD 720. En donde para lograr que el sistema de control sea estable, se necesita que la información de su orientación y posición sea confiable.

Esta investigación es base para las aplicaciones en donde los robots se controlen de modo autónomo. Para lograr esto, se han creado distintos tipos de control, en algunos casos se necesita obtener el modelo matemático que represente al sistema o en otros no, como lo es aplicando Lógica Difusa en la que no es indispensable conocer el modelo matemático.

En la investigación del Ingeniero Hoffmann et al. (M, Haomann, Huang, & L, 2007), se pone en claro el sistema de control y la dinámica de un Quadcopter utilizando la técnica de control PID. Su trabajo fue enfocado en las variaciones aerodinámicas que suceden al aplicar perturbaciones externas (viento) durante el vuelo.

En la tesis de Özgür (Kivrak, 2006) se implementó el control y diseño de un sistema, aplicando la técnica LQR (*Regulador Cuadrático Lineal por sus siglas en inglés*) para el control de un UAV, específicamente utilizando la configuración Quadcopter. Se describe conjuntamente el modelo matemático que se utiliza en la implementación del controlador.

Para conseguir el modelo dinámico de los Drones, puntualmente el de los Quadcopter se aplican diferentes técnicas tanto numéricas como analíticas. En el trabajo de investigación del Ing. Rubio et al. (J, Z, & A, 2014) se evidencia una comparativa de estas dos técnicas.

Actualmente existen varios trabajos relacionados a nivel de Pregrado y Postgrado en los cuales hacen hincapié en el control de los drones, cabe recalcar que en la mayoría de los casos utilizan la configuración Quadcopter. Estos estudios tienen la finalidad de conseguir optimizar el control del mismo a bajas y altas velocidades.

## 2.2. Aplicaciones de Lógica Difusa en la Robótica

El control de sistemas aplicando Lógica Difusa fue creado principalmente para sistemas no lineales, en donde es complicado obtener un modelo matemático exacto o no se cuenta con un modelo. Por ende, sabiendo cómo funciona el sistema se puede realizar un control adecuado.

- **Aplicaciones Tecnológicas**



**Figura 6.** Aplicaciones Tecnológicas (Ramirez)

En la investigación de Vargas et al. (Vargas, Sanabria, & Ibañez, 2013), se expone los datos obtenidos de la implementación, desarrollo y diseño de un prototipado enfocado en Visión Artificial, aplicando Lógica difusa.

Asimismo, se ha utilizado la Lógica Difusa para optimizar, mejorar y perfeccionar la activación del sistema antibloqueo (ABS) por sus siglas en inglés, a partir de visión por computadora conjuntamente con control difuso (G, J, I, & Galán, 2013).

### 2.3. Control del Quadcopter mediante Lógica Difusa

El control de estabilización de un Quadcopter, aplicando una técnica de control robusta, combinado dos métodos de control: Adaptativo y Difuso se plasmó en la tesis (Coza & J.B, 2005), en la cual por medio de una simulación se indica el correcto funcionamiento para controlar un Quadcopter.

En la investigación (F, B, & S., 2005) se evidencia el control difuso mediante la técnica Takagi-Sugeno para un sistema de seis grados de libertad, aplicado a un Quadcopter. Para este sistema se ha utilizado un algoritmo de mejoramiento de identificación de modelos lineales (LMI, por sus siglas en inglés) para lograr una estabilización óptima. Cabe recalcar que en este trabajo no se tomó en cuenta perturbaciones externas como lo son el viento o las turbulencias.

Existe un controlador “Híbrido”, en el cual se combinan dos técnicas de control distintas: Difuso y PID, para poder controlar los tres ángulos de vuelo: Pitch, Yaw y Roll de un cohete (Sumanthi & M, 2014).

En la investigación de Bhatkhande (S, 2014) se expone los resultados obtenidos de la implementación de un controlador Difuso para la estabilización de un Quadcopter. Comprobando

los resultados obtenidos en distintas plataformas, para demostrar las ventajas implícitas por la utilización de este tipo de control. Para la elaboración del controlador se combinó Lógica difusa con redes neuronales. La utilización de redes neuronales se aplicó para obtener las reglas de Fusificación.

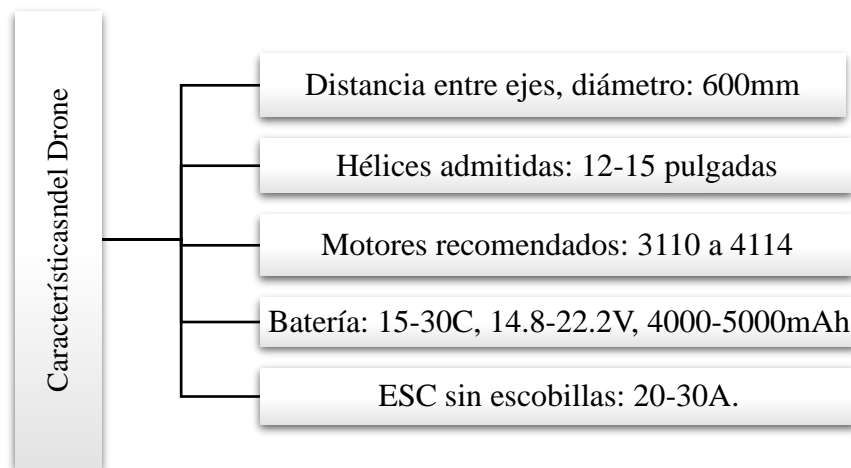
Finalmente, el control Difuso fue creado con el propósito de ser utilizados en sistemas no lineales, donde el modelo matemático tiene una gran complejidad, no es exacto o inexistencia del mismo. De tal modo, con tan solo conocer cómo funciona el sistema, se puede implementar su control. Es la mayor ventaja que posee la lógica difusa frente a otros controladores tradicionales como lo es el PID.

## CAPITULO III

### QUADCOPTER UAV

#### 3.1. Características del drone

El prototipo de Quadcopter al cual se le realiza el control, es similar al modelo Tarot 650, teniendo presente las configuraciones recomendadas, como indica en (RCInnovations, 2017):



**Figura 7.** Características del Drone

Se debe tener en cuenta que, dentro de la inclusión de los equipos electrónicos y otros, se debe tender a bajar el centro de gravedad permitiendo así mayor estabilidad. Como configuración de tipo estándar también se añade un circuito PCB de alta resistencia, que junto a la base del motor permiten un cableado más eficiente y seguro.

##### 3.1.1. Chasis

Es lo que genera el soporte de todas las demás piezas, también hace que varíe el tamaño del dron al tener un cuerpo o chasis de distintas dimensiones.



Este material debe ser muy resistente debido a que es el soporte de las demás piezas; así como también debe ser rígido para las distintas pruebas de funcionamiento que se realizarán, en las cuales posiblemente durante el vuelo o el aterrizaje pueda sufrir golpes indebidos.

El material del Drone es de fibra de carbono, este tipo de material es más rígido que los otros comunes en drones como son el plástico y la fibra de vidrio, pese a que es más costoso y pesado es el indicado y recomendado para este tipo de aplicaciones donde se trabaja con vuelos fuertes ante las posibles y comunes perturbaciones como son las ráfagas de viento.

- Material: Fibra de carbono
- Dimensiones: 50 cm x 50 cm x 25 cm
- Soporte: 26.5 cm x 23 cm
- Peso aproximado: 1.5Kg

### 3.1.2. Motores

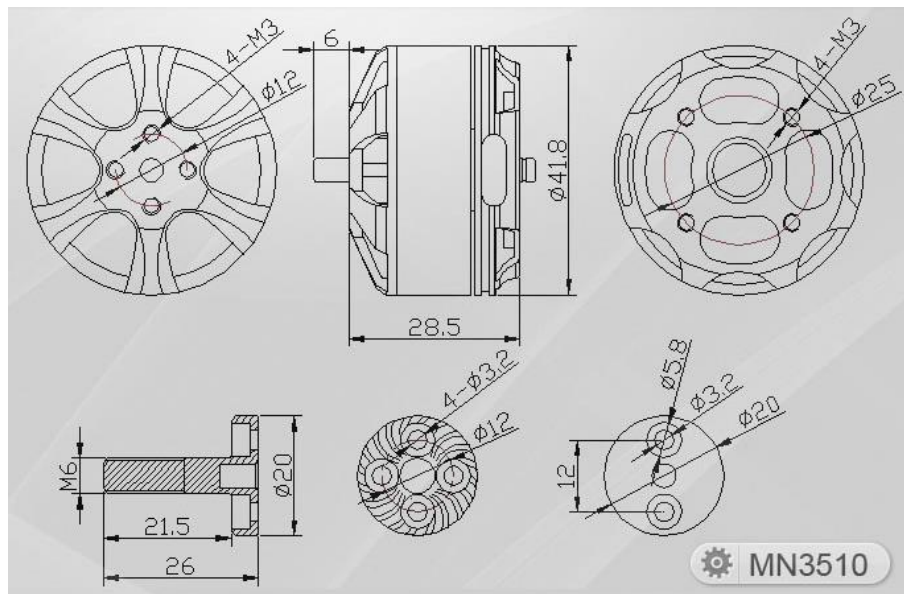
Este prototipo consta con 4 motores sin escobillas los cuales convierten la energía eléctrica, en movimiento circular que pasa a transmitirse a las hélices del dron y causará un empuje que permitirá el vuelo, estos motores son inicialmente más costosos que los que poseen escobillas, pero son más eficientes y duraderos, ya que tienen menos desgaste en partes móviles, trabaja con batería 3-4S LiPo.



**Figura 8.** Motor MN3510

**Tabla 3***Características de los motores MN3510*

Especificaciones técnicas de los motores MN3510	
Diámetro del estator	35 [mm]
Longitud del estator	10 [mm]
Diámetro del eje	4 [mm]
Peso	97 [g]
Máxima corriente continua	15 [A]
Potencia continua máxima	330 [W]
Máxima corriente de eficiencia	(2-8A) > 85%
Resistencia interna	188 [mΩ]
Temperatura de funcionamiento	44 [°C]
KV	700
Rpm	4500
Empuje máximo	1850 [g]

**Figura 9.** Dimensiones de los motores MN3510, (DroneCenter, 2016)

Para verificar si los motores del dron son los adecuados, se tiene una regla básica la cual indica que los motores deben producir un empuje al menos 2 veces mayor al peso total del dron, con esto

se asegura que los motores respondan de manera rápida a las señales de control o detener un descenso vertical rápido.

Empuje requerido por motor = (peso de la aeronave x 2) / 4 motores

Empuje requerido por motor = (1500 g x 2) / 4 motores

Empuje requerido por motor = 750 g

El empuje requerido por motor es de 750 g, por lo cual los motores son adecuados para un correcto vuelo.

### 3.1.3. Hélices

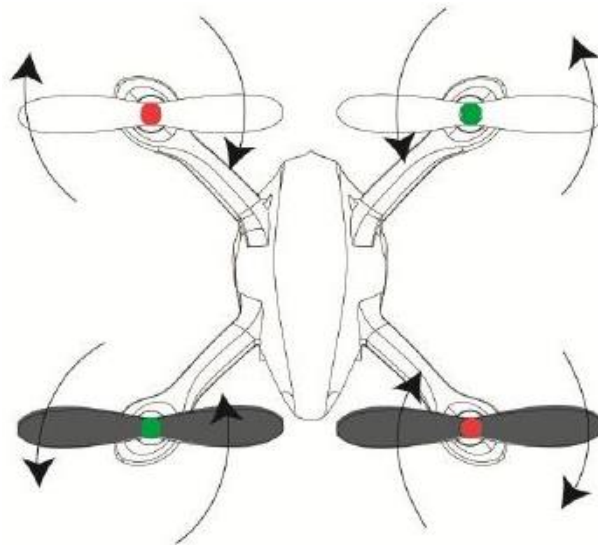
Son las encargadas de elevar al dron, el objetivo de una buena hélice es generar impulso mediante su giro moviendo el aire a la vez; cuando mayor sea el aire que consigue mover la hélice mayor será el empuje. La hélice a elegir es indispensable y dependiente de los motores con los que se vayan a trabajar, ya que son las encargadas de producir el impulso del dron a través de sus giros que, por supuesto generan el movimiento del aire, mientras más aire se mueva, mayor será el empuje. Puesto que es un elemento muy importante dentro del sistema, se debe considerar lo siguiente.

- Para un correcto despegue deben colocarse de manera adecuada generando así el correcto movimiento del viento.
- Existen 2 tipos de hélices (modelo A y B), que se deben colocar en cruz.



**Figura 10.** Tipos de hélices de 2 aspas

- Se debe colocar máximo 2 hélices del mismo modelo.
- Al usar hélices de 3 aspas existe mayor consumo de potencia, pero tiende a una mejor estabilización.
- La dimensión se mide de punta a punta.
- A mayor grado de inclinación, se tendrá mayor empuje.
- A menor grado de inclinación pueden girar con mayor velocidad.
- Si ocurre un impacto o una mala colocación de las hélices, el drone no se elevará, aunque se le haya energizado, o se eleva de manera incorrecta solo la parte trasera.



**Figura 11.** Colación de Hélices, (JuegaTrónica, 2017)

**Tabla 4**

*Especificaciones de Hélices para motores MN3510. Obtenido de (2017)*

Item No.	Voltage (V)	Prop	Throttle	Current (A)	Power (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating Temperature (°C)
MN3510 KV700	11.1	T-MOTOR 12*4CF	50%	2.5	27.75	350	4000	12.61	40
			65%	4.8	53.28	550	4900	10.32	
			75%	6.6	73.26	700	5500	9.56	
			85%	9.1	101.01	870	6300	8.61	
			100%	11.1	123.21	1000	6600	8.12	
		T-MOTOR 13*4.4CF	50%	2.9	32.19	400	3800	12.43	42
			65%	5.6	62.16	650	4900	10.46	
			75%	7.9	87.69	830	5300	9.47	
			85%	10.5	116.55	1000	6000	8.58	
			100%	12.6	139.86	1100	6400	7.87	
		T-MOTOR 14*4.8CF	50%	4.1	45.51	550	3500	12.09	43
			65%	7.7	85.47	890	4500	10.41	
			75%	10.7	118.77	1060	4900	8.92	
			85%	14.5	160.95	1300	5500	8.08	
			100%	17.3	192.03	1460	5800	7.60	
	14.8	T-MOTOR 11*3.7CF	50%	3.2	47.36	460	5300	9.71	43
			65%	6	88.80	710	6500	8.00	
			75%	8.2	121.36	870	7500	7.17	
			85%	11	162.80	1080	8200	6.63	
			100%	13	192.40	1230	8700	6.39	
		T-MOTOR 12*4CF	50%	3.8	56.24	580	5000	10.31	43
			65%	7.4	109.52	880	6300	8.04	
			75%	10.3	152.44	1100	7300	7.22	
			85%	14	207.20	1360	7700	6.56	
			100%	16.8	248.64	1600	8300	6.44	
		T-MOTOR 13*4.4CF	50%	4.7	69.56	730	4900	10.49	47
			65%	9	133.20	1120	6100	8.41	
			75%	12.3	182.04	1400	6800	7.69	
85%	16		236.80	1600	7400	6.76			
100%	19.4		287.12	1800	7850	6.27			

En base a las distintas consideraciones mencionadas y a la tabla de la hoja técnica de los motores, se elige las hélices con las siguientes características:

- Dimensiones: 13 X 4.5 MR. 13 pulgadas, con paso de 4.5
- Material: Plástico
- Forma de hélice: Acabada en punta Bullnose
- Número de Aspas: 2

### 3.1.4. Tarjeta Controladora

Se utiliza 2 tarjetas controladoras para comparativas de vuelo, estas tarjetas son el Pixhawk y el Naza – M V2. La tarjeta principal para la implementación del control Fuzzy es la del Pixhawk, mientras que la tarjeta secundaria Naza se ocupó para modificaciones de parámetros PID permitiendo visualizar en qué casos es mejor la estabilización del Quadcopter, las características de estas 2 tarjetas controladoras son:

#### 3.1.4.1. Pixhawk

Es una de las controladoras de vuelo más usada y potente actualmente en el mercado con gran performance y alta disponibilidad, provee algoritmos de guía para navegación y control para varios tipos de multirrotores, ala fija y rovers. El hardware de Pixhawk, se complementa con su software Dronecode que permite el control del mismo, así como también permite la comunicación con los distintos sensores y periféricos; permite también la comunicación por telemetría con dispositivos electrónicos que poseen cualquier plataforma Android, IOS, Windows, Linux, Mac.



**Figura 12.** Tarjeta Controladora Pixhawk

### 3.1.4.2. IMU

La unidad de control inercial a través de su estructura inhabilita activamente las vibraciones, consta de los siguientes componentes, con el fin de captar datos precisos del medio en el cual se realice el vuelo para así generar las respectivas acciones sobre los actuadores.

- **Acelerómetro:** Mide la inercia propia de los movimientos.
- **Magnetómetro:** Genera datos de la dirección a la que apunta el drone, se utiliza como brújula.
- **GPS:** Permite conocer las coordenadas de vuelo del drone de manera exacta incluyendo la altura para un vuelo automático.
- **Giróscopo:** Mide la velocidad angular de los cambios de posición.
- **Sensor Barométrico:** Ayuda a conocer la altura del vuelo de una manera más precisa.

Las características principales de esta tarjeta controladora como son: (ElectrónicaRC.com, 2015)

**Tabla 5**

*Procesador y Sensores*

<b>Procesador</b>	<b>Core, 32bit STM32F427 Cortex M4 core with FPU</b>
	Frecuencia 168 MHz
	RAM 256 KB
<b>Sensores</b>	Acelerómetro de seis ejes con 14 bits de resolución. ST Micro LSM303D 14 bit
	Giróscopo con 16 bits de resolución. ST Micro L3GD20H 16 bit
	Barómetro con una precisión mayor a 50cm. MEAS MS5611

**Tabla 6***Puertos de entradas y Salida*

<b>Comunicaciones, Puertos de Entrada y Puertos de Salida</b>
5 puertos serie (dos de ellos con control de flujo por hardware).
2 puertos CAN Bus
Puerto Spektrum DSM Satellite
S.BUS I/O
Entrada de radio tipo PPM
RSSI (mediante PWM o tensión)
1 puerto I2C
1 puerto SPI
Entradas analógicas
8 salidas de motor (PWM)
6 entradas/salidas auxiliares digitales
Puerto micro USB y microSD

**Tabla 7***Aplicaciones y Otros – PixHawk*

<b>Aplicaciones</b>	Navegación y localización
	Investigación y educación
	Control y sistemas estabilizados
<b>Otros</b>	Pulsador de seguridad externo
	Peso 38 gramos
	Indicador visual LED principal Multicolor
	Indicador de audio piezo de alta potencia y multitono
	Tarjeta microSD card para login

## 3.1.4.3. NAZA– M V2

Las características principales de esta tarjeta controladora son: (DJI, 2018)

- **Rendimiento elemental**



**Tabla 8***Condiciones del vuelo básico en la tarjeta Naza- M V2*

<b>Rendimiento Elemental del Vuelo</b>	
<b>Multi-Rotor Soportado</b>	Quadrotors I4, X4; hexagonal I6, X6, IY6, Y6; Octo-rotor I8 , V8 , X8
<b>Salida ESC Soportada</b>	Frecuencia de actualización de 400 Hz
<b>Transmisor Recomendado</b>	PCM o 2.4GHz con un mínimo de 4 canales
<b>Rango De Voltaje De Trabajo</b>	MC: 4.8V ~ 5.5V  VU Entrada: 7.4V ~ 26.0 V (se recomienda 2S ~ 6S LiPo) Salida (cable rojo del puerto V-SEN): 3A a 5V (corriente de ráfaga: 7.5A)
<b>El Consumo De Energía</b>	MAX: 1.5W (0.3A@5V) Normal: 0.6W (0.12A@5V)
<b>Temperatura De Funcionamiento</b>	10 ° C ~ 50 ° C
<b>Requisitos Del Sistema De Software Auxiliar</b>	Windows XP sp3 / Windows 7 / Windows 8 / Windows 10

- **Rendimiento de vuelo**

**Tabla 9***Precisiones y Velocidades*

<b>Rendimiento Elemental del Vuelo</b>	
<b>Precisión De Desplazamiento (Modo GPS)</b>	Vertical: $\pm 0.8m$ Horizontal: $\pm 2.5m$
<b>Velocidad Angular Máxima De Yaw</b>	200° / s
<b>Ángulo De Inclinación Máxima</b>	35°
<b>Ascenso Descenso</b>	6m/2; 4.5m/s

- **Hardware**

**Tabla 10**  
*Características de Naza M V2*

<b>Peso</b>	MC: 27g PMU: 28g GPS: 27g LED: 13g
<b>Dimensiones</b>	MC: 45.5 mm x 32.5 mm x 18.5 mm PMU: 39.5 mm x 27.5 mm x 10.0 mm GPS y compás 46 mm (diámetro) x 10 mm LED: 25 mm x 25 mm x 7.0 mm
<b>Funciones Integradas</b>	Modo de control de piloto automático múltiple Protección de baja tensión Soporte de receptor S-Bus Soporte de receptor PPM Módulo PMU independiente Soporte de cardán de 2 ejes

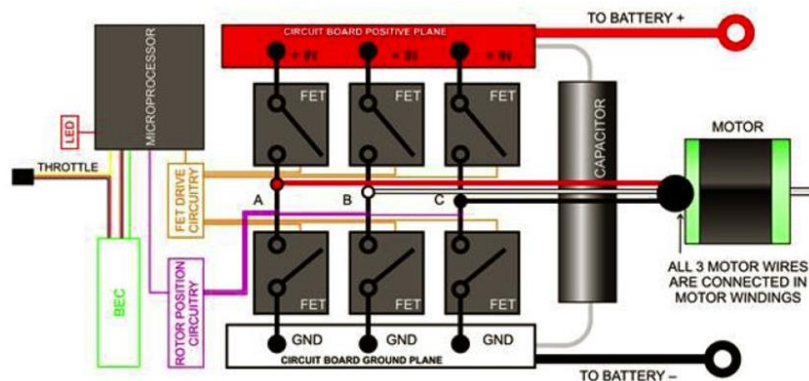


**Figura 13.** Tarjeta controladora NAZA- M V2 (DJI, 2018)

### 3.1.5. Control electrónico de Velocidad (ESC)

A través de los ESC, se logra variar la potencia eléctrica, con el fin de controlar el giro de los motores con agilidad y eficiencia de acorde al tipo de movimiento o desplazamiento que se vaya a realizar. Para obtener el ESC correcto, inicialmente se establece el gasto de corriente máximo de las especificaciones del motor elegido, añadiendo un margen de seguridad del 10%, también se comprobará que el mismo está clasificado para el número correcto de células de la batería.

La potencia que se va a entregar se genera con una amplia malla de transistores FET, sumando la potencia de cada uno, se tiene el máximo valor de amperios. Se debe tener en cuenta que, a mayor potencia del regulador, este será más costoso y pesado.



*Figura 14.* Diagrama de un ESC, obtenido de (Fpvradiocontrol, 2018)



*Figura 15.* Módulo de ESC T Brain4x25A

**Tabla 11**

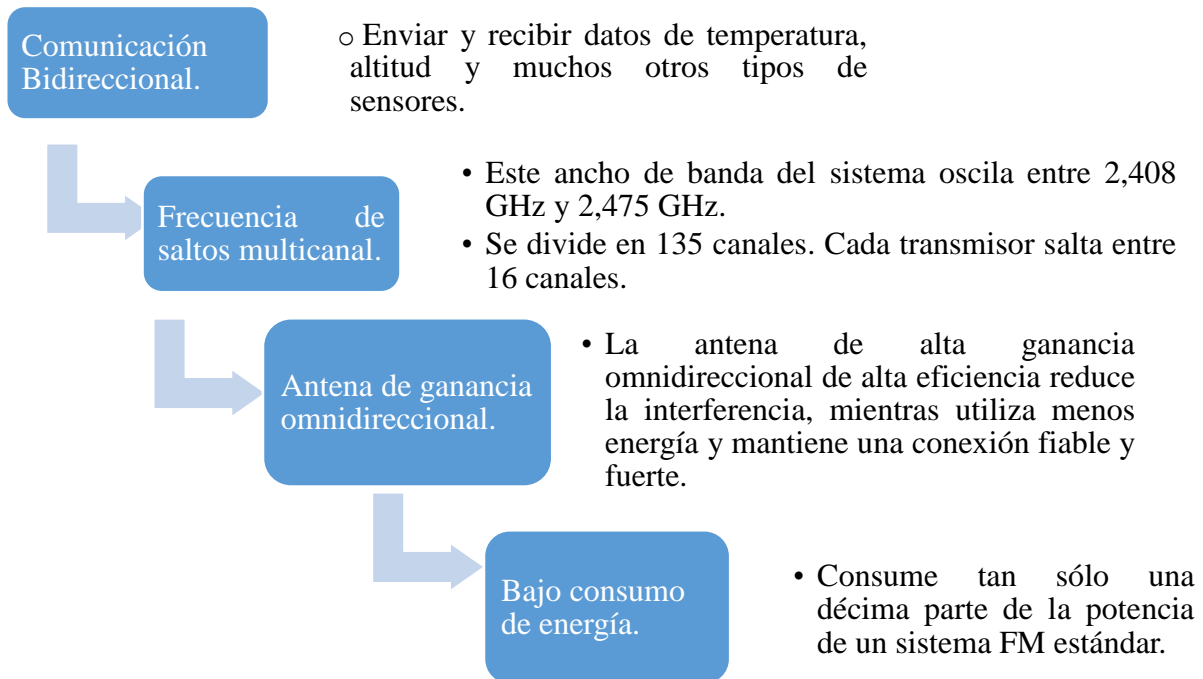
*Características del ESC T Brain- 4X25*

MODULO ESC	
<b>Voltaje de entrada</b>	7,4– 14,8 [V]
<b>BEC de salida</b>	5.26[V]
<b>Corriente continua</b>	25 [A]
<b>Dimensiones</b>	69x62x11 [mm]
<b>Peso</b>	112 [g]

3.1.6. Control Remoto RC

3.1.6.1. Modelo: FLY SKY FS-TH9X

- Las características de este modelo de RC, se indica en (ModelTronic, 2004):



**Figura 16.** Características FLY SKY FS-TH9X (ModelTronic, 2004)

- Especificación:

**Tabla 12**

*Características del Radio Control*

Especificaciones Radio Control	
Nombre del artículo:	Transmisor RC FS-i6X
Canal:	6-10 (Predeterminado 6)
Tipo de modelo:	Ala fija / Planeador / Helicóptero

**CONTINÚA**

<b>Rango de RF</b>	<b>2.408-2.475GHz</b>
<b>Potencia de RF</b>	<20dBm
<b>Canal de RF</b>	135
<b>Ancho de banda</b>	500KHz
<b>Sistema de 2,4 GHz</b>	AFHDS 2A / AFDHS
<b>Tipo de modulación</b>	GFSK
<b>Resolución de palo</b>	4096
<b>Advertencia de baja tensión</b>	<4.2V
<b>Puerto DSC</b>	Puerto PS / 2 PPM
<b>Longitud de la antena</b>	26mm (Antena Dual)
<b>Peso</b>	392 g
<b>Alimentación</b>	12V DC 1.5 AA * 8
<b>Pantalla</b>	STNTransflective Display, LCD 128x64 Lattice, VA 73x39mm, LCD con retroiluminación blanca
<b>Tamaño</b>	174x89x190mm
<b>Certificado</b>	CE0678, FCC ID: N4ZFLYSKYI6



*Figura 17.* Fly Sky FS- TH9X (ModelTronic, 2004)

### 3.1.7. Batería

Una de las partes más importantes del dron es la batería debido a que la misma debe ser de alto rendimiento, para abastecer los diferentes componentes electrónicos del sistema. La batería de LiPo son esenciales y generalmente usadas en multi rotores, helicópteros, aviones barcos, y coches. (M G. , 2017)

Para seleccionar la batería de manera adecuada, se considera lo siguiente:

- **Tamaño:** Mientras más peso sea, se va a poseer más consumo de potencia por ende al colocar más baterías o colocar una batería más pesada puede resultar contraproducente, además que ocupa mayor espacio. (Esenziale, 2017)
- **Voltaje de la Batería:** Una batería con mayor voltaje produce mayor potencia en los motores, pero estas suelen ser de mayor peso, aumentando directamente el peso total del dron, otra desventaja es el costo.
- **Conectores:** Deben ser lo suficientemente compatibles con el dron, además de permitir una mejor conexión con los dispositivos, ayuda para la nueva creación e innovación de drones.
- **Capacidad:** Indica que tiempo puede suministrar energía a un determinado dispositivo (mAh). Generalmente se elige una batería con la capacidad más alta garantizando un mayor tiempo de vuelo.
- **Tasa de Descarga:** Conocida como clasificación tipo, permite al usuario conocer la máxima corriente que la batería puede descargar sin producir daño así mismo, los valores presentados en las baterías tienen un margen de error. Se recomienda elegir baterías con la mayor

capacidad de descarga, además de contrastar el amperaje máximo de los motores. En general se ocupa la siguiente ecuación para realizar el cálculo correcto.

$$\text{Máx amperios continuos} = \text{Capacidad de la batería} \times \text{Tasa de descarga}$$

**Tabla 13**

*Características de la Batería LiPo modelo Turnigy 5.0*

Características de la Batería	
Capacidad mínima	5000 [mAh]
Configuración	3S1p
Celdas	4
Voltaje	14.8 [V]
Descarga máxima	20- 30C (10 [s])
Peso del paquete	360 [g]
Tamaño del paquete	143 x 51 x23 [mm]
Enchufe de carga	JST – XH
Enchufe de descarga	XT60



**Figura 18.** Batería LiPo Turnigy 5.0

### 3.2. Funcionamiento del Quadcopter

Previo al funcionamiento del Drone, se procede a revisar las respectivas conexiones y direcciones tanto del controlador como del GPS para proceder a realizar la calibración a través del software o programa de control Mission Planner, en el caso de que se use la tarjeta Pixhawk, y se utiliza el software DJI NAZAM Assistant\_2.40 para el controlador Naza.

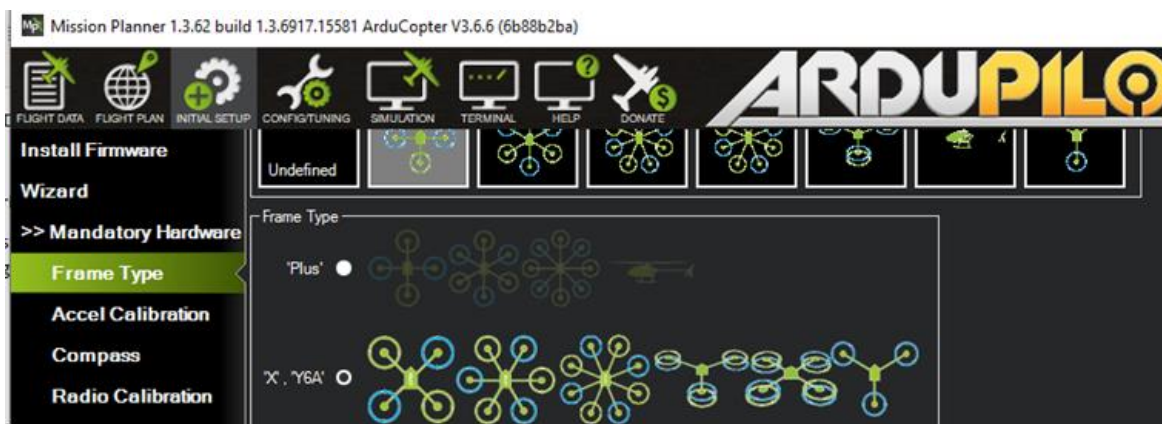
### 3.2.1. MISION PLANNER (Programa de Control)

Mission Planner: Software de estación base por antonomasia. Sólo disponible para Windows es el más depurado y conocido de los softwares encargados de establecer una comunicación mediante MavLink con el drone y permitir así conseguir telemetrías de vuelo y la configuración remota de la aeronave.

#### 3.2.1.1. Calibración del Pixhawk – Drone modelo TAROT 650

- FRAME TYPE

Se elije el tipo de vehículo aéreo no tripulado que se está utilizando, en este caso un Quadcopter.



**Figura 19.** Frame Type. Mission Planner

- Accel Calibration

Se realiza la calibración de las 6 posiciones del drone, para ello primeramente se nivela el piloto automático para configurar el acelerómetro predeterminado Mín. / Máx. (3 ejes). Esto pedirá que se coloque su piloto automático en cada posición es decir izquierda, derecha, arriba, adelante, atrás.





*Figura 20.* Accel Calibration- Mission Planer

- Compass

Corresponde a la calibración de la brújula del drone la cual es la antena del GPS.



*Figura 21.* Calibración del GPS- Mission Planner

- Calibración del RC

El momento de terminar la calibración, las señales deben estar en nivel intermedio.



*Figura 22.* Calibración del RC - Mission Planner

- Flight models

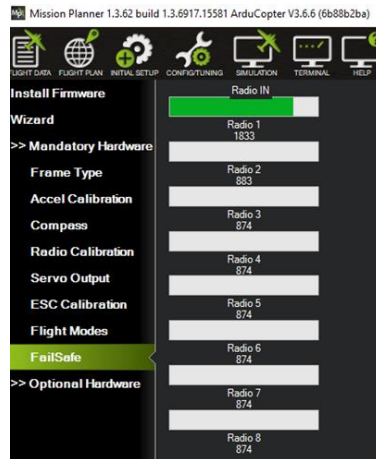
Posteriormente se elige hasta 6 tipos de vuelos que se manejan según la selección del RC.



*Figura 23.* Tipos de Vuelo- Mission Planner

- FailSafe

En caso de que la batería esté menor a un voltaje, el dron aterriza automáticamente, o regrese al punto de partida.



**Figura 24.** Modo a prueba de fallos- Mission Planner

Antes de iniciar el vuelo, se programa para que el giro de los motores inicialmente no sea brusco, causando una elevación indebida, para esto se configura en la opción Full Parameter List – MOT SPIN ARM. Se recomienda un valor de 120.

Command	Value	Units	Options	Desc
MNT_STAB_PAN	0		0 Disabled 1 Enabled	enable pan/yaw stabilisation relative to Earth
MNT_STAB_ROLL	0		0 Disabled 1 Enabled	enable roll stabilisation relative to Earth
MNT_STAB_TILT	0		0 Disabled 1 Enabled	enable tilt/pitch stabilisation relative to Earth
MNT_TYPE	0		0 None 1 Servo 2 3DR Solo 3 APMxros Serial 4-5 ToRM32 MAVLink 5-5 ToRM32 Serial	Mount Type (None, Servo or MAVLink)
MOT_BAT_CURR_MAX	0	Amps	0 200	Maximum current over which maximum throttle is limited (0 = Disabled)
MOT_BAT_CURR_TC	5	Seconds	0 10	Time constant used to limit the maximum current
MOT_BAT_IDX	0			
MOT_BAT_VOLT_MAX	0	Volts	6 35	Battery voltage compensation maximum voltage (voltage above this will have additional scaling effect on thrust). Recommended 4.4 "cell count, 0 = Disabled
MOT_BAT_VOLT_MIN	0	Volts	6 35	Battery voltage compensation minimum voltage (voltage below this will have additional scaling effect on thrust). Recommended 3.5 "cell count, 0 = Disabled
MOT_BOOST_SCALE	0			
MOT_HOVER_LEARN	2		0 Disabled 1 Learn 2 LearnAndSave	Enable/Disable automatic learning of hover throttle
MOT_PWM_MAX	0		0 2000	This sets the max PWM value that will ever be output to the motors, 0 = use RC3_MAX
MOT_PWM_MIN	0		0 2000	This sets the min PWM output value that will ever be output to the motors, input RC3_MIN
MOT_PWM_TYPE	0		0 Normal 1 OneShot 2 OneShot 125 3 Brushed 19kHz	This selects the output PWM type, allowing for normal PWM continuous output, OneShot or brushed motor output
MOT_SAFE_DISARM	0		0 PWM enabled while disarmed 1 PWM disabled while disarmed	Disables motor PWM output when disarmed
MOT_SPIN_ARM	120		0 Low 0.1 Default 0.2 High	Point at which the motors start to spin expressed as a number from 0 to 1 in the output range. Should be lower than MOT_SPIN_MIN
MOT_SPIN_MAX	0.95		0.9 Low 0.95 Default 1.0 High	Point at which the thrust saturates expressed as a number from 0 to 1 in the output range
MOT_SPIN_MIN	0.15		0.1 Low 0.15 Default 0.3 High	Point at which the thrust starts expressed as a number from 0 to 1 in the output range. Should be higher than MOT_SPIN_ARM
MOT_SPOOL_TIME	0.5	Seconds	0 2	Time in seconds to spool up the motors from zero to min throttle
MOT_THST_EXPO	0.65		0 25 0.8	Motor thrust curve exponent, from 0 for linear to 1.0 for second order curve
MOT_THST_HOVER	0.35		0 2 0.8	Motor thrust needed to hover expressed as a number from 0 to 1
MOT_YAW_HEADROOM	200	pwm	0 500	Yaw control is given at least this pwm range
NTF_BUZZ_ENABLE	1		0 Disable 1 Enable	Enable or disable the buzzer. Only for Linux and PX4 based boards.
NTF_BUZZ_PIN	0			
NTF_DISPLAY_TYPE	0		0 Disable 1 ssd1306 2 ah1106	This sets up the type of on-board I2C display. Disabled by default.

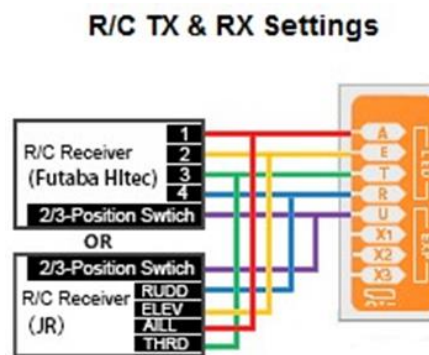
**Figura 25.** Parámetros recomendados - Mission Planner

Otro parámetro de consideración es el ángulo máximo con el que va a volar el drone una vez que se acelera en posición, este debe ser bajo, aproximadamente 2500 (ANG MAX).

Una vez que se cumple con la calibración y configuración correspondiente, se procede a realizar el vuelo.

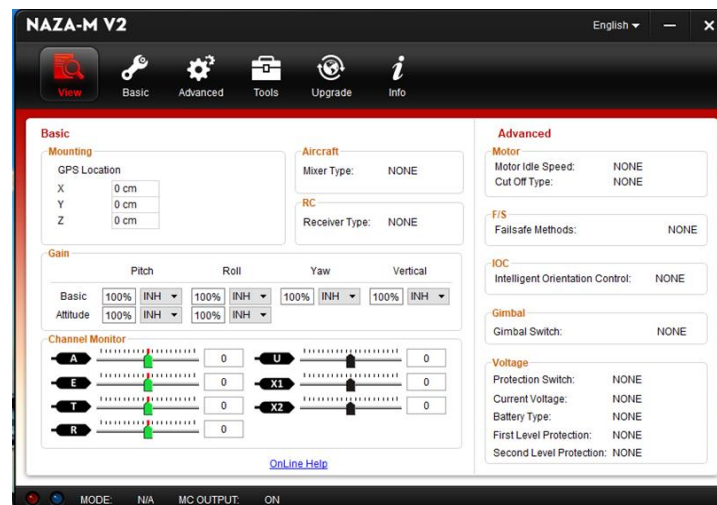
### 3.2.2. DJI NAZAM Assistant\_2.40 (Programa de Control)

Antes de proceder a configurar, se debe tener en cuenta la siguiente conexión, la cual es la tradicional para Quadcopter.



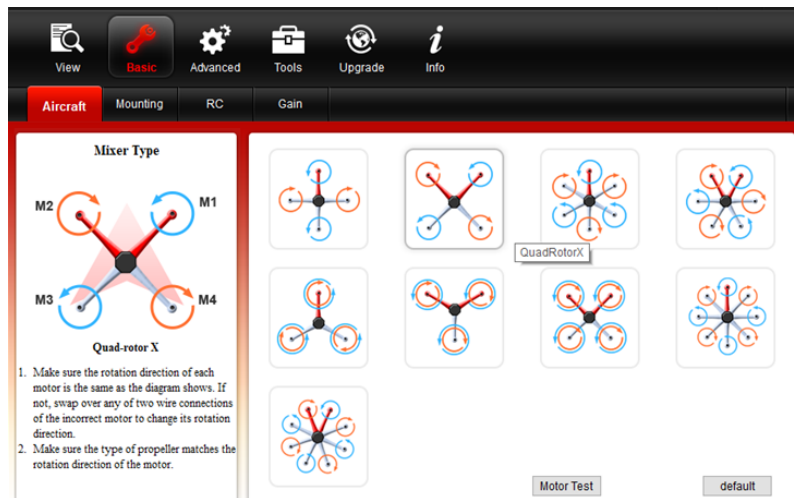
*Figura 26.* Conexión Recomendada para NAZA- M V2

La interfaz de este software nos muestra varias opciones que nos permiten la correcta configuración tanto de ganancias, localización del GPS, selección del tipo de Vehículo aéreo que se va a controlar, y la respectiva calibración tanto de sticks del RC, motores y del dron en sí.

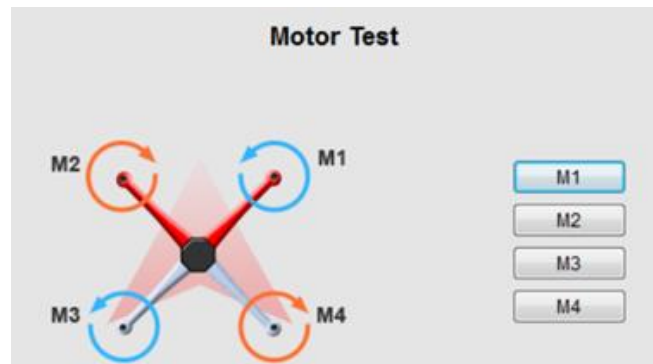


*Figura 27.* Software NAZA- MV2

Primeramente, se selecciona Basic, y se procede a elegir el tipo de multi rotor a configurar, es decir con el que se va a trabajar, para este caso es Quadrotor. Una vez seleccionado se da en Motor Test para verificar el correcto giro de los motores.



**Figura 28.** Mixer Type - NAZA- M V2



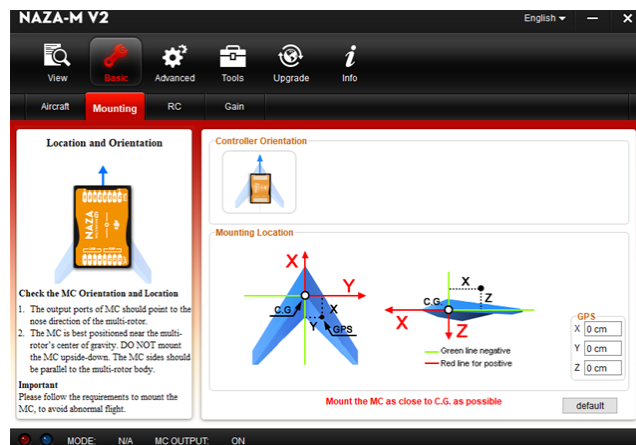
**Figura 29.** Prueba de sentido de giro de motores - NAZA- M V2

Seguidamente pasamos a Mounting, donde se configura la localización y orientación del GPS, se debe tener en cuenta que la flecha como nos indica debe ir de tal manera que apunte al frente del Drone, caso contrario se tendrá vuelos errados.



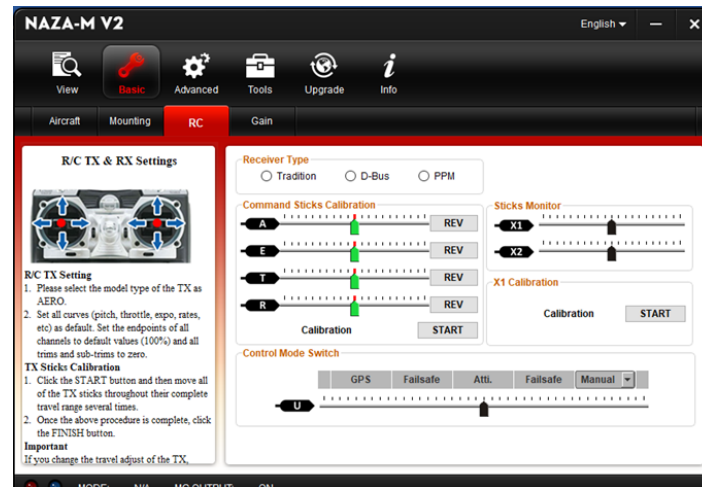
**Figura 30.** Posicionamiento del GPS y Controlador NAZA

Para medir los ejes se toma como referencia el centro del controlador Naza y medir tal cual nos indica en los 3 ejes, las flechas rojas indica el eje positivo. Los valores para el prototipo Tarot 650 de acuerdo con la postura del GPS son:  $X= 6$ ,  $Y= -5$ ,  $Z= -7$  (cm).



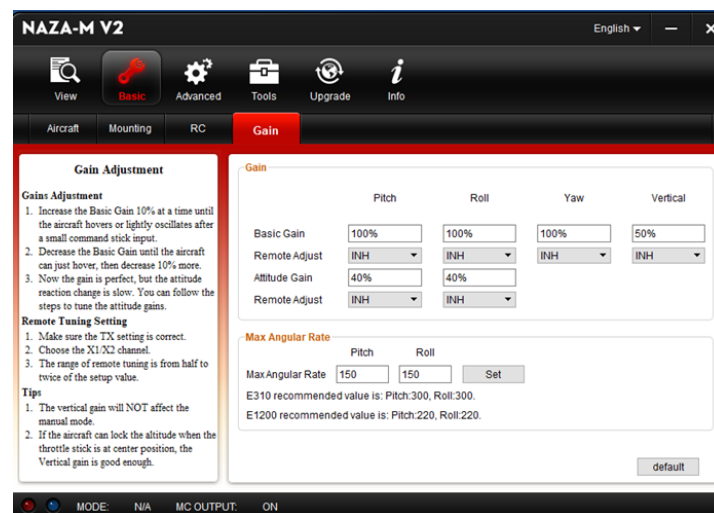
**Figura 31.** Distancias de los ejes del controlador al GPS

En la pestaña de RC, calibramos el radio control moviendo los sticks varias veces, de tal manera que todo quede centrado para una mejor comunicación de datos. De igual manera con el Switch de la parte superior derecha del radio control, se puede seleccionar el modo de vuelo, estos son GPS, Atti, y Manual. Previo al vuelo y calibración del GPS se recomienda que se encuentre en modo GPS.



**Figura 32.** Calibración del RC - NAZA- M V2

Lo que corresponde a las ganancias y a la máxima velocidad angular, se configura en la pestaña de ganancias. Mientras más alta sea la ganancia, mayor estabilización se tendrá, esto dependerá de varios parámetros del Drone como su peso, hélices y motores. Se recomienda iniciar un vuelo con la configuración establecida que es la habitual de Naza-M V2, para que en base a esta se vaya modificando los valores y se establezca una configuración para un vuelo adecuado.



**Figura 33.** Ajuste de Ganancias - NAZA- M V2

Por último, para la calibración del GPS, se debe entrar en modo GPS para que así el led indicador titile de color anaranjado, posteriormente se debe realizarle giros al dron en roll pitch y yaw, hasta que el led titile de color verde. Se puede conocer de mejor manera las indicaciones para la correcta calibración en (DJI, 2017).

### 3.3. Método de control

La lógica difusa se inició en 1965 por Lotfi A. Zadeh, profesor de la Universidad de California. Apareció como un arma importante para el control de procesos industriales complejos, así como también para la electrónica de entrenamiento y hogar, sistemas de diagnóstico y otros sistemas expertos.

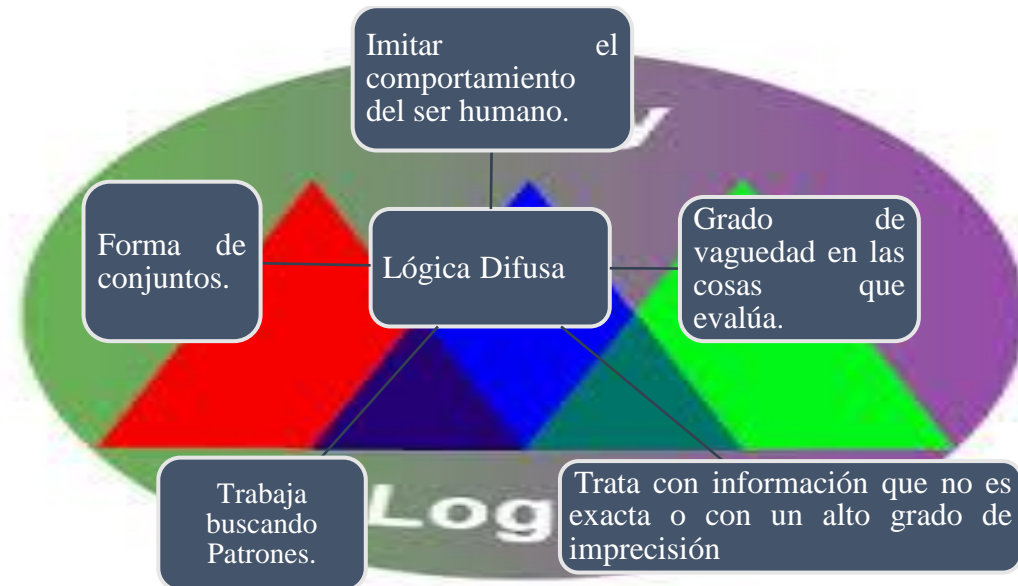
Como se muestra en (Udlap), la teoría difusa permite trabajar con información que no es exacta para poder definir evaluaciones convencionales, contrario con la lógica tradicional que permite trabajar con información definida y precisa.

Por otra parte, en (Daniel, Jesús, & Isaac., 2009), indica que este tipo de lógica se adecúa de mejor manera al mundo actual, que por tendencia puede percibirse y tratarse con expresiones propias, del tipo

"hace demasiado calor", " Poco positivo", etc.

La lógica difusa fue diseñada precisamente para imitar el comportamiento del ser humano, es decir trasladar la experiencia humana a un computador procesando información con incertidumbre con un razonamiento aproximado, evaluando las cosas con cierto nivel de incertidumbre.





**Figura 34.** Lógica Difusa.

**Tabla 14**

*Usos de la Lógica Difusa*

Usos de la Lógica Difusa	
Cuando Aplicar	Cuando NO aplicar
Cuando no existe un modelo matemático preciso.	No es recomendable utilizar la lógica difusa cuando algún modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema.
Cuando se necesite usar el conocimiento de un experto que utiliza conceptos ambiguos o imprecisos.	Cuando los problemas son lineales
Cuando ciertas partes de un sistema a controlar son desconocidas y no pueden medirse de forma confiable.	Cuando no tienen solución
Cuando el ajuste de una variable puede producir el desajuste de otras.	

• **¿Razones para usar lógica Difusa?**

- Facilidad para adaptarse a casos particulares con pocas variaciones de parámetros.
- Combinar en forma unificada expresiones lingüísticas con datos numéricos
- Algoritmos no muy sofisticados.

- Robustez del controlador.
- Gran cantidad de sistemas no lineales.

### 3.3.1. Lógica Difusa

#### 3.3.1.1. Funciones de Pertenencia

La función de pertenencia de un sistema o conjunto difuso  $A$ , sobre un universo “ $X$ ”, se define por  $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ , es decir que para cada elemento del universo “ $X$ ” se le asigna un grado de pertenencia desde 0 hasta 1, mientras este valor sea más cercano a 1, representa que aquel elemento pertenece con mayor fuerza al conjunto  $A$  que a otro conjunto difuso  $B$ .

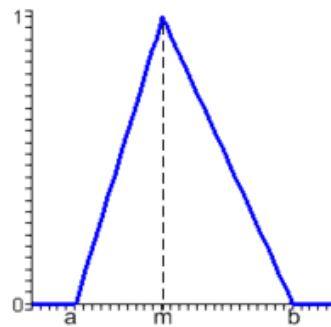
Estas funciones de pertenencia se pueden representar de manera gráfica, en el eje de las “ $x$ ” o abscisas va el universo de discurso, mientras que en el eje de las “ $y$ ” u ordenadas va el grado de pertenencia desde 0 hasta 1, de acuerdo a la circunstancia real en la que se encuentre el sistema.

En (O, 2014), nos indica que cualquier función puede ser válida para definir un conjunto difuso, por su simplicidad matemática las más comúnmente utilizadas son:

- Triangular

Función determinada por una probabilidad continua que tienen límite mínimo  $\mathbf{a}$ , y límite máximo  $\mathbf{b}$ , para los cuales su grado de pertenencia es 0, mientras que para el punto modal  $\mathbf{m}$  es **1**, se debe tener en cuenta que esta función no es obligatoriamente simétrica.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{si } a \leq x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{si } m < x < b \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

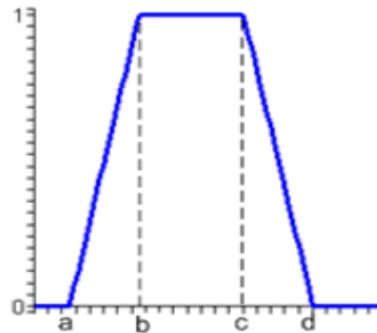


**Figura 35.** Função Triangular

○ Trapezoidal

Função determinada por seu valor mínimo **a**, e valor máximo **d**, estes com valor **0**, e seus valores de suporte **b** e **c**, com graus de pertinência máximo **1**, esta função pode converter-se em triangular, donde **d > c > b > a**, esta função está definida por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x < a) \text{ ó } (x > d) \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2)$$

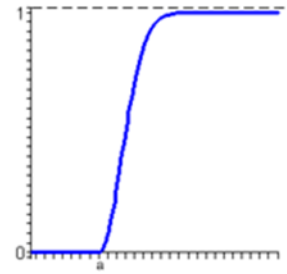


**Figura 36.** Função Trapezoidal

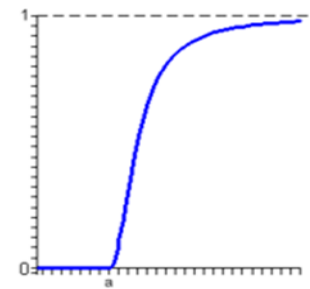
○ Gamma

Função determinada com seu valor mínimo **a**, este valor cresce rapidamente dependendo do valor de **k**, donde **k > 0**, posee asíntota horizontal en 1. Su crecimiento se define de la siguiente manera.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 1 - e^{-k(x-a)^2} & \text{si } x > a \end{cases} \quad (3)$$



$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{k(x-a)^2}{1+k(x-a)^2} & \text{si } x > a \end{cases} \quad (4)$$



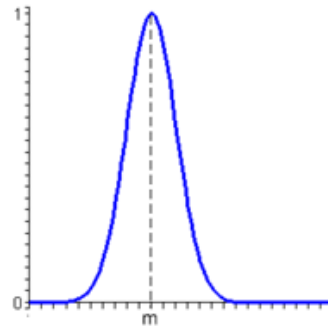
**Figura 37.** Función Gamma

○ Gaussiana

Función determinada por el término medio **m**, el parámetro **k** de esta función corrobora que cuando **k** crece, más estrecha es dicha campana.

$$k > 0$$

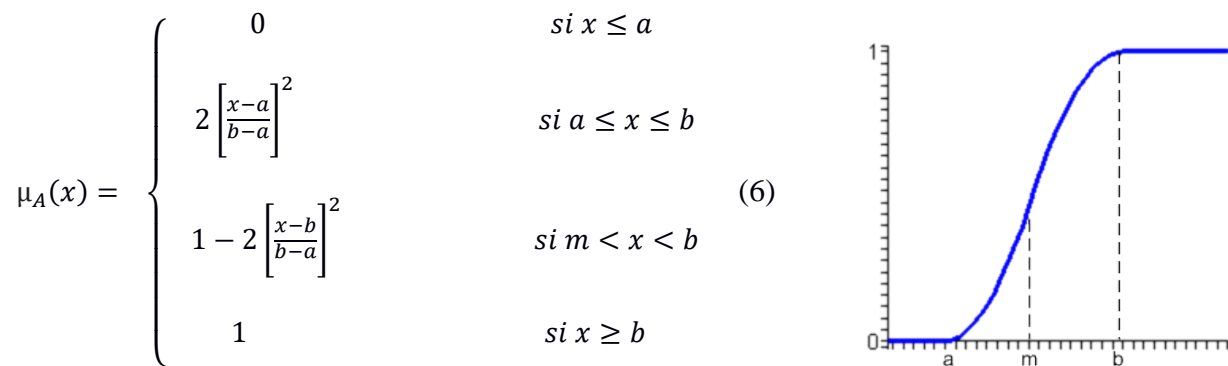
$$\mu_A(x) = e^{-k(x-m)^2} \quad (5)$$



**Figura 38.** Función Gaussiana

○ Sigmoidal

Función determinada por su valor mínimo **a**, valor máximo **b** y el punto **m**, donde  $b > m > a$ . Si la distancia entre al valor **a** y **b** es más pequeña, el aumento será más rápido. Siendo **m** el punto intermedio entre **a** y **b**, que es lo más usual,  $m = (a+b) / 2$ , se tiene:



**Figura 39.** Función Sigmoide

Consideraciones:

- Se recomienda colocar funciones de pertenencia de manera impar.
- Siempre solapados
- Asignando valores lingüísticos
- Extremos generalmente Trapezoidales

### 3.3.1.2. Conjuntos clásicos vs Conjuntos difusos

#### • Conjuntos Clásicos

Se generan para que el ser humano distinga y clasifique ciertos elementos y conceptos a través de funciones y grados de pertenencia, donde se generan valores en el rango de [0 -1], en tanto que los conjuntos clásicos se toman valores de 0 o 1.

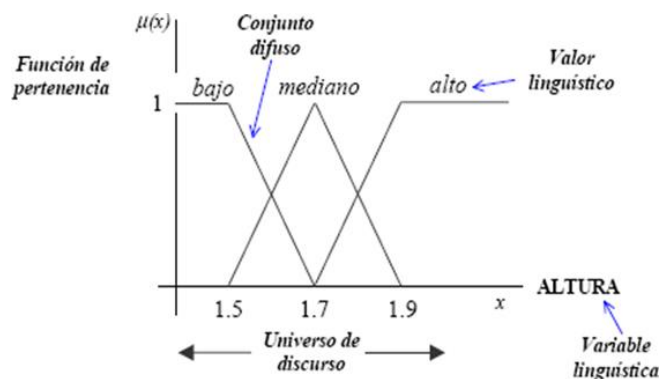
$$u_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin A \\ 1 & \text{si } x \in A \end{cases} \quad (7)$$

#### • Conjuntos Difusos

En (Teoría de conjuntos difusos y lógica difusa, s.f.), manifiesta que estos conjuntos permiten simbolizar acciones y relaciones indefinidas. El razonamiento difuso se da mediante el proceso y combinación de hechos difusos como también reajuste de puntualidad de situaciones reales.

En la teoría de conjuntos difusos se definen también las operaciones de unión, intersección, diferencia, negación o complemento, y otras operaciones sobre conjuntos, en los que se basa esta lógica.

- Surge por circunstancias en las que no se tiene de manera conceptual los límites establecidos
- La función de pertenencia puede tomar valores del intervalo entre 0 y 1.
- La transición del valor entre el intervalo de 0 y 1 es gradual y no cambia de manera instantánea como pasa con los conjuntos clásicos.
- El conjunto difuso está conformado por una variable lingüística definida por una palabra que determina el universo de discurso, y por su valor lingüístico que es un adjetivo o etiqueta de la variable lingüística.



**Figura 40.** Conjunto Difuso. Obtenido de [35]

- Controlador Difuso

Según (K & M, 2002), el control de sistemas borrosos se expresa de mejor manera como un tipo de control a través palabras que permiten aclarar situaciones reales, donde se usan sentencias para sustituir ecuaciones que definen el comportamiento de un proceso. No obstante, las variables que

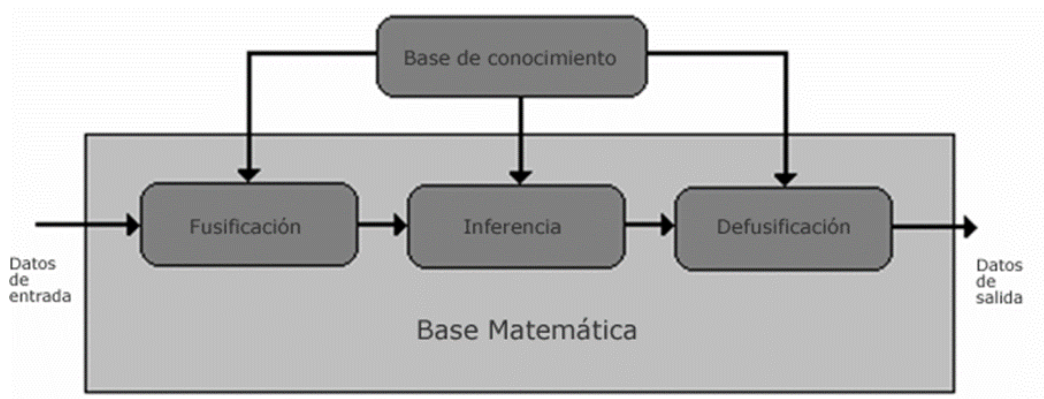
constituyen dichos procesos no se miden en palabras sino de manera numérica, para esto se diseñan tanto Fusificación, Defusificación y leyes de inferencia que forman parte de todo sistema difuso.

**Tabla 15**

*Ventajas y Desventajas del Control Difuso*

Ventajas	Desventajas
<b>No requiere conocer el modelo dinámico del sistema a controlar (Planta).</b>	Se necesita conocer las reglas lingüísticas de un experto cuando no se conoce el modelo del sistema a controlar.
<b>No necesita aproximar el modelo</b>	
<b>No necesita ser linealizado</b>	
<b>Facilita el diseño del controlador</b>	

Este tipo de controlador trabaja de manera similar que un controlador clásico, puesto que a través de la entrada y un algoritmo produce la salida correspondiente, a este proceso se lo denomina inferencia difusa establecido por ciertas reglas. En la siguiente figura se visualiza las 4 partes del controlador difuso.



**Figura 41.** Esquema de un Control Difuso. Obtenido [35]

- **Preprocesamiento:** Acondicionar las señales antes que entren al procesador digital (tarjeta controladora, computadora etc.) (Filtra la señal o amplificar, muestrear la señal).

- **Fusificación:** Cambia el valor de entrada, en una variable difusa, consiguiendo que los valores lingüísticos tengan su grado de pertenencia.

En (Yen & Langari, 2006), se detalla que cada valor lingüístico tendrá su grado de pertenencia mayor en una expresión que en las demás. Una vez que se tienen expresadas tanto las variables como valores en forma lingüística se pueden establecer relaciones lógicas entre ellas, típicamente a través de reglas tales como, “si...entonces (IF-THEN)”.

- **Reglas de Control:** Reglas lingüísticas que definen como se debe controlar el sistema, se definen por la experiencia de algún operador o de quien diseña el controlador.
- **Método de Inferencia:** Es el algoritmo que seguirá la computadora para inferir la conclusión a partir de las señales entrantes y las reglas de control.
- **Defusificación:** Convierte el conjunto difuso resultante de la inferencia en una cantidad certera para generar la señal de control.

En (Yu, 2004), indica que se adecua los valores difusos generados en la inferencia en valores reales que posteriormente serán usados en el bloque de control.

En la Defusificación se utilizan métodos matemáticos:

- Método del Centroide
- Método del Promedio Ponderado
- Método de Membresía del Medio del Máximo
- **Post-Procesamiento:** Genera la salida esperada en base de la cantidad defusificada acondicionándola al actuador.



Ej. Filtrar señal, Convertir una señal discreta a una continua con circuito de retenedor de orden 0 o 1.

### 3.3.1.3. Mecanismo de inferencia

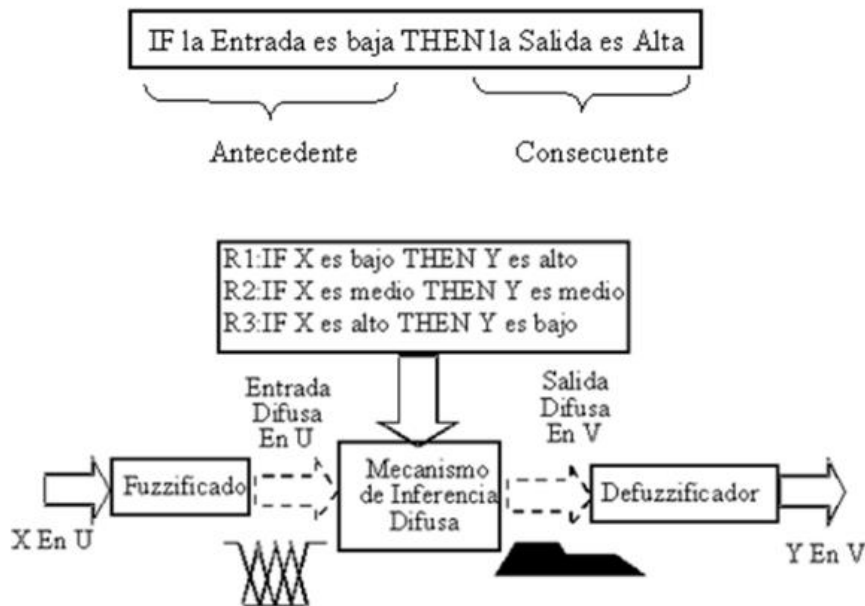
Son sistemas definidos con un aproximado razonamiento que muestrean un vector de entradas basándose en lógica difusa a una única salida la cual es de tipo escalar. Este proceso de inferencia verifica y valora las distintas reglas establecidas para tener conclusiones de la o las variables de salida. Los mecanismos de inferencia se basan en “**Si** antecedente **ENTONCES** consecuente o **SI** condición **ENTONCES** acción”. Los mecanismos más usados son los de Sugeno y Mamdani:

- Mamdani

Para el uso de este método, se debe tener en cuenta que el número de variables sea de manera reducida, caso contrario se pueden presentar varios problemas tales que:

- Al usar muchas variables, el número de reglas aumenta de manera exponencial produciendo confusiones.
- Al tener bastantes variables se deberán generar más reglas que abarquen a todas las mismas, de tal manera que no se puede determinar si son apropiadas.
- El exceso de variables causará confusiones entre las condiciones y conclusiones, es decir se puede redondear las relaciones, en consecuencia, será complicado establecer la base de funcionamiento del sistema.

En (2013), indica que una regla de la base de conocimiento tiene dos partes, el antecedente y el consecuente, como se aprecia en la siguiente figura 42.:



**Figura 42.** Método de inferencia de Mamdani, Obtenido de [42]

Como se indicó anteriormente la salida del sistema difuso es un conjunto difuso, para volver a la salida numérica se ocupan métodos tales como centros promedio o centro de gravedad, detallados así:

- Centro de Gravedad:

$$Salida = \frac{\sum_i b_i \int u(i)}{\sum_i \int u(i)} \quad (8)$$

- Centros promedios:

$$Salida = \frac{\sum_i b_i u_{premise(i)}}{\sum_i u_{premise(i)}} \quad (9)$$

Donde:

$i$ : número de regla.

$b_i$ : Centro de la función de membresía de la consecuente regla  $i$ .

$u$ : Valor de la premisa.

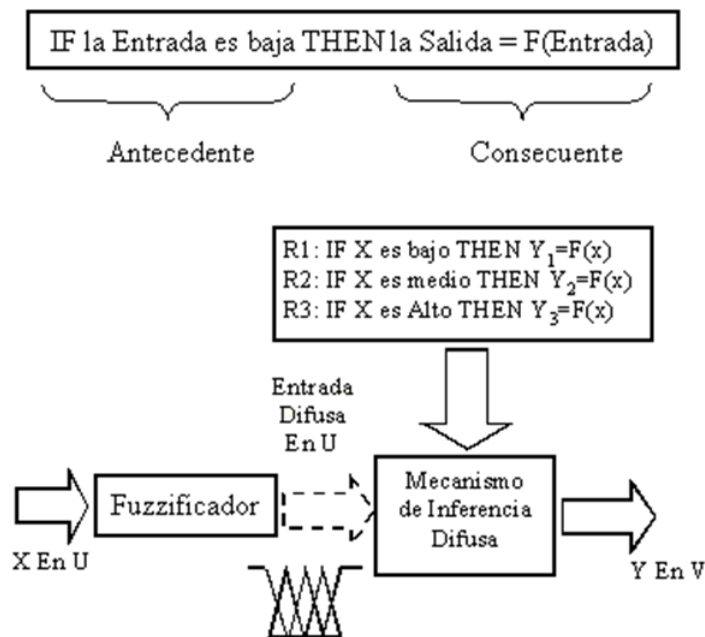
$\int u(i)$ : Área de la función de membresía  $i$ .

- Sugeno

Para el uso de este método se considera que la salida se obtiene a partir de la entrada difusa, al igual que no existen membresías de salida.

Posee mejor tiempo de procesamiento ya que evita el proceso de Defusificación.

En el método de Sugeno el consecuente pasa a ser una función de la entrada que el sistema tenga en un momento, mas no es una variable lingüística.



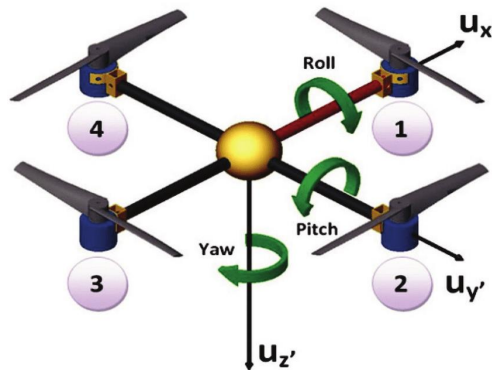
**Figura 43.** Método de Inferencia de Sugeno. Obtenido de [42]

#### 3.3.1.4. Diseño del Controlador Difuso

Como primera parte de diseño se definen las variables de entrada como de salida del controlador al igual que el pre y post procesamiento para que el controlador interprete y establezca los datos de

manera correcta. Luego de esto se establece la base del conocimiento del sistema a controlar por parte de expertos, se diseña tanto Fusificación reglas de inferencia y Defusificación, en el orden mencionado.

Al establecer un sistema de coordenadas, los ángulos de navegación son Eulerianos, los cuales se usarán para determinar la posición en el espacio, estos ángulos describirán la posición final en base a la posición inicial usando las 3 rotaciones conocidas yaw, pitch y roll, aplicándose en el orden que se mencionó. [36]



**Figura 44.** Cabeceo, Alabeo) y Guiñada del Dron. Obtenido de [36]

### 3.4. Sistema de Comunicación

Es la transmisión de información de un punto de origen (emisor) a otro punto final (receptor). La información es un mensaje cifrado, el cual se le ha asignado un significado. El mensaje debe ser único e idóneo para ser enviado por el emisor y que el receptor sea capaz de detectarlo y entenderlo.

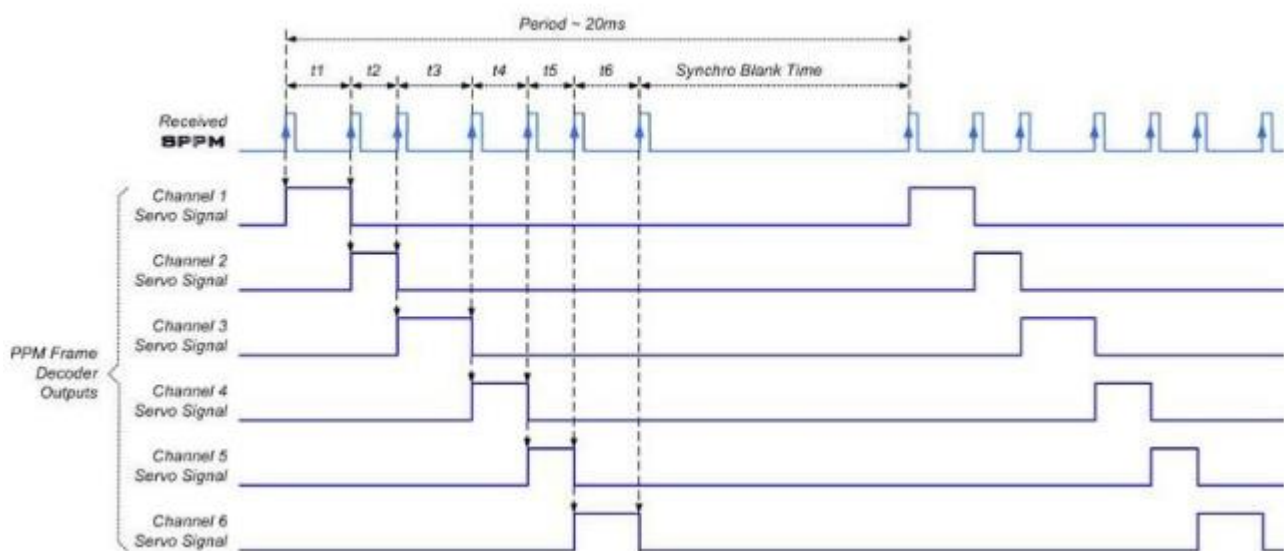
En la comunicación existen cinco elementos los cuales son: Emisor, codificación, mensaje, canal y decodificación.

La comunicación inalámbrica se presenta cuando el emisor y receptor están en movimiento o estáticos. La importancia de una comunicación inalámbrica es la ausencia de cables físicos, ya que, si no fuera así, no se permitiría la movilidad del receptor o emisor. Por lo tanto, esencialmente la comunicación se la realiza mediante vía Radio Frecuencia.

### 3.5. Instrumentación.

El Pixhawk y el Naza M-V2 se comunican al Radio Control utilizando el método de transmisión de “Modulación de Posición de Puntos” (PPM). Entre sus características principales es que solo necesita un cable para transmitir simultáneamente la señal de varios canales, es decir utilizando el cable positivo con el negativo conjuntamente con el cable de la señal transmisora bastara para que los distintos canales funcionen.

Las señales que se transmiten mediante el cable se basan en señal PWM, pero moduladas de forma diferente. Estas siguen siendo señales analógicas. En la siguiente figura se muestra cómo se transmiten las distintas señales de los canales de manera simultánea:



**Figura 45.** PPM- Modulación de Posición de Puntos

Como se observa en la figura 45, que corresponde al diagrama de tiempos de PPM, las señales de los canales se transmiten uno tras otro. La frecuencia de transmisión puede variar entre 433 MHz y 2,4 GHz, y en los de uso profesional hasta 5,8GHz. Para nuestro caso se utiliza una frecuencia de transmisión de 2,4 GHz.

## CAPITULO IV

### CONTROLADOR DIFUSO

#### 4.1. Base de Conocimiento

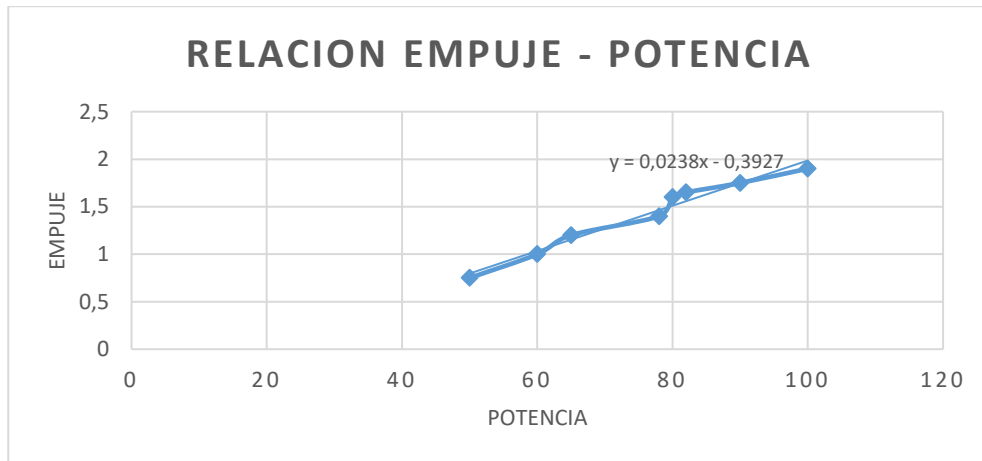
Previo al diseño del controlador Fuzzy basado en información heurística con cierto grado de vaguedad, es indispensable que un experto en el tema manifieste su conocimiento de tal manera que se logre de manera eficaz y óptima el funcionamiento del sistema. Inicialmente se tiene en cuenta tanto los sistemas de referencia, rotaciones, configuraciones de fuerza de empuje y potencia proporcionada por los motores.

##### 4.1.1. Relación Empuje – Potencia

Conforme con el Datasheet de los motores MN3510 KV630, el empuje que genera en base al porcentaje de potencia es:

**Tabla 16**  
*Relación Empuje - Potencia*

% POTENCIA	EMPUJE (Kgf)
50	0.75
60	1
65	1.15
78	1.4
80	1.6
82	1.67
90	1.73
100	1.9



**Figura 46.** Relación de Empuje - Potencia de motores

Una vez observado la relación y comportamiento de los actuadores, se procede a obtener la ecuación de tendencia o aproximación lineales.

$$E = 0.0238 P - 0.3927 \quad (10)$$

Donde:

E: Valor del empuje de los motores dado en Kgf

P: Valor del PWM en %, que activa los controladores de velocidad ESC.

Dentro de los protocolos de radio que se usan en transmisión de datos de RX a los controladores de vuelo son tanto el PWM como el PPM, como se discute en (Liang), tanto el piloto automático como los controladores de velocidad electrónicos (ESC) utilizan pulsos PWM, mientras que Transmisores RC y Receptores RC utilizan PPM, que es el modo de funcionamiento de nuestro Radio control Turnigy 9X.





**Figura 47.** Configuración PPM en el RC

#### 4.1.2. Configuración, Sistemas Referenciales y Orientaciones.

Los sistemas referenciales para el movimiento espacial del cuadricóptero podrían ser con respecto al piso, o con respecto al centro del cuerpo fijo del cuadricóptero, mientras que las rotaciones son las 3 ya conocidas que son: Roll, Pitch, Yaw, cuyas variaciones angulares son en los ejes x, y, z respectivamente.

Antes de establecer las ecuaciones, (Bousbaine & T, 2015), recomienda que el centro de masa del Drone debe ser el origen del sistema de referencia, su orientación o configuración en forma de equis (X), los ejes del sistema referencial coinciden con los ejes de inercia. Usando la fuerza de momento de balance, las ecuaciones que describen el movimiento son:

$$\dot{\theta}I_{xx} = (F1 - F2 + F3 - F4)I \quad (11)$$

$$\ddot{\phi}I_{yy} = (-F1 - F2 + F3 + F4)I \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) permitirán apreciar que pitch y roll son controlados con más sustentación:

$$\ddot{\psi} I_{zz} = (\tau_{m1} - \tau_{m2} - \tau_{m3} + \tau_{m4}) \quad (13)$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \sum_1^4 F_i (\sin \varphi \sin \psi + \cos \psi \cos \psi \sin \theta) \quad (14)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m} \sum_1^4 F_i (\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi) \quad (15)$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{m} \sum_1^4 F_i (\cos \varphi \cos \theta) \quad (16)$$

Donde:

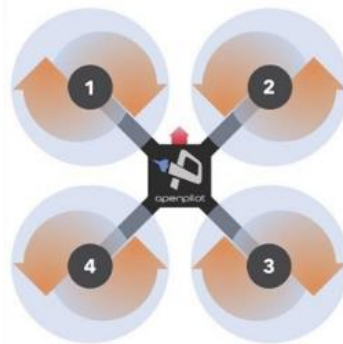
Fi: Fuerza generada por el motor i.

l: Longitud del brazo del cuadricóptero.

$\tau$ : Torque producido por cada motor.

I: Momento de Inercia.

La energía necesaria para la estabilización en un determinado momento se distribuye en partes iguales en pares de motores respectivamente, es decir 2 motores intentaran corregir el ángulo y los otros 2 restan del par opuesto.



**Figura 48.** Configuración en Equis del Cuadricóptero, tomado de (OpenPilot, 2017)

Por ejemplo, si en un determinado momento se desplaza hacia adelante, los 2 motores de la parte de atrás es decir 3 y 4 (Configuración en equis), tendrían mayor potencia que los dos de adelante (1 y 2), y viceversa, de la misma manera para un giro hacia la derecha, los motores con más energía serán los motores del lado contrario (1 y 4) , para un giro hacia la izquierda los motores con mayor potencia son (2 y 3).

Como se mencionó anteriormente, los motores generan el empuje de acuerdo con la potencia proporcionada por los ESC, estos reciben una señal PWM en microsegundos provenientes del controlador, mientras que para la transmisión y recepción del RC se usan señales PPM.

## 4.2. Fusificación

Las variables de entradas y salidas que se establezcan deben ser transformadas en variables lingüísticas con su pertinente valor lingüístico y valor de pertenencia para cada función del diseño del controlador.

### 4.2.1. Variables de Entrada

Error del ángulo:  $e(t)$

Velocidad Angular:  $\frac{de(t)}{dt}$

**Tabla 17**

*Variable Lingüística Error del ángulo.*

Error de ángulo (grados)		
Abreviación	Valor Lingüístico	Rango de Valores
<b>BN</b>	Bastante negativo	$[-\infty, -210]$
<b>PN</b>	Poco negativo	$[-210, -105]$
<b>C</b>	Cero	$[-105, 105]$
<b>PP</b>	Poco positivo	$[105, 210]$
<b>BP</b>	Bastante positivo	$[210, \infty]$

**Tabla 18**  
*Variable Lingüística Velocidad Angular*

Velocidad angular ( $\frac{\text{grados}}{\text{s}}$ )		
Abreviación	Valor Lingüístico	Rango de Valores
<b>BN</b>	Bastante negativo	$[-\infty, -320]$
<b>PN</b>	Poco negativo	$[-320, -160]$
<b>C</b>	Cero	$[-160, 160]$
<b>PP</b>	Poco positivo	$[160, 320]$
<b>BP</b>	Bastante positivo	$[320, \infty]$

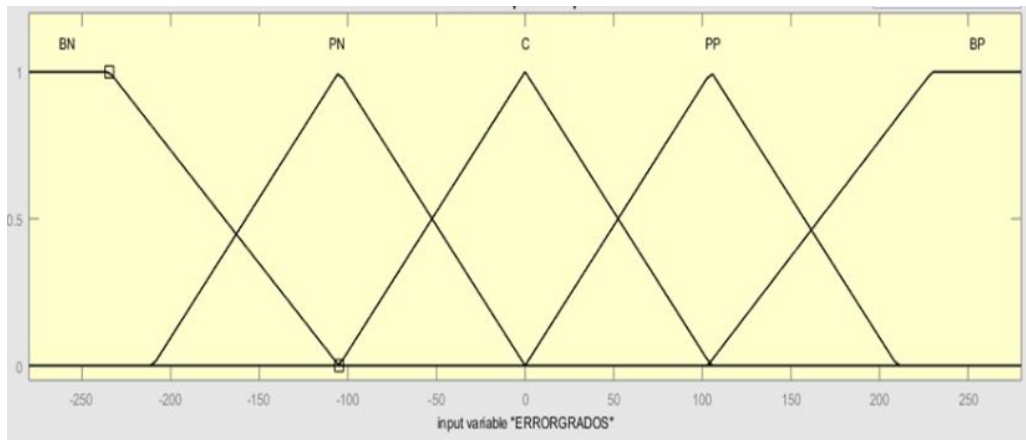
#### 4.2.2. Variable de Salida

PWM:  $u(t)$

**Tabla 19**  
*Variable Lingüística PWM*

PWM ( $u_s$ )		
Abreviatura	Valor Lingüístico	Rango de valores
<b>N6</b>	Negativo 6	$[-650, -550]$
<b>N5</b>	Negativo 5	$[-550, -450]$
<b>N4</b>	Negativo 4	$[-450, -350]$
<b>N3</b>	Negativo 3	$[-350, -250]$
<b>N2</b>	Negativo 2	$[-250, -150]$
<b>N1</b>	Negativo 1	$[-150, -50]$
<b>C</b>	Cero	$[-50, 50]$
<b>P1</b>	Positivo 1	$[50, 150]$
<b>P2</b>	Positivo 2	$[150, 250]$
<b>P3</b>	Positivo 3	$[250, 350]$
<b>P4</b>	Positivo 4	$[350, 450]$
<b>P5</b>	Positivo 5	$[450, 550]$
<b>P6</b>	Positivo 6	$[550, 650]$

### 4.2.3. Interfaz de Fusificación



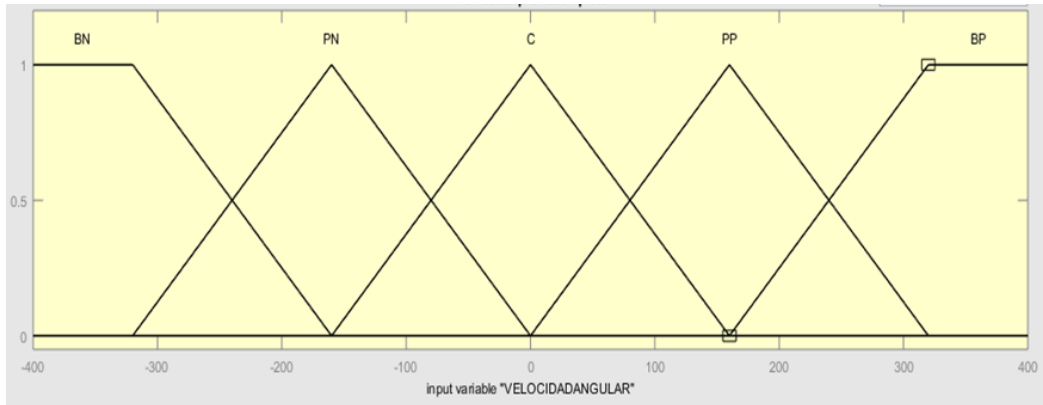
**Figura 49.** Fusificación, Variable Error del ángulo.

En la Figura 49., el Error del ángulo se ocupan en los extremos funciones de membresía trapezoidales (BN y BP) y triangulares para el resto de los valores lingüísticos. Para el análisis se toma el valor de -100, el cual tiene activas las funciones de membresía PN y C, observando en la interfaz que este valor tiene mayor grado de pertenencia en la función PN. Tanto PN y C son triangulares, por ende, usando la caracterización matemática de esta función, se tiene:

$$e(t) = -100$$

$$\mu_{PN} = \frac{0 + 100}{0.5(210)} = 0.952$$

$$\mu_z = \frac{-100 + 105}{0.5(210)} = 0.048$$



**Figura 50.** Fusificación, Velocidad Angular.

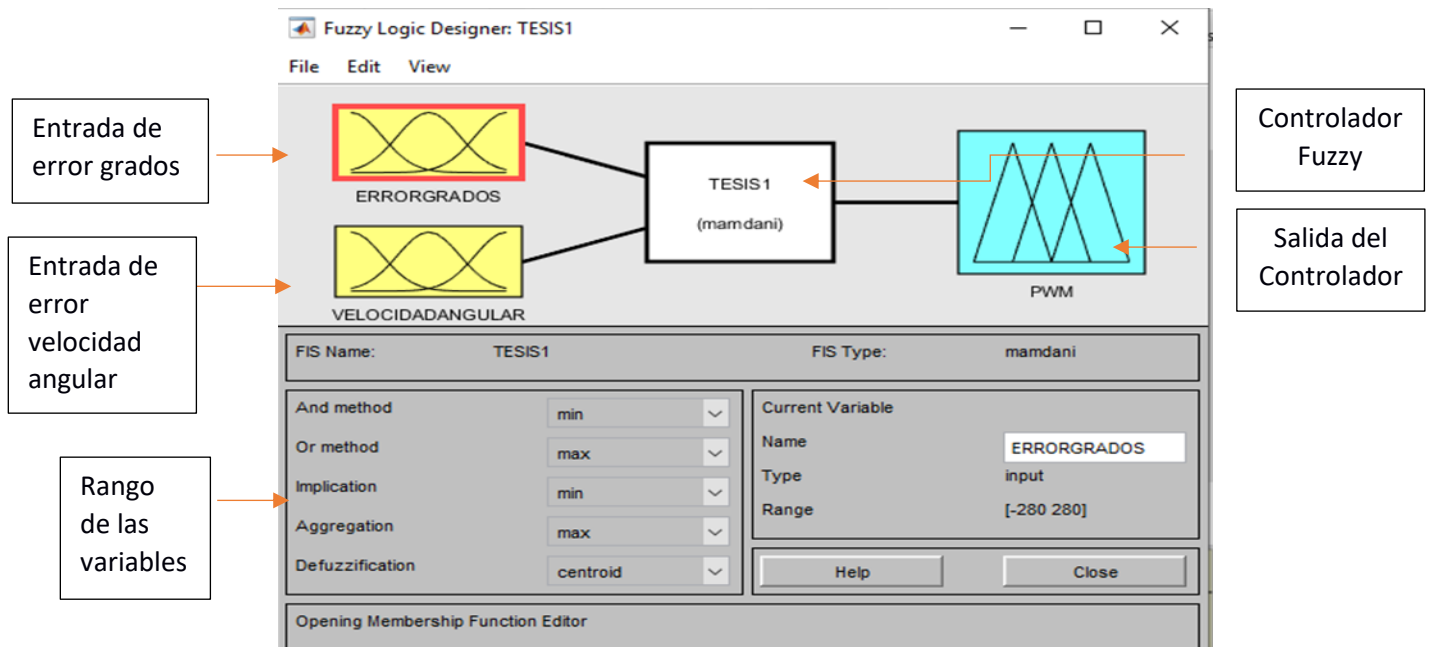
Para la Fusificación de la velocidad angular, al igual que en la anterior interfaz, en los extremos se tiene funciones de membresía trapezoidales, mientras que las otras son triangulares. Para el análisis se toma el valor de 260, el cual tiene activa la función de pertenencia PP y BP, donde se observa que mayor grado de pertenencia tiene BP que PP, entonces con la respectiva caracterización matemática se tiene:

$$\frac{de(t)}{dt} = 260$$

$$\mu_{BP} = \frac{260 - 160}{0.5(320)} = 0.625$$

$$\mu_{PP} = \frac{320 - 260}{0.5(320)} = 0.375$$

Con estos valores, a través del método de Mamdani se encontrará el valor de la premisa.



*Figura 51.* Interfaz del Controlador Fuzzy

### 4.3. Leyes de Inferencia

#### 4.3.1. Método de Mamdani

$$u = \min \left\{ \mu_e(t), \mu_{\frac{de(t)}{dt}} \right\} \quad (17)$$

$$u = \min \{ 0.952, 0.625 \} = 0.625$$

$$u = \min \{ 0.952, 0.375 \} = 0.375$$

$$u = \min \{ 0.048, 0.625 \} = 0.048$$

$$u = \min \{ 0.048, 0.375 \} = 0.375$$

##### 4.3.1.1. Base de Reglas

Las reglas que permitirán el control adecuado del cuadricóptero, es en base al número de funciones de pertenencia tanto del error como de la velocidad angular, para cada una son 5 funciones, entonces se tendrá un total de 25 reglas a definirse.

Para la definición de las reglas de control, es de suma importancia la base de conocimiento, así como el comportamiento del sistema.

El comportamiento del sistema, al igual que la base de conocimiento son de gran importancia para establecer las reglas que rigen el control del sistema. Para ver estas reglas de control de manera más específica se detalla en una matriz las variables de entrada y salida acorde a la circunstancia que se pueda presentar durante el vuelo.

**Tabla 20**  
*Base de Reglas*

		Velocidad angular				
		BN	PN	C	PP	BP
Error	BN	N6	N4	N2	C	P2
	PN	N5	N3	N1	P1	P3
	C	N4	N2	C	P2	P4
	PP	N3	N1	P1	P3	P5
	BP	N2	C	P2	P4	P6

- En base a la tabla anterior, se puede establecer las 25 reglas, por ejemplo: Si el error es cero (C) y la velocidad angular es Poco negativa (PN), entonces la salida será N2.
- Si el error es poco negativo (PN) y la velocidad angular es poco positivo (PP), entonces la salida será P1.

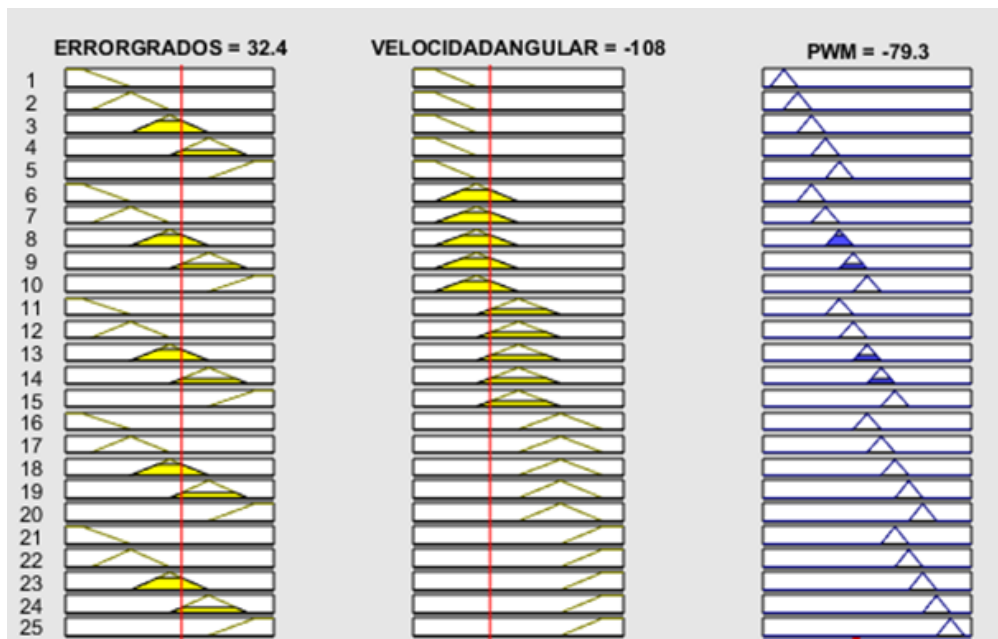
Así sucesivamente hasta establecer las 25 reglas. En general las reglas tienen la forma: **Si** “error” es ..., y “velocidad angular” es ..., entonces “PWM” es ... Las 25 reglas que definirán el comportamiento son:



1. If (ERRORGRADOS is BN) and (VELOCIDADANGULAR is BN) then (PWM is N6) (1)
2. If (ERRORGRADOS is PN) and (VELOCIDADANGULAR is BN) then (PWM is N5) (1)
3. If (ERRORGRADOS is C) and (VELOCIDADANGULAR is BN) then (PWM is N4) (1)
4. If (ERRORGRADOS is PP) and (VELOCIDADANGULAR is BN) then (PWM is N3) (1)
5. If (ERRORGRADOS is BP) and (VELOCIDADANGULAR is BN) then (PWM is N2) (1)
6. If (ERRORGRADOS is BN) and (VELOCIDADANGULAR is PN) then (PWM is N4) (1)
7. If (ERRORGRADOS is PN) and (VELOCIDADANGULAR is PN) then (PWM is N3) (1)
8. If (ERRORGRADOS is C) and (VELOCIDADANGULAR is PN) then (PWM is N2) (1)
9. If (ERRORGRADOS is PP) and (VELOCIDADANGULAR is PN) then (PWM is N1) (1)
10. If (ERRORGRADOS is BP) and (VELOCIDADANGULAR is PN) then (PWM is Z) (1)
11. If (ERRORGRADOS is BN) and (VELOCIDADANGULAR is C) then (PWM is N2) (1)
12. If (ERRORGRADOS is PN) and (VELOCIDADANGULAR is C) then (PWM is N1) (1)
13. If (ERRORGRADOS is C) and (VELOCIDADANGULAR is C) then (PWM is Z) (1)
14. If (ERRORGRADOS is PP) and (VELOCIDADANGULAR is C) then (PWM is P1) (1)
15. If (ERRORGRADOS is BP) and (VELOCIDADANGULAR is C) then (PWM is P2) (1)
16. If (ERRORGRADOS is BN) and (VELOCIDADANGULAR is PP) then (PWM is Z) (1)
17. If (ERRORGRADOS is PN) and (VELOCIDADANGULAR is PP) then (PWM is P1) (1)
18. If (ERRORGRADOS is C) and (VELOCIDADANGULAR is PP) then (PWM is P2) (1)
19. If (ERRORGRADOS is PP) and (VELOCIDADANGULAR is PP) then (PWM is P3) (1)
20. If (ERRORGRADOS is BP) and (VELOCIDADANGULAR is PP) then (PWM is P4) (1)
21. If (ERRORGRADOS is BN) and (VELOCIDADANGULAR is BP) then (PWM is P2) (1)
22. If (ERRORGRADOS is PN) and (VELOCIDADANGULAR is BP) then (PWM is P3) (1)
23. If (ERRORGRADOS is C) and (VELOCIDADANGULAR is BP) then (PWM is P4) (1)
24. If (ERRORGRADOS is PP) and (VELOCIDADANGULAR is BP) then (PWM is P5) (1)
25. If (ERRORGRADOS is BP) and (VELOCIDADANGULAR is BP) then (PWM is P6) (1)

**Figura 52.** Reglas de Fusificación

A través de la interfaz de Matlab, podemos visualizar y manipular de manera gráfica tanto entradas como salidas, considerando los valores de todas ellas, por ejemplo:

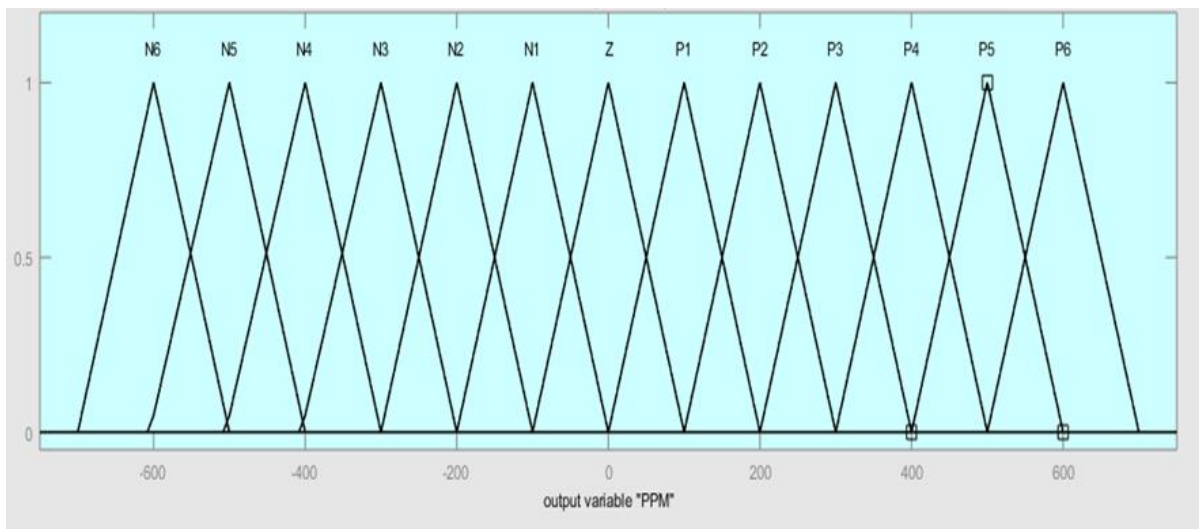


**Figura 53.** Visualización de Reglas.

El valor de error grados es 32.4, esto pertenece tanto a una función PP o C, en tanto que la variable velocidad angular tiene un valor de -108, es decir una función de pertenencia de PN o C, de acuerdo con el grado de pertenencia correspondiente. Con estos valores de entrada se puede apreciar que la salida PWM es de  $-79.3 \mu\text{s}$ .

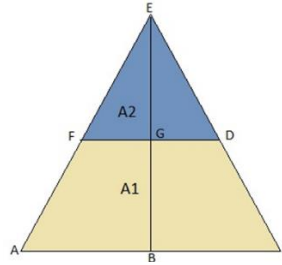
Así mediante esta interfaz se puede ir variando y verificando los valores para cada instante de vuelo al que perteneciera, teniendo como objetivo la estabilización del cuadricóptero ante perturbaciones moderadas de ráfagas de viento.

#### 4.4. Defusificación



**Figura 54.** Defusificación, Variable de Salida PWM

Para la respectiva Defusificación, se han creado solamente funciones de pertenencia del tipo triangular, de este modo se usa el método del centroide con cálculo de áreas para las premisas correspondientes, con los valores determinados anteriormente.



**Figura 55.** Triángulo- Centro de gravedad

Para calcular el centro de gravedad, aplicamos semejanza de triángulos, donde se tiene:

$$A1 = \overline{AB} * \overline{BE} = AT - A2 \quad (18)$$

$$A2 = \overline{FG} * \overline{GE} \quad (19)$$

$$AT = \frac{\overline{AC} * \overline{BE}}{2} \quad (20)$$

$$A1 = \frac{\overline{AC} * \overline{BE}}{2} - \overline{FG} * \overline{GE} \quad (21)$$

$$\overline{GE} = 1 - \overline{GB} = 1 - h \quad (22)$$

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{BE}} = \frac{\overline{FG}}{\overline{GE}} \quad (23)$$

$$A1 = \frac{\overline{AC} * \overline{BE}}{2} - \frac{\overline{AB}}{\overline{BE}} * \overline{GE}^2 \quad (24)$$

$$A1 = \frac{\overline{AC}}{2} [1 - (1 - h)^2] \quad (25)$$

De acuerdo la ecuación (25), obtenemos las distintas áreas de las funciones de pertenencia, de acuerdo a las premisas anteriores, se tiene:

$$A1 = \frac{\overline{AC}}{2} [1 - (1 - h)^2]$$

$$A1 = \frac{200}{2} [1 - (1 - 0.625)^2]$$

$$A1 = 85.93$$

Para esta área, el valor b1 es el centro de la función de membresía de salida.  $b1 = 300$

$$A2 = \frac{\overline{AC}}{2} [1 - (1 - h)^2]$$

$$A2 = \frac{200}{2} [1 - (1 - 0.375)^2]$$

$$A2 = 30.46$$

Para esta área, el valor b2 =100

$$A3 = \frac{\overline{AC}}{2} [1 - (1 - h)^2]$$

$$A3 = \frac{200}{2} [1 - (1 - 0.048)^2]$$

$$A3 = 9.369$$

Para esta área, el valor b3 =400

$$A4 = \frac{\overline{AC}}{2} [1 - (1 - h)^2]$$

$$A4 = \frac{200}{2} [1 - (1 - 0.375)^2]$$

$$A4 = 30.46$$

Para esta área, el valor b4 =200

Con la ecuación de la salida:

$$Salida = \frac{\sum_i b_i \int u(i)}{\sum_i \int u(i)} \quad (26)$$

Donde:

$i$ : número de regla

$b_i$ : Centro de la función de membresía de la consecuente regla  $i$

$u$ : Valor de la premisa

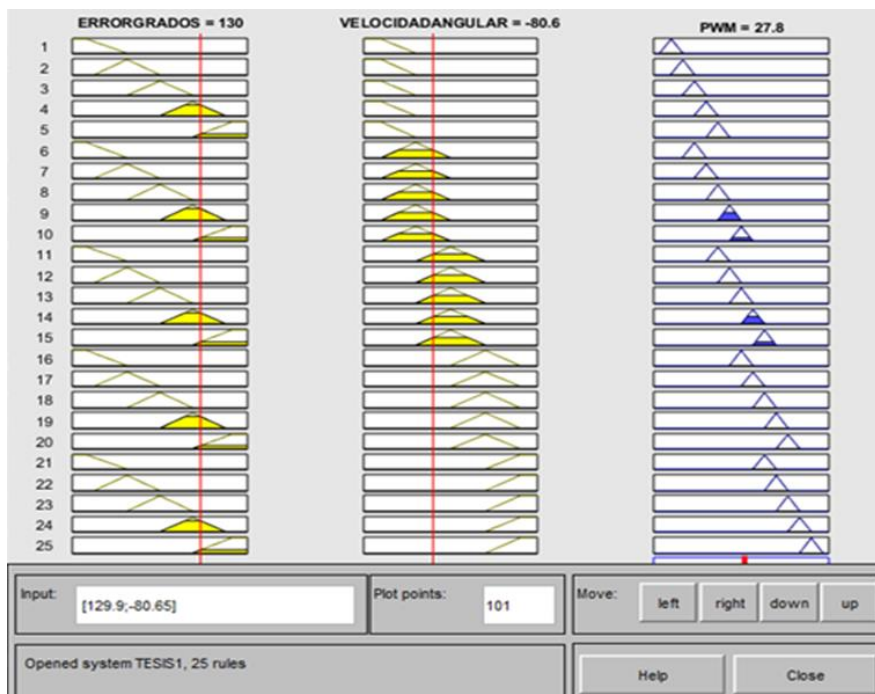
$\int u(i)$ : Área de la función de membresía  $i$

$$u = \frac{b_1 * A_1 + b_2 * A_2 + b_3 * A_3 + b_4 * A_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} \quad (27)$$

$$u = \frac{300(85.93) + 100(30.46) + 400(9.369) + 200(30.46)}{85.93 + 30.46 + 9.369 + 30.46}$$

$$u = 247.50$$

Este último valor indica que se debe añadir 247.50  $us$  a la señal de PWM en un rango de -550 a 550  $us$ .

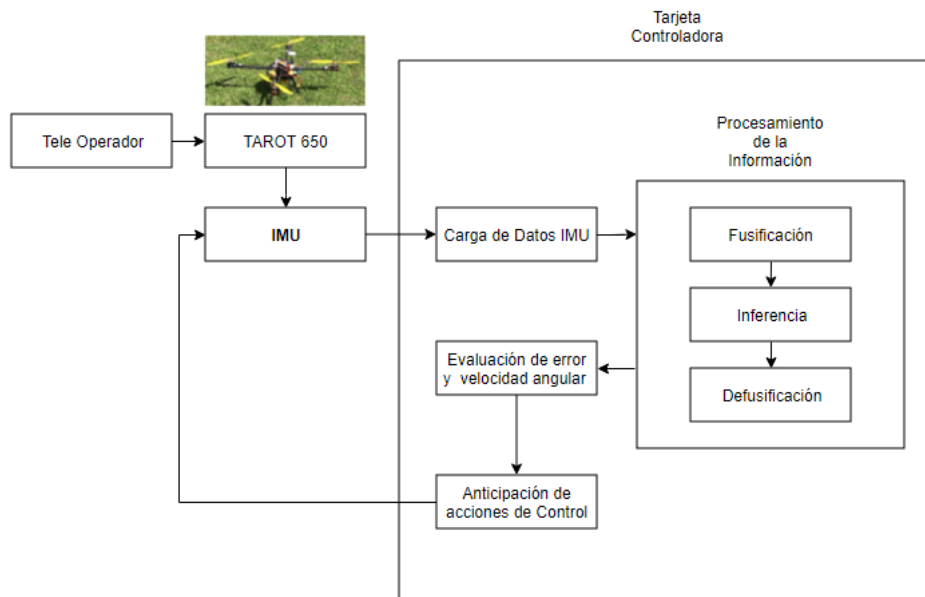


**Figura 56.** Grafica de la Defusificación, método del centroide.

## CAPITULO V

### IMPLEMENTACIÓN

#### 5.1. Funcionamiento



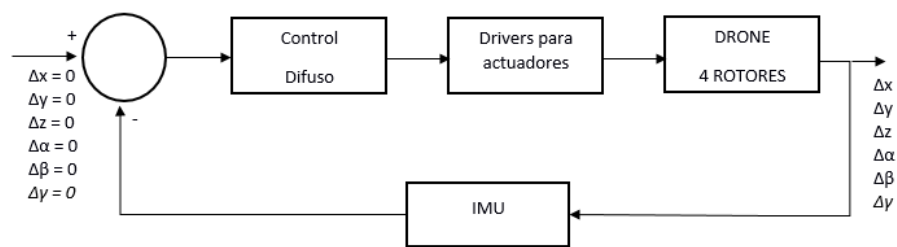
**Figura 57.** Descripción del sistema

En la figura 57., se muestra el esquema de control donde se aprecia el funcionamiento general y particular de todo el sistema. Una vez calibrado el Quadcopter y RC, en la primera etapa se realiza la comunicación por medio de radio frecuencia entre el radio control y la tarjeta controladora, para realizar el manejo del Quadcopter, a continuación, se produce la lectura de variables y sensores (IMU), para posteriormente tener una aceptable adquisición de datos los cuales serán utilizados al realizar las reglas de Fusificación.

Al procesarse los datos, se verifican las reglas establecidas en el controlador difuso para así tener la salida más adecuada que corresponde al grado de pertenencia de cada función generada. Esta salida permite manipular de manera correcta los controladores electrónicos de velocidad

produciendo los giros y movimientos necesarios para lograr el objetivo de estabilización ante perturbaciones moderadas de viento.

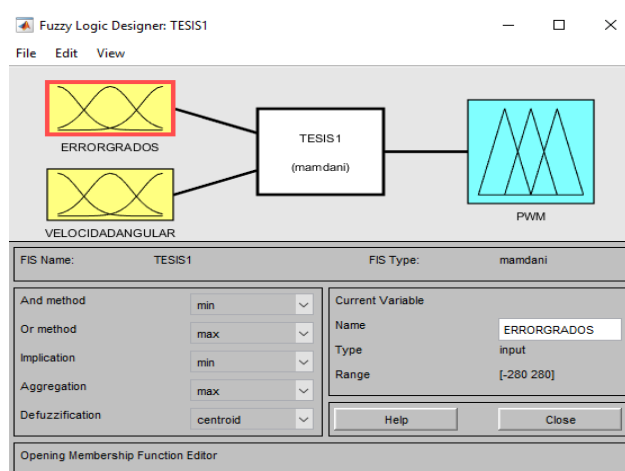
Por último, la retroalimentación a través de la IMU, GPS, se estiman la ubicación para saber si es necesario corregir o no el movimiento, y así sucesivamente se lee nuevamente el próximo mando desde el Radio Control. A continuación, en la figura 58. se muestra cómo funciona a nivel macro el controlador difuso:



**Figura 58.** Esquema del Controlador

## 5.2. Desarrollo de los módulos del sistema

Para el diseño del controlador difuso, se utilizó el Fuzzy Logic toolbox de Matlab/ Simulink, al igual que el entorno de inferencia Difuso (FIS)



**Figura 59.** Editor del Fuzzy Logic Toolbox, FIS

Gracias a este módulo y editor, es posible generar distintas aplicaciones en donde para cada caso se establecen las reglas, y funciones de pertenencia además permite una gran visualización para el análisis de resultados. A continuación, se menciona las distintas herramientas del entorno.

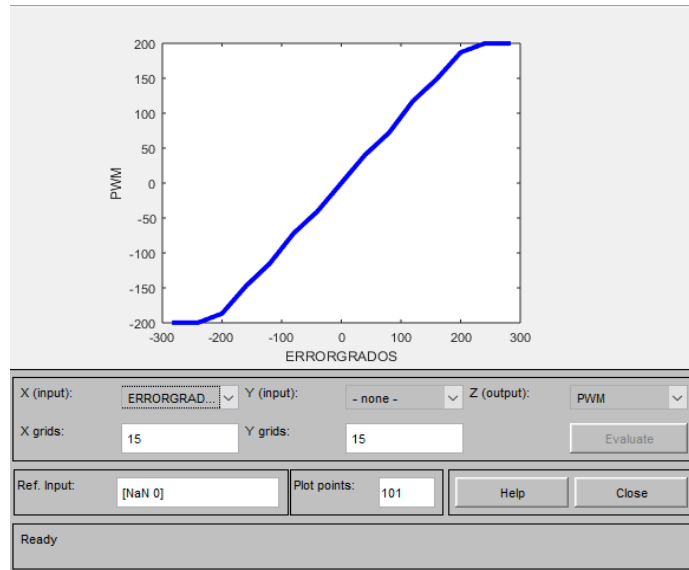
- Editor FIS: Indica la información general del sistema difuso a diseñar.
- Editor de Funciones de Pertenencia: Es donde se crean las distintas funciones de pertenencia para cada variable de entrada y salida.
- Editor de Reglas: Es donde se generan las distintas reglas difusas de control se maneja de acuerdo con tres tipos de formatos (sintaxis en inglés, notación simbólica o notación indexada).
- Visor de Reglas: Permite analizar una a una las distintas reglas que definirán el proceso y control del sistema
- Visor de Superficie: Genera tanto superficies en 2d como en 3D relacionando las distintas variables del sistema.

Los sistemas de inferencia que contiene el Toolbox de Matlab para el desarrollo del control son el tipo Sugeno y Mamdani, como se indicó anteriormente, se ocupa este último como método de inferencia ya que su implementación se asemeja más al desempeño humano. Dentro del FIS que se generó, se puede apreciar las curvas y gráficos de control tanto en 3d, como en 2D, es decir:

En la gráfica de la variable de entrada 1(Error grados), con la variable de salida PWM, se tiene una relación directamente proporcional, es decir, mientras mayor sea el error en el ángulo, mayor acción de control se debe producir para corregir la estabilización del cuadricóptero generando

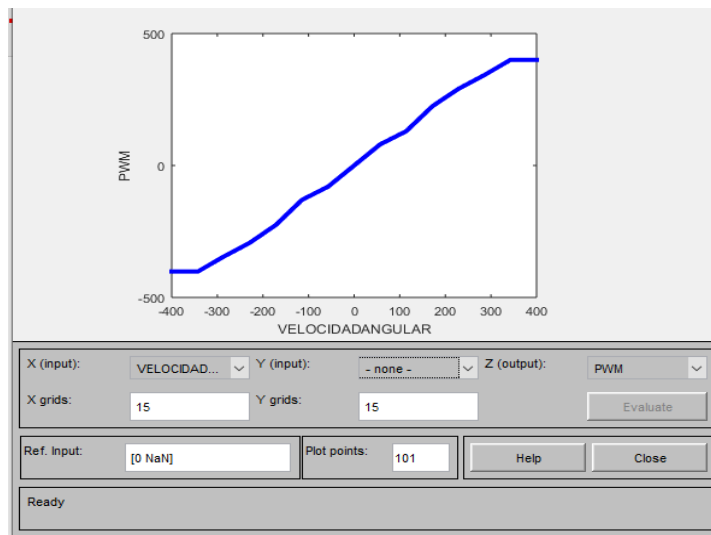


mayor PWM, esto se produce constantemente ante las perturbaciones de ráfagas moderadas que se producen en ambientes no tan externos.



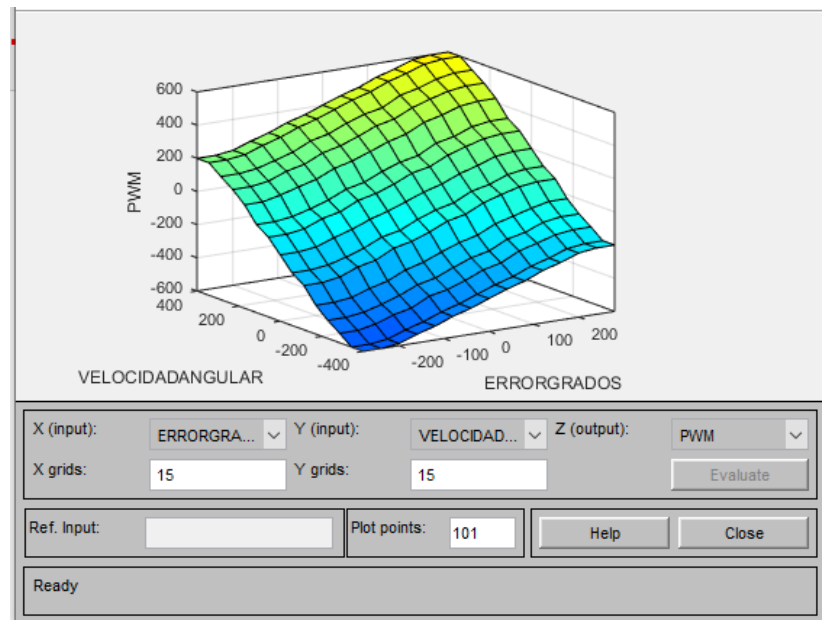
**Figura 60.** Relación Error Grados – PWM

En la relación de la variable de entrada 2 (Velocidad Angular), con la salida PWM, se observa una relación directamente proporcional, mientras mayor velocidad se tenga, el PWM es mayor.



**Figura 61.** Relación Velocidad angular – PWM

Dentro del FIS de Matlab, también se puede apreciar la gráfica de control la cual indica las relaciones entre las diferentes variables.



**Figura 62.** Superficie de Control 3D

Por otra parte, para verificar este funcionamiento del sistema se realiza el esquema de control en Simulink, se considera que el modelo está en el dominio de la frecuencia, tomando en cuenta que la tarjeta controladora se generan señales lineales y rápidas hacia los controladores de velocidad.

Para obtener este modelo primeramente se tiene que los motores que se ocuparon giran desde 1100 microsegundos de PWM hasta los 2500 microsegundos, Después se ocupa la Ecuación (11) obteniendo la ganancia en fuerza de los motores por casa microsegundo de PWM, así se tiene:

$$E = 0.0238 P - 0.3927 \quad (28)$$

$$\text{Si: } P = 100\%$$

$$F = ((0.0238)(100) - 0.3927) * 1000$$

$$F = 1987.3 \text{ gf} \quad (29)$$

Donde F es el empuje de los motores en gf y P representa el PWM que activa los controladores de velocidad en%.

Entonces:

$$K = \frac{1987.3}{1400} = 1.41 \frac{\text{gf}}{\mu\text{s}} \quad (30)$$

Como en cada movimiento actúan 2 motores de la misma manera, utilizando la ecuación (30), queda expresado:

$$K = 1.41 * 2 \frac{\text{gf}}{\mu\text{s}}$$

$$K = 2.82 \frac{\text{gf}}{\mu\text{s}}$$

$$K = 0.00282 \frac{\text{Kgf}}{\mu\text{s}}$$

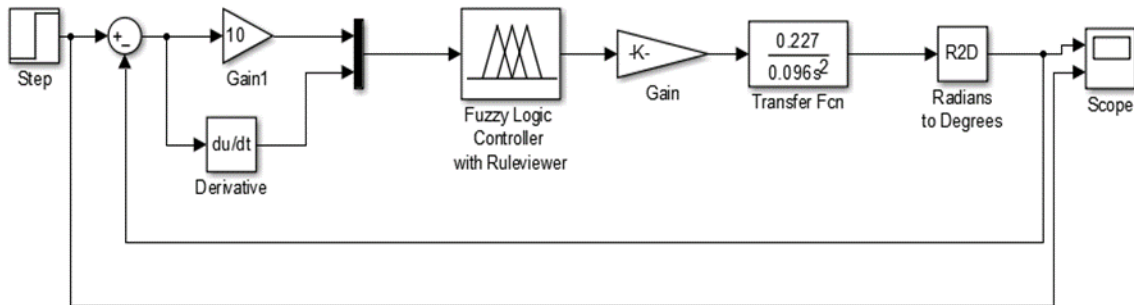
Transformando al sistema internacional de unidades, se tiene:

$$K = 0.0276 \frac{\text{N}}{\mu\text{s}}$$

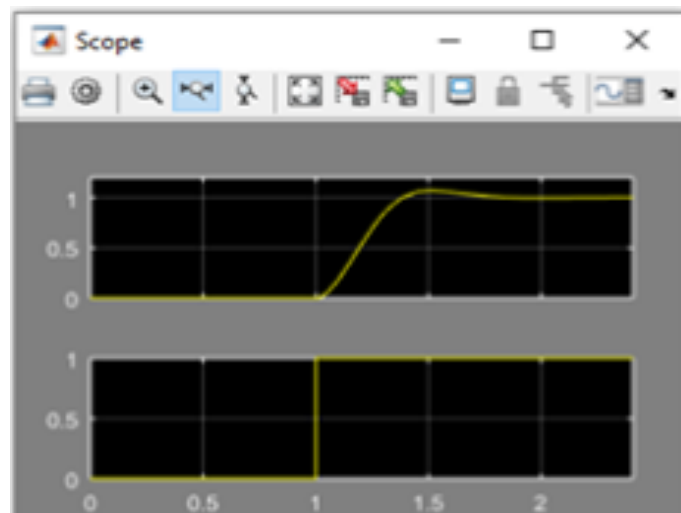
Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (31) del movimiento de rotación en cabeceo y balanceo tenemos.

$$\ddot{\theta} I_{xx} = (F1 - F2 + F3 + F4)l \quad (31)$$

$$\theta = F \frac{l}{I_{xx} s^2} = F \frac{0.0276}{0.096 s^2} \text{ rad}$$



**Figura 63.** Esquema de simulación en Simulink



**Figura 64.** Resultado de la simulación.

Para controlar Yaw, se usa la transformada de Laplace a la ecuación (32):

$$\ddot{\varphi}_{xx} = (\tau_{m1} + \tau_{m2} + \tau_{m3} + \tau_{m4})I \quad (32)$$

y se obtiene:

$$\varphi = \frac{\tau}{I_{zz} s^2} \quad (33)$$

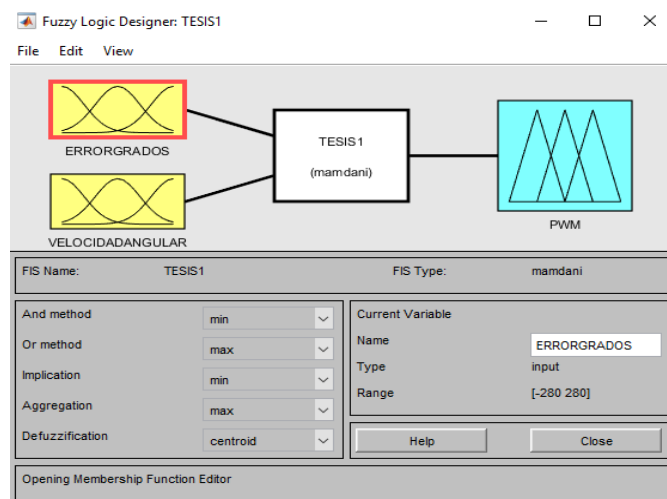
Un par correspondiente a 50% de la potencia máxima es de 0,0167 Nm, dejando la ecuación

(33) expresada en:

$$\varphi = \frac{0.0332}{0.045 s^2}$$

### 5.3. Plataforma Real

En el diseño del controlador en el Drone, se implementó el esquema de bloques de Simulink, como se muestra en la figura 63, donde se puede observar el bloque de error grados y velocidad angular.



**Figura 65.** Diagrama de bloque de Simulink

Se utilizó un tiempo de muestro de 0.085s de forma general en la implementación en el Quadcopter. Para el control en el Quadcopter, es necesario considerar varios factores, entre ellos es el cambio de altitud repentino por efecto de una ráfaga de viento, tiempo de respuesta del Radio control, experticia del Piloto.

Cabe recalcar que las pruebas de funcionamiento se las realizó en campo abierto (canchas de fútbol de la ESPE), es decir no existe obstáculos físicos, como árboles, edificios, etc. Esto hizo que las ráfagas de viento fueran de moderadas a altas, con una velocidad promedio de 13 km/h. Que puso a prueba la estabilidad del drone.

En la implementación del sistema se tomó en cuenta la aerodinámica del sistema y el peso del mismo, ya que esto afecta en gran medida el desempeño y empuje de los rotores de drone.

## CAPITULO VI

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 6.1. Pruebas

El sistema propuesto se probó experimentalmente en varios escenarios, los definimos de la siguiente manera:

##### 6.1.1. Pruebas de precisión

Se aplica una prueba de estabilización al Quadcopter para verificar el error de estado estacionario del sistema. Para lo cual las baterías LiPo se cargan hasta su voltaje nominal de 16 V. La calibración del GPS se lleva a cabo y se arma el dron. Posteriormente, el dron se eleva hasta el 30% de su poder total.

Los datos se toman desde el máximo ángulo negativo posible y hasta el máximo ángulo positivo posible. Para cada ángulo se toma una muestra de 20 datos, obteniendo el promedio de estos y calculando el error de estado estacionario. Obteniendo como resultado un error de estado estacionario de menos del 3%, que es un indicador de que el sistema funciona en condiciones óptimas.

##### 6.1.2. Tiempo de respuesta a las perturbaciones

Se aplican varias pruebas de vuelo al Quadcopter, frente a las perturbaciones externas tipo las ráfagas de viento, para determinar el tiempo de respuesta.

Los parámetros de las pruebas fueron: velocidad del viento, temperatura, humedad y carga de la batería del dron. Para lo cual se utilizó un anemómetro para medir a la velocidad del viento, el

cual entrego un valor de 13 km/h, la temperatura ambiente fue de 19 grados centígrados, la humedad media fue de 53% y la tensión de la batería fue de 16 V. Como se muestra en el Anexo A.

**Tabla 21**

*Error en estado Estacionario*

No.	Ángulo de Radio Control (grados)	Ángulo del Quadcopter (grados)	ess (%)
1.	-16	-16,1	0,621
2.	-14	-13,9	0,719
3.	-12	-12,2	1,639
4.	-10	-9,8	2,041
5.	-8	-8,1	1,235
6.	-6	-6	0
7.	-4	-4,1	2,439
8.	-2	-2,06	2,913
10.	2	1,94	3,093
11.	4	3,9	2,564
12.	6	6,1	1,639
13.	8	8,2	2,439
14.	10	10,3	2,913
15.	12	12,1	0,826
16.	14	14,1	0,709
17.	16	15,9	0,629

Al Quadcopter se le aumenta gradualmente su poder de 30%, 40%, 50% respectivamente. Un lastre se coloca en un extremo de un motor y se mide el tiempo que tarda en estabilizarse cuando se retira el lastre. El lastre ira de 100, y aumentara en valor múltiplos de 100, hasta llegar al valor de 1000 g.



**Tabla 22***Tiempo de respuesta al 30% de potencia nominal*

No.	Peso (g)	Tiempo de estabilización (s)
1.	100	1,75
2.	200	2,1
3.	300	2,4
4.	400	2,3
5.	500	2,5
6.	600	2,2
7.	700	2,3
8.	800	2,1
9.	900	1,89
10.	1000	2,3

**Tabla 23***Tiempo de respuesta al 40% de potencia nominal*

No.	Peso (g)	Tiempo de estabilización (s)
1.	100	2,2
2.	200	2,3
3.	300	2,24
4.	400	2,21
5.	500	2,29
6.	600	2,3
7.	700	2,4
8.	800	2,5
9.	900	2,6
10.	1000	2,7

**Tabla 24***Tiempo de respuesta al 50% de potencia nominal*

No.	Peso (g)	Tiempo de estabilización (s)
1.	100	2,4
2.	200	2,45
3.	300	2,55
4.	400	2,6
5.	500	2,64
6.	600	2,69
7.	700	2,71
8.	800	2,75
9.	900	2,8
10.	1000	2,9

## 6.2. Análisis de Resultados

Como se puede observar en las tablas 22, 23, 24 la respuesta del sistema cuando es sometido a perturbaciones externas tipo ráfagas de viento se encuentra en valores óptimos. El sistema es competentemente rápido para restaurar su estabilidad. Por lo tanto, el sistema de control es robusto y confiable contra agentes externos.

## 6.3. Trabajos Futuros.

Como trabajo futuro, se propone un sistema que puede llevar un peso mayor de carga útil, incrementando un número mayor de rotores (8 rotores/Octocóptero), por lo tanto, poder utilizarlo en aplicaciones como la agroindustria, para el riego de plantaciones y control de plagas.

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1. Conclusiones

- Se logro desarrollar e implementar un algoritmo de control Difuso para el manejo de la estabilización del UAV mediante el uso de una tarjeta controladora y correspondientes sensores.
- El control de estabilización que aplica la lógica difusa en un Quadcopter demostró ser robusto, preciso y confiable. Responde rápidamente a las alteraciones externas.
- Cuando se comparó con un controlador de tipo PID convencional, se concluyó que el control difuso requiere más tiempo y recursos de procesamiento. Pero eso se compensa con su fiabilidad y tiempo de respuesta.
- Se diseño e implemento un controlador Difuso mediante la utilización de la herramienta de Matlab/Simulink.
- En la ejecución del controlador en la plataforma real (drone) se evidenciaron algunos inconvenientes, con una buena recepción de señal por Parte del GPS.
- Al ser un controlador con un tiempo de estabilización bajo, se puede colocar una carga útil amplia, que se puede demostrar hasta 2 kg.

## 7.2. Recomendaciones

- El nivel de carga de la batería es un aspecto en tomar en cuenta, ya que al estar en el umbral del 20% o menos, el sistema no funciona adecuadamente. Por lo tanto, se recomienda no llegar a este valor.
- Se recomienda siempre que se vaya a realizar un vuelo del UAV en un lugar distinto a la última calibración del GPS volverlo a calibrar.
- Aumentar uno o varios sensores, para lograr estimar de mejor manera la posición del UAV, lo que permitirá obtener un control más robusto, confiable y preciso.
- Realizar las pruebas de funcionamiento en lugares abiertos y despejados, para evitar daños a terceros.
- Se recomienda tener una o varias baterías de repuesto, ya que la demanda de consumo energético del UAV es medianamente alta. Con esto se puede realizar vuelos largos o realizar maniobras rápidas y así evitar la espera de cargar a batería.
- Se recomienda tener una o varias hélices de repuesto, ya que estas son susceptibles a daños (pandeo o fisuras), ya que en las pruebas de funcionamiento se rompen fácilmente. Cabe recalcar que su costo es bajo.
- Se recomienda que las pruebas de funcionamiento las realice una persona que se encuentre familiarizado con el manejo de Drone, ya que así se puede evitar daños del mismo.
- Se recomienda verificar la correcta instalación de las Hélices en el Drone, caso contrario se puede realizar un mal montaje y no obtener un vuelo óptimo.
- Se recomienda verificar el correcto giro de los motores sin colocar las Hélices, ya que se podrá observar en qué sentido de las agujas del reloj giran cada uno.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (18 de Noviembre de 2013). Recuperado el 23 de Marzo de 2019, de [http://members.tripod.com/jesus\\_alfonso\\_lopez/FuzzyIntro2.html](http://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/FuzzyIntro2.html).
- (2017). Recuperado el 20 de Enero de 2019, de <https://rc-innovations.es/tmotor-mn3510-700kv>.
- Alfonso, L. (18 de Noviembre de 2013). Recuperado el 23 de Marzo de 2019, de [http://members.tripod.com/jesus\\_alfonso\\_lopez/FuzzyIntro2.html](http://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/FuzzyIntro2.html)
- Amazon Prime air . (2016). Obtenido de <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>
- B, S., & Khatib. (2008). Springer Hanbook of Robotics. . (Heidelberg).
- Bousbaine, A., & T, P. (2015). *Modelling And Simulation Of A Quad-Rotor*.
- Chmai, G., & ., H. S. (2015). “*Distributed processing applications for UAV/drones: a survey*”. Springe.
- Coza, C., & J.B, M. (2005). *A new robust adaptive-fuzzy control method applied to quadrotor helicopter stabilization*. Department of electrical and computer engineering.
- Daniel, G., Jesús, L., & Isaac., P. (2009). Control de un Vehículo Aéreo No tripulado.
- DJI. (2017). Recuperado el 20 de Febrero de 2019, de [https://dl.djicdn.com/downloads/nazam-v2/en/NAZA-M\\_Quick\\_Start\\_Guide\\_v1.26\\_en.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/nazam-v2/en/NAZA-M_Quick_Start_Guide_v1.26_en.pdf).
- DJI. (2018). Recuperado el 1 de Febrero de 2019, de <https://www.dji.com/naza-m-v2>
- DroneCenter. (2016). Recuperado el 9 de Enero de 2019, de <http://dronecenter.blogspot.com/p/construye-tu-drone.html>.
- ElectrónicaRC.com*. (23 de Septiembre de 2015). Recuperado el 28 de Enero de 2019, de <http://electronicarc.com/catalogo/pixhawk-px4-p-2173.html>
- Esenziale*. (2017). Recuperado el 16 de Febrero de 2019, de <https://esenziale.com/tecnologia/partes-drone/>
- Esenziale*. (2017). Recuperado el 16 de Febrero de 2019, de <https://esenziale.com/tecnologia/partes-drone/>. [Accesado 16 febrero 2019].
- F, J., B, C. T., & S., D. G. (2005). *Stabilization of a quadrotor via takagi\_sugeno fuzzy control*.
- Fpvradiocontrol*. (2018). Recuperado el 5 de Febrero de 2019, de <https://www.fpvradiocontrol.com/como-funcionan-los-controladores-brushless-esc/>
- Freeman, W. (1999). Computer Vision for Television and Games. *Recognition, Analysis and Tracking of Faces and Gestures in Realtime*, pág. 118.

- G, P., J, V. C., I, A. C., & Galán, O. (2013). *Sistema de freno ABS mejorado con modelo de control difuso y visión, avances de ingeniería electrónica.*
- González, M. (3 de Noviembre de 2017). *Filmora- Lipo para Drone*. Recuperado el 10 de Febrero de 2019, de <https://filmora.wondershare.com/es/drones/choose-best-drone-battery.html>
- J, R., Z, C., & A, S. (2014). Comparison of two quadrotor dynamic models. *IEEE Latin American Transactions*, 12.
- JuegaTrónica*. (2017). Recuperado el 15 de Enero de 2019, de <https://www.juguetronica.com/blog/como-colocar-las-helices-correctamente-a-tu-drone/>
- K, S., & M, R. (2002). *Control Mediante Lógica Difusa.*
- Kivrak, O. (2006). *Design of control systems for a quadrotor flight vehicle equipped with inertial sensors.*. Tesis de maestría, Atilim Univesity.
- Liang, O. (s.f.). Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de <https://oscarliang.com/pwm-ppm-difference-conversion/>
- Luna, G. M. (2002). *Introduccion a la lógica difusa.* . CINVESTAVIPN.
- M, G. (3 de Noviembre de 2017). *Filmora, Lipo para Drone*. Recuperado el 10 de Febrero de 2019, de Available: <https://filmora.wondershare.com/es/drones/choose-best-drone-battery.html>.
- M, G., Haomann, Huang, H., & L, S. (2007). *Quadrotor helicopter flight dynamics and control.* Theory and experiment astronautics., South Carolina.
- Menhaj, M. B., & Fakurian, R. S. (2014). *Diseño para un controlador difuso Quadrotor UAVS usando el ingreso mínimo control.* Teheran.
- ModelTronic*. (2004). Recuperado el 10 de Febrero de 2019, de <https://www.modeltronic.es/emisora-fly-sky-9-canales-y-receptor-8ch-fs-th9x-24ghz-p-5496.html>
- O, Á. (2014). *Introducción a la Lógica borrosa.* Recuperado el 2 de Marzo de 2019, de [http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/logica\\_borrosa/web/tutorial\\_fuzzy/contenido3.html](http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/logica_borrosa/web/tutorial_fuzzy/contenido3.html).
- OpenPilot. (2017). Recuperado el 2 de Abril de 2019, de [http://www.porcupinerc.com/-OpenPilot-CC3D-Multi-Rotor-Flight-Controller\\_p\\_834.html](http://www.porcupinerc.com/-OpenPilot-CC3D-Multi-Rotor-Flight-Controller_p_834.html)
- Puri, A., Valavanis, K., & M, K. (2007). Statical profile generation for traffic monitoring using real - time uav based video data. In Control and Automation. *Mediterranean Conference*, (págs. 1-6).
- Ramirez. (s.f.). *Lógica Difusa . UDLAP, III.*

- RCInnovations*. (2017). Recuperado el 5 de Enero de 2019, de <https://rc-innovations.es/chasis-4-motores-quad-tarot-650-sport-tren-retractil-drone>
- RobotsLab*. (2015). Recuperado el 21 de agosto de 2018, de [www.robotslab.com](http://www.robotslab.com)
- S, B. P. (2014). *Real time fuzzy controller for quadrotor stability control*. Tesis de Maestría, Michigan Technological University .
- Sagarpa. (2015). *Sistema de información agroalimentaria y pesquera*. Recuperado el Mayo de 2019, de <http://www.horticultivos.com/component/content/article/49-front-page/763-sagarpaincorpora-drones-para-generar-informacion-precisa>
- Samir, K., & Rodrigo., M. (2002). *Control Mediante Lógica Difusa*.
- Sattar, M. A. (2017). *Modelado y control de lógica difusa de un UAV Quadrotor*. D.A.
- Seguridad y Vigilancia* . (2017). Recuperado el Mayo de 2019, de <http://www.muyinteresante.com.mx/tecnologia/562466/drones-vehiculos-aereos-no-tripulados-uso-industrial-cientifico-militar>
- (2012). *Simultaneous localization and mapping with the ar.drone*. Tesis de Licenciatura, Universitt van Amsterdan , Amsterdan.
- Sumanthi, & M, U. (2014). *Pitch and yaw attitude control of a rocket engine using hybrid fuzzy-pid controller, the open automation and control systems journal*.
- Teoría de conjuntos difusos y lógica difusa*. (s.f.). Recuperado el 7 de Marzo de 2019, de <http://www.lcc.uma.es/~eva/aic/apuntes/fuzzy.pdf>
- Teoría de conjuntos difusos y lógica difusa*. (s.f.). Recuperado el 7 de Marzo de 2019, de <http://www.lcc.uma.es/~eva/aic/apuntes/fuzzy.pdf>
- Traxxas qr1 Quadrotor*. (20 de Agosto de 2018). Obtenido de <http://traxxas.com/products/models/heli/6208qr1>
- UAV'S para monitoreo de fronteras*. (2011). Recuperado el Mayo de 2019, de [www.infodefensa.com/es/2011/11/17/noticia-el-gobierno-de-brasil-empleara-tres-uavpara-el-monitoreo-ininterrumpido-de-la-triple-frontera-del-sur-2.html](http://www.infodefensa.com/es/2011/11/17/noticia-el-gobierno-de-brasil-empleara-tres-uavpara-el-monitoreo-ininterrumpido-de-la-triple-frontera-del-sur-2.html)
- Udlap. (s.f.). Recuperado el 25 de Febrero de 2019, de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lmt/ramirez\\_r\\_o/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf)
- Vargas, O. L., Sanabria, L. B., & Ibañez, J. (2013). *Desarrollo de la cognición espacial en invidentes congénitos con apoyo de dispositivos tecnológicos*. In *cognicion*.
- Yen, J., & Langari, R. (2006). *Introducción al Control Fuzzy. I*.
- Yu, W. (2004). Fuzzy identifiycation using fuzzy neural networks with stable learning algorithms. *IEEE*, 12.