



ANÁLISIS DEL USO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA TIPO DRON MULTI
ROTOR COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN EL APRENDIZAJE DE TÉCNICAS
DE CONTROL DIFUSO PARA EL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
EN LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA.

ESTUDIANTES:

CAMILO ALEXANDER LOPEZ CALVACHE

BRIAN ALEXANDER VALENCIA JIMENEZ

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA

POPAYAN-CAUCA



ANÁLISIS DEL USO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA TIPO DRON MULTI ROTOR COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN EL APRENDIZAJE DE TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO PARA EL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA.

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO ELECTRONICO

ESTUDIANTES:

CAMILO ALEXANDER LOPEZ CALVACHE

BRIAN ALEXANDER VALENCIA JIMENEZ

DIRECTOR:

MSc. Ing. JUAN PABLO DIAGO RODRIGUEZ

CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA

POPAYAN-CAUCA

NOTA DE ACEPTACION

El trabajo de grado titulado ANÁLISIS DEL USO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA TIPO DRON MULTI ROTOR COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN EL APRENDIZAJE DE TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO PARA EL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA, realizado por los estudiantes CAMILO ALEXANDER LOPEZ CALVACHE Y BRIAN ALEXANDER VALENCIA JIMENEZ, cumple con los requisitos para optar por el título de ingeniero electrónico.



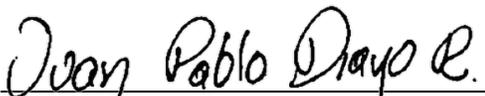
MsC Gloria Liliana López Muñoz

Jurado



MsC Yesid Enrique Castro Caicedo

Jurado



MsC Juan Pablo Diago Rodríguez

Director

Popayán, julio de 2022

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo debo darle gracias Dios por permitirme llegar hasta este punto, gracias a mi señora madre por tenerme tanta paciencia durante este largo proceso, por brindarme su apoyo incondicional en todo sentido a pesar de las dificultades, nuevamente le agradezco a Dios por dejarle una pequeña luz en los ojos de mi madre, para que de esa manera pueda ver a su hijo convertirse en profesional y juntos levantar ese título por el que tanto hemos luchado.

Gracias a mi padre que ya no se encuentra en este mundo, pero sin embargo su presencia siempre la he llevado en mi corazón, gracias a él he podido estudiar y ser lo que hoy soy.

A mi compañero de tesis y amigo, Camilo López, le agradezco, sin él no habiéramos logrado llegar hasta aquí, mis bendiciones para él.

BRIAN ALEXANDER VALENCIA JIMENEZ

DEDICATORIA

Quiero dedicarle este triunfo a mi señora madre la cual ha tenido que pasar por muchas calamidades de salud y demás problemas, a pesar de eso siempre hemos salido adelante juntos.

Este triunfo también es de mi padre Sigifredo, donde quiera que él se encuentre sé que está orgulloso de ver a su único hijo convertirse en profesional.

Este triunfo también se lo quiero dedicar a aquellos seres queridos que ya no se encuentran en este mundo, mi abuela Cecilia, mi tía Laura y mi abuelo segundo, los llevo en mi corazón y sé que están orgullosos.

Por último, quiero dedicarle este triunfo a mi familia en general, tíos, tías, primos, ellos de una u otra forma aportaron su granito de arena para que yo pudiera llegar a este punto.

BRIAN ALEXANDER VALENCIA JIMENEZ

CONTENIDO

INTRODUCCION	16
CAPITULO I: EL PROBLEMA.....	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
CAPITULO II: MARCO TEORICO	19
2.1 ACTUADORES.	19
2.1.1 MOTOR CON ESCOBILLAS.....	19
2.1.2 MOTOR SIN ESCOBILLAS	20
2.2 ESTRUCTURA DE DRONES MULTIROTOR Y CONFIGURACION DINAMICA.....	21
2.2.1 CONFIGURACIONES CONVENCIONALES	21
2.2.2 CONFIGURACIÓN EN X.....	22
2.2.3 SENTIDO DE GIRO DE MOTORES	23
2.2.4 INSTALACIÓN DE HÉLICES	24
2.2.5 MOVIMIENTOS DE UN CUADRICÓPTERO	24
2.4 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN Y SEÑALES UTILIZADAS EN CUADRICOPTEROS	27
2.4.1 PWM.....	27
2.4.2 I2C	27
2.4.3 SPI.....	28
2.4.4 COMUNICACIÓN SERIAL	30
2.5 FILTROS DIGITALES	31
2.5.1 FILTRO FIR (<i>FINITE IMPULSE RESPONSE</i>)	31
2.5.2 FILTRO MEDIA MÓVIL	32
2.5.3 FILTRO COMPLEMENTARIO	33
2.6 INSTRUMENTOS ELECTRONICOS UTILIZADOS EN CUADRICOPTEROS.	34
2.6.1 ACELERÓMETRO	34
2.6.2 GIROSCOPIO.....	35
2.6.3 ERRORES EN LOS GIROSCOPIOS Y ACELERÓMETROS	36
2.6.4 VIBRACIONES	36
2.6.5 DERIVA.....	36
2.6.6 MÓDULOS DE COMUNICACIÓN RF	37
2.6.7 VARIADOR DE VELOCIDAD PARA MOTORES SIN ESCOBILLAS.....	37
2.7 SISTEMAS DE CONTROL	38

2.7.1 LÓGICA DIFUSA	39
2.7.2 CONTROL DIFUSO	39
2.7.3 VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA.....	40
2.7.4 VARIABLES LINGÜÍSTICAS	40
2.7.5 UNIVERSO DE DISCURSO	41
2.7.6 FUNCIÓN DE MEMBRESÍA	41
2.7.7 NÚCLEO	41
2.7.8 FRONTERAS	41
2.7.9 SOPORTE.....	42
2.7.9.1 PUNTOS DE CRUCE	42
2.7.9.2 ANCHO DE BANDA	42
2.7.9.3 TIPOS DE FUNCIONES DE MEMBRESÍA.....	42
2.7.9.4 FUNCIÓN TRIANGULAR	42
2.7.9.5 FUNCIÓN TRAPEZOIDAL	43
2.7.9.6 FUNCIÓN SIGMOIDE.....	43
2.7.9.7 FUNCIÓN GAUSSIANA.....	43
2.7.9.8 FUSIFICACION	44
2.7.9.9 REGLAS DE CONTROL.....	44
2.7.9.9.1 DEFUSIFICACION.....	45
2.7.9.9.2 MÉTODOS DE INFERENCIA.....	45
2.7.9.9.3 MAMDANI.....	45
2.7.9.9.4 CENTROIDE O CENTRO DE MASA	47
2.7.9.9.5 BISECTRIZ.....	48
2.7.9.9.6 MÁXIMO CENTRAL.....	48
2.7.9.9.7 MÁXIMO PEQUEÑO.....	49
2.7.9.9.8 MÁXIMO GRANDE	49
2.8 PID	50
2.8.1 LA ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL P.....	50
2.8.2 BANDA PROPORCIONAL	52
2.8.3 BIAS	53
2.8.4 LA ACCIÓN DE CONTROL INTEGRAL I.....	54
2.8.5 LA ACCIÓN DE CONTROL DERIVATIVA D.....	56
2.8.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	57
CAPITULO III: DISEÑO Y DESARROLLO DE LA PLATAFORMA TIPO DRON MULTI ROTOR.....	58
3.1 SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE Y DESCRIPCION DE ELEMENTOS ELECTRONICOS, MECANICOS	58
3.1.1 SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE	58
3.1.2 SELECCIÓN DEL SOFTWARE PARA DESARROLLAR LA CODIFICACIÓN DEL ALGORITMO	59

3.1.3 SELECCIÓN DE SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFERENCIA BASADOS EN LÓGICA DIFUSA.....	61
3.1.4 EXPERIMENTO.....	63
3.2 CONFIGURACION DEL PUERTO DE COMUNICACIÓN I2C.....	64
3.2.1 EXPERIMENTO:	64
3.3 TIEMPO DE EJECUCION	65
3.4 CALCULO DE ANGULOS DE INCLINACION.....	66
3.4.1 CALCULO PARA LOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN MEDIANTE ACELERACIONES	66
3.4.2 CALCULO DE LOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN MEDIANTE VELOCIDAD ANGULAR.....	67
3.4.3 FILTRO COMPLEMENTARIO	69
3.5 DESCRIPCIÓN Y ELECCION DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS Y DE POTENCIA.....	70
3.5.1 DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.....	70
3.5.2 MÓDULO DE POTENCIA O BATERÍA.....	76
3.5.3 CORRIENTE MÁXIMA EN UNA BATERÍA.....	77
3.5.4 TIEMPO DE VUELO.....	77
3.6 DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS Y ELECTROMECAÑICOS	78
3.6.1 CHASIS PARA CUADRICÓPTERO	78
3.6.2 MOTORES EMAX RS2205 2300KV.....	79
3.6.3 HÉLICES.....	80
3.7 ESQUEMA DE CONTROL IMPLEMENTADO EN EL CUADRICÓPTERO.....	81
3.7.1 ARQUITECTURA DE CONTROL DIFUSO.....	81
3.7.2 CÁLCULO DEL ERROR.....	81
3.7.3 VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA EN EL CONTROLADOR.....	83
3.7.4 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO.....	83
3.7.5 DEFINICIÓN DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA.....	84
3.7.6 DEFINICIÓN DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE SALIDA.....	85
3.7.7 REGLAS DIFUSAS.....	86
3.7.8 MÉTODO DE INFERENCIA	87
3.7.9 DEFUSIFICACION.....	88
3.7.9.1 DIAGRAMA DE CONTROL DIFUSO PITCH Y ROLL	89
3.7.9.2 FILTRO MEDIA MÓVIL	90
3.8 MEDICIÓN DEL VOLTAJE DE LA BATERÍA.....	91
3.8.1 FILTRO DIGITAL PARA BATERÍA.....	93
3.8.2 ACCIÓN DE BATERÍA BAJA	94
3.9 MEZCLADOR DE SEÑALES DE CONTROL.....	95
3.9.1 COMPENSACIÓN DE BATERÍA.....	96
3.10 DISEÑO DEL FIRMWARE	97
3.10.1 CONFIGURACIÓN DE PERIFÉRICOS.....	97
3.10.2 CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS.....	99
3.10.3 PROGRAMA PRINCIPAL.....	100

CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACION	103
4.1 METODOLOGÍA PARA LA VALIDACIÓN DE LA PLATAFORMA	103
4.1.1 PRESENTACIÓN INTRODUCTORIA EN LAS AULAS DE CLASE	103
4.1.2 EJECUCIÓN DE PRÁCTICAS CON EL PROTOTIPO	104
4.1.3 GUÍAS DE DISEÑO.....	107
4.1.4 RESULTADOS DEL CUESTIONARIO DE ACEPTACIÓN	108
CAPITULO V: TEST Y RESULTADOS DE LOS CONTROLADORES	115
5.1 PRUEBA DE CONEXIÓN.....	115
5.2 PRUEBA DE DESEMPEÑO DE LOS CONTROLADORES FUZZY Y PID	118
5.2.1 CONTROL FUZZY.....	118
5.2.2 CONTROL PID.....	121
5.3 COMPARACIÓN ENTRE FUZZY Y PID.....	124
5.3.1 COMPARACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO	125
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	127
6.1 CONCLUSIONES	127
6.1.1 TRABAJOS FUTUROS.....	129
6.1.2 GLOSARIO DE ACRONIMOS.....	129

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Motor de corriente continua de escobillas, tomado de [20].....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Motor de corriente continua sin escobillas brushless, tomado de [21]......</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3. Estructura de drones multi rotor, tomado de [22]......</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4: estructura en X, tomado de [23]......</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5: Sentido de giro de cada motor para estructura en x, diseño propio.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 6: Sentido de giro de cada hélice, tomado de [24].</i>	<i>24</i>
<i>Figura 7: movimientos de un cuadricóptero, diseño propio.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8. movimiento yaw en un cuadricóptero, diseño propio.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 9. movimiento pitch en un cuadricóptero, diseño propio.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10. movimiento roll en un cuadricóptero, diseño propio.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 11. movimiento de ascenso y descenso en un cuadricóptero, diseño propio.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12. Señal PWM, tomado de [25].</i>	<i>27</i>
<i>Figura 13. Esquema de comunicación I2C, tomado de [25].</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14. Condiciones start y stop, tomado de [25].</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15. Bus SPI un maestro y tres esclavos, tomado de [25].</i>	<i>29</i>
<i>Figura 16. Condiciones start y stop SPI, tomado de [25]......</i>	<i>30</i>
<i>Figura 17. Transmisión asíncrona, tomado de [27].</i>	<i>30</i>

<i>Figura 18. Diagrama de bloques de un filtro FIR, tomado de [28].</i>	32
<i>Figura 19. Sistemas de referencia de un cuadricóptero, tomado de [30].</i>	34
<i>Figura 20. Módulos RF y Transceptor NRF24L01, tomado de [35][36].</i>	37
<i>Figura 21. Variador de velocidad, tomado de [37].</i>	38
<i>Figura 22. Diagrama de bloques de un sistema de control, diseño propio.</i>	38
<i>Figura 23. Diagrama de bloques de un sistema de control fuzzy, diseño propio.</i>	39
<i>Figura 24. Características de una función de membresía, tomado de [39].</i>	41
<i>Figura 25. Función triangular, tomado de [40].</i>	42
<i>Figura 26. Función trapezoidal, tomado de [40].</i>	43
<i>Figura 27. Función S, tomado de [40].</i>	43
<i>Figura 28. Función campana gaussiana, tomado de [41].</i>	44
<i>Figura 29. fusificacion de las variables de entrada, tomado de [42].</i>	46
<i>Figura 30. Valores mínimos para cada función de membresía, tomado de [42].</i>	46
<i>Figura 31. Conjunto resultante tras unir C'1 y C'2, tomado de [42].</i>	47
<i>Figura 32. Representación gráfica de la bisectriz, tomado de [43].</i>	48
<i>Figura 33. Representación gráfica del máximo central, tomado de [43].</i>	48
<i>Figura 34. Representación gráfica del máximo pequeño, tomado de [43].</i>	49
<i>Figura 35. Representación gráfica del máximo grande, tomado de [43].</i>	49
<i>Figura 36. defusificacion para obtener la salida, tomado de [43].</i>	50
<i>Figura 37 diagrama de bloques estándar de un controlador PID, diseño propio.</i>	50
<i>Figura 38 diagrama bloques proporcional, tomado de [44].</i>	51
<i>Figura 39, proceso de nivel, tomado de [44].</i>	51
<i>Figura 40 banda proporcional, tomado de [44].</i>	52
<i>Figura 41, representación gráfica del Bias, tomado de [44].</i>	54
<i>Figura 42, diagrama de bloques de un proceso de nivel con válvula electrónica, tomado de [45].</i>	54
<i>Figura 43, diagrama válvula electrónica, tomado de [45].</i>	55
<i>Figura 44 representación gráfica de la acción de control integral, tomado de [45].</i>	56
<i>Figura 45 representación gráfica de la acción de control derivativa, tomado de [46].</i>	57
<i>Figura 46 ruido en el ángulo pitch, diseño propio</i>	67
<i>Figura 47 ángulo de inclinación en roll, diseño propio.</i>	69
<i>Figura 48. Modulo blue pill, tomado de [49].</i>	72
<i>Figura 49, pines de salida del ESC RecerStar, tomado de [50].</i>	74
<i>Figura 50 modulo GY-512, tomado de [51].</i>	74
<i>Figura 51 NRF24L01, tomado de [36].</i>	75
<i>Figura 52 Regulador de voltaje LM2596, tomado de [52].</i>	76
<i>Figura 53, batería LiPo, tomado de [54].</i>	77
<i>Figura 54 chasis F330, tomado de [55].</i>	78
<i>Figura 55 motores Emax RS2205, tomado de [55].</i>	79
<i>Figura 56 Hélices 8045, diseño propio.</i>	80
<i>Figura 57 esquema de control difuso, diseño propio.</i>	81
<i>Figura 58, diagrama en bloques del controlador difuso, diseño propio.</i>	83
<i>Figura 59 composición de la función triangular, tomado de [55].</i>	84

<i>Figura 60 comportamiento del control difuso, diseño propio.</i>	89
<i>Figura 61 diagrama en bloques de la arquitectura del controlador, diseño propio.</i>	89
<i>Figura 62 grafica error pitch con y sin filtro, diseño propio.</i>	91
<i>Figura 63 divisor de voltaje, diseño propio.</i>	93
<i>Figura 64 voltaje ADC de la batería con y sin filtro, diseño propio</i>	94
<i>Figura 65 mezclador para controlar el cuadricóptero, diseño propio.</i>	95
<i>Figura 66 diagrama de flujo de periféricos, diseño propio.</i>	98
<i>Figura 67 configuración de periféricos, diseño propio.</i>	99
<i>Figura 68 diagrama de flujo de secuencia de los módulos NRF24L01 y MPU6050, diseño propio.</i>	100
<i>Figura 69 diagrama de flujo de secuencia de verificación, diseño propio.</i>	101
<i>Figura 70 diagrama de flujo de la secuencia de operación, diseño propio.</i>	102
<i>Figura 71 práctica de variación de parámetros en el control PID, diseño propio.</i>	105
<i>Figura 72 prácticas de control PID en un cuadricóptero, diseño propio.</i>	105
<i>Figura 73 prácticas de control difuso en un cuadricóptero, diseño propio.</i>	106
<i>Figura 74 respuesta 1 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio</i>	109
<i>Figura 75 respuesta 2 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.</i>	110
<i>Figura 76 respuesta 3 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.</i>	110
<i>Figura 77 respuesta 4 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.</i>	111
<i>Figura 78 respuesta 5 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.</i>	111
<i>Figura 79 respuesta 6 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio</i>	112
<i>Figura 80 respuesta 7 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.</i>	112
<i>Figura 81 respuesta 8 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.</i>	113
<i>Figura 82 respuesta 9 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.</i>	113
<i>Figura 83 conexión serial dron-computadora</i>	115
<i>Figura 84 configuración de puerto</i>	116
<i>Figura 85 almacenamiento de datos recibidos</i>	116
<i>Figura 86 variables enviadas por el cuadricóptero</i>	117
<i>Figura 87 experimentación con funciones de membresía</i>	118
<i>Figura 88 valores de experimentación óptimos</i>	119
<i>Figura 89 Grafica Control fuzzy, ángulo pitch, diseño propio</i>	120
<i>Figura 90 Grafica Control fuzzy, ángulo roll, diseño propio</i>	121
<i>Figura 91 Grafica Control PID, ángulo roll, diseño propio.</i>	123
<i>Figura 92 Grafica Control PID, ángulo pitch, diseño propio.</i>	124

<i>Figura 93 rendimiento control PID vs fuzzy, diseño propio.</i>	125
<i>Figura 94 tiempo de ejecución control PID vs fuzzy, diseño propio.</i>	126
<i>Figura 96 método de inferencia, diseño propio.</i>	136
<i>Figura 97 funciones de membresía para la variable de entrada “ERROR”, diseño propio.</i>	138
<i>Figura 98 funciones de membresía para la variable de entrada “CAMBIO_DEL_ERROR”, diseño propio.</i>	139
<i>Figura 99 funciones de membresía para la variable de entrada “SALIDA”, diseño propio.</i>	139
<i>Figura 100 Estructura del cuadricóptero, tomado de[55].</i>	151
<i>Figura 101 ubicación de los motores para este proyecto, diseño propio</i>	151
<i>Figura 102 ubicación de las hélices, tomado de [24].</i>	152
<i>Figura 103 montaje completo de los motores y hélices, diseño propio.</i>	153
<i>Figura 104 ubicación de hélice con sentido antihorario, diseño propio.</i>	153
<i>Figura 105 movimientos del cuadricóptero; pitch, roll, yaw, diseño propio.</i>	154
<i>Figura 106. movimientos laterales en un cuadricóptero, diseño propio.</i>	155
<i>Figura 107. movimiento YAW en un cuadricóptero, diseño propio.</i>	156
<i>Figura 108. movimiento vertical en un cuadricóptero, diseño propio.</i>	157
<i>Figura 109 diagrama de bloques PID, tomado de.</i>	158
<i>Figura 110 línea de código correspondiente al ángulo pitch, ganancia proporcional, diseño propio</i>	160
<i>Figura 111 línea de código correspondiente al ángulo pitch, ganancia integral, diseño propio.</i>	160
<i>Figura 112 línea de código correspondiente al ángulo pitch, ganancia derivativa, diseño propio.</i>	161
<i>Figura 113 esquema de enrutamiento del PCB, diseño propio.</i>	167
<i>Figura 114 componentes que hacen parte del PCB, diseño propio.</i>	168
<i>Figura 115 circuito definitivo, diseño propio.</i>	169
<i>Figura 116 circuito impreso en la placa PCB, diseño propio.</i>	170
<i>Figura 117 perforación de la PCB, diseño propio.</i>	171
<i>Figura 118 PCB instalada en la estructura del cuadricóptero, diseño propio.</i>	171

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 tipos de acelerómetros, tomado de [31].</i>	35
<i>Tabla 2 tipos de giroscopio, tomado de [32].</i>	35
<i>Tabla 3 factores técnicos para elegir el software de programación, diseño propio.</i>	61
<i>Tabla 4 elección del software para diseño del controlador fuzzy, diseño propio.</i>	63
<i>Tabla 5 comparativa del tiempo de ejecución del algoritmo en Matlab vs Xfuzzy, diseño propio</i>	64
<i>Tabla 6 tiempo de muestreo, diseño propio.</i>	65
<i>Tabla 7. Tiempo de ejecución de cada ciclo máquina, diseño propio.</i>	65
<i>Tabla 6 funcionalidad de cada dispositivo electrónico usado, diseño propio.</i>	70
<i>Tabla 7 Características técnicas consideradas para elegir cada dispositivo electrónico, diseño propio.</i>	71
<i>Tabla 8 análisis de los pines E/S del STM32F103C8, diseño propio</i>	73
<i>Tabla 9 características del frame F330, diseño propio.</i>	79
<i>Tabla 10 rangos de operación de las variables en la ecuación del error, diseño propio.</i>	82
<i>Tabla 11 matriz de reglas de inferencia, diseño propio.</i>	87
<i>Tabla 12 valores de medición del nivel de batería, diseño propio.</i>	93
<i>Tabla 13 velocidad de operación para cada periférico de comunicación, diseño propio.</i>	98

ECUACIONES

<i>Ecuación 1 filtro FIR.</i>	31
<i>Ecuación 2 filtro media móvil</i>	33
<i>Ecuación 3. filtro complementario</i>	33
<i>Ecuación 4 función gaussiana.</i>	43
<i>Ecuación 5 Expresión matemática para el método de inferencia Mamdani.</i>	45
<i>Ecuación 6 centroide, método de defusificación.</i>	47
<i>Ecuación 7 componente proporcional.</i>	51
<i>Ecuación 8 componente proporcional para un proceso de nivel.</i>	52
<i>Ecuación 9, banda proporcional.</i>	53
<i>Ecuación 10, ejemplo modelo matemático de nivel</i>	53
<i>Ecuación 11, ejemplo modelo matemático en estado estacionario.</i>	53
<i>Ecuación 12, componente proporcional + Bias</i>	53
<i>Ecuación 13 componente integral.</i>	56
<i>Ecuación 14 componente derivativo.</i>	56
<i>Ecuación 15. suma de las componentes PID.</i>	58
<i>Ecuación 16 módulo de aceleraciones para estimar los ángulos pitch y roll.</i>	66
<i>Ecuación 17 ángulo de inclinación pitch</i>	66
<i>Ecuación 18 ángulo de inclinación roll</i>	66
<i>Ecuación 19 ecuación ángulo pitch</i>	67

<i>Ecuación 20 ecuación ángulo roll.....</i>	<i>67</i>
<i>Ecuación 21 conversión a frecuencia.....</i>	<i>68</i>
<i>Ecuación 22 rotación eje z en pitch.....</i>	<i>68</i>
<i>Ecuación 23 rotación en eje z en roll.....</i>	<i>68</i>
<i>Ecuación 24 calculo ángulo pitch mediante aceleraciones y velocidades angulares.....</i>	<i>69</i>
<i>Ecuación 25 calculo ángulo pitch mediante aceleraciones y velocidades angulares.....</i>	<i>69</i>
<i>Ecuación 26 corriente máxima en batería</i>	<i>77</i>
<i>Ecuación 27 tiempo de vuelo.....</i>	<i>77</i>
<i>Ecuación 28 cálculo del error – diseño propio.....</i>	<i>82</i>
<i>Ecuación 29 evaluación mediante derivada para encontrar el cambio del error</i>	<i>82</i>
<i>Ecuación 30 representación matemática del filtro media móvil utilizado.....</i>	<i>90</i>
<i>Ecuación 31 cálculo del valor de resistencias.</i>	<i>91</i>
<i>Ecuación 32 encontrar el valor de R1</i>	<i>92</i>
<i>Ecuación 33 valor definitivo de la resistencia.</i>	<i>92</i>
<i>Ecuación 34 representación matemática del filtro complementario implementado.....</i>	<i>93</i>
<i>Ecuación 35 potencias aplicadas para cada motor</i>	<i>96</i>
<i>Ecuación 36 potencia entregada a los motores en función del voltaje de la batería.....</i>	<i>97</i>

ANEXOS

<i>ANEXO A: GUIAS DE LABORATORIO, CONTROL DIFUSO Y PID</i>	<i>130</i>
<i>ANEXO B: DISEÑO ELECTRONICO</i>	<i>167</i>

RESUMEN

El presente trabajo de grado muestra una plataforma didáctica tipo dron multi rotor, la cual servirá como herramienta de apoyo para los estudiantes y docentes en las materias de control incluidas en el pensum académico del programa de ingeniería electrónica en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, el diseño de un cuadricóptero implica una amplia gama de conocimientos de control y electrónica en general, gracias a esto los estudiantes tendrán la oportunidad de afianzar tanto sus conocimientos de hardware, como de software, dado que el desarrollo del sistema de control para este dispositivo se realizó en una plataforma especializada en el diseño de controladores difusos, la cual permite al usuario configurar los parámetros de forma versátil. Para este trabajo se realizaron dos guías donde los estudiantes pueden poner en práctica el diseño estructural y de software del cuadricóptero, ayudándose de herramientas audiovisuales, como son los videos realizados por los autores, donde se explican los paradigmas teórico-prácticos que implican el diseño de un controlador inteligente como lo es el difuso. Gracias al estudio de caso realizado para este trabajo se pudo evidenciar el impacto y la motivación que genera el desarrollo de este tipo de prácticas de robótica móvil en los estudiantes de pregrado que cursen materias a fines al control.

Palabras clave: cuadricóptero, robótica móvil, lógica difusa, PID

ABSTRACT

The present degree work shows a didactic platform multi-rotor drone type, which will serve as a support tool for students and teachers in the subjects of control included in the academic curriculum of the electronic engineering program in the Autonomous University Corporation of Cauca. The design of a quadcopter implies a wide range of knowledge of control and electronics in general, thanks to this, the students will have the opportunity to consolidate both their knowledge of hardware and software, since the development of the control system for this device is carried out on a platform specialized in the design of fuzzy controllers, which allows the user to configure the parameters in a versatile way. For this work, two guides were made where the students can put into practice the structural design and the software of the quadcopter with the help of audiovisual tools, such as the videos made by the authors, where the theoretical-practical paradigms are explained, that implies the design of an intelligent controller such as the fuzzy one. Thanks to the case study carried out for this work, it was possible to demonstrate the impact and motivation generated by the development of this type of mobile robotics practices in undergraduate students studying subjects related to control.

Keywords: Quadcopter, mobile robotics, fuzzy logic, PID.

INTRODUCCION

Los comienzos de la robótica educativa “RE” surgen en la década de los años 60 con la evolución de los ordenadores que pocas universidades y empresas tenían a disposición. En estos sectores surgió uno de los primeros leguajes de programación para el ámbito educativo llamado LOGO. Cynthia Solomon, Seymour Papert y Wally Feurzeig desarrollaron la primera versión de logo, un robot tortuga que se desplazaba utilizando instrucciones de programación simples con la finalidad de que los estudiantes adquirieran conceptos básicos en la programación y posteriormente aprender conceptos matemáticos por medio de la práctica utilizando este medio tecnológico [1].

Hoy en día diversos institutos de educación básica media y universitaria han utilizado “RE” como herramienta de apoyo para la enseñanza de diversas materias de su pensum académico [2], esto debido a los buenos resultados obtenidos en los estudiantes a medida que se ha ido introduciendo la RE(robótica educativa) al sector académico. La buena acogida que tiene esta disciplina se debe a que posee la integración de diversas áreas. En la parte científica se pueden encontrar conocimientos eléctricos, electrónicos, mecánicos, informáticos y también en el área de las comunicaciones [3].

Al estar ligada la RE a tantas disciplinas se le puede atribuir la transversalidad o interdisciplinaridad [4], con estas características la RE ha adoptado distintos modelos robóticos como robots humanoides [5], robots para la enseñanza de diversas lenguas [6] y drones [7]. En el ámbito de los drones para la educación se encuentran los cuadricópteros, estos aparatos han sido utilizados en diversas investigaciones relacionadas con la ingeniería de control [8], puesto que su funcionalidad involucra múltiples sensores, actuadores y algoritmos de control que son utilizados para su estabilización durante el vuelo [9].

Estos algoritmos de control son utilizados para controlar diversos diseños robóticos, procesos industriales, navales entre otros. Existen numerosas técnicas para desarrollar un algoritmo de control que se encuentran en la literatura de teoría de control clásico, control moderno y control inteligente. Dentro de la teoría del control inteligente se encuentran las redes neuronales, algoritmos genéticos y control difuso [10]; asimismo, el control difuso es una de las ramas con más crecimiento en el sector académico por la cantidad de investigaciones publicadas en diversas bases de datos académicas [11]. Por lo tanto, es importante practicar este tipo de controladores en una plataforma didáctica para que los alumnos puedan tener una buena praxis y al mismo tiempo ganar experiencia en esquemas sobre este tipo de controladores.

CAPITULO I: EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la introducción de herramientas computacionales e informáticas en las aulas de clases, surgen las tecnologías de la información y comunicación TIC, esta, con el paso del tiempo dio pie a la robótica educativa (RE). A partir de entonces, la RE se ha constituido en una herramienta de apoyo en los procesos de enseñanza aprendizaje en los contenidos curriculares que abarcan en educación básica, media y universitaria[12].

La RE ha adoptado distintos tipos de robots entre los cuales se encuentran los aéreos o más comúnmente llamados drones, estos se dividen en dos grupos, que son los de ala fija y multi rotor[13](DMR). Con los DMR se han desarrollado proyectos de carácter educativo enfocados al área de control en las universidades como ; Rey Juan Carlos (Madrid España)[14], universidad de Oviedo (Asturias España)[15], universidad de Brown (Rhode Island, USA)[16] y universidad Grenoble Alpes (Francia)[17]. En estos proyectos los estudiantes abordan prácticas sobre técnicas de control de posición, esquivando obstáculos, persecución, auto localización o realizar el diseño de los controladores en simulación empleando herramientas como simulink o gacebo[18][19]. Mediante el transcurso de estos proyectos, los estudiantes demostraron motivación al aprendizaje, además de tener la posibilidad de adquirir diferentes habilidades en el modelado de controladores, procesamiento de señales, programación embebida e informática industrial[17]. Este perfil de educación imparte las prácticas en los estudiantes, haciendo que se acentúen los conceptos teóricos, algoritmia entre otras habilidades del proceso formativo en ingeniería.

Mediante el uso de prototipos utilizados para el desarrollo de prácticas se obtuvieron resultados favorables en los estudiantes de las universidades mencionadas anteriormente, para el caso particular de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca para el Programa de Ingeniería Electrónica (PAI), donde se oferta una asignatura denominada control inteligente en la cual se estudia control difuso, hasta el momento no se tiene precedentes sobre el uso de modelos de educación utilizando este tipo de recursos como herramientas pedagógicas para realizar prácticas de los conceptos vistos de manera teórica, por tanto, se desconocen los efectos y ventajas que puedan tener en lo estudiantes que cursen esta materia.

La integración de estos prototipos podría mejorar la participación y motivación en los alumnos, además de propiciar ambientes de practica que permitan el aumento de experiencia en esquemas de control difuso y el fomento en el uso de herramientas de software que se han utilizado durante el proceso formativo del estudiante.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es el efecto del uso de sistemas robóticos como es el caso de un dron multi rotor para el desarrollo de prácticas de control difuso en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Analizar el uso de una plataforma didáctica tipo dron multi rotor como herramienta de apoyo en el aprendizaje de técnicas de control difuso para el programa de ingeniería electrónica en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar características necesarias de una plataforma robótica tipo dron multi rotor para el desarrollo de prácticas sobre control difuso en el PAI.
2. Diseñar una metodología para integrar una plataforma tipo dron multi rotor a prácticas de control difuso en el PAI.
3. Evaluar la metodología mediante un estudio de caso con estudiantes del PAI de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

En este capítulo se llevará a cabo una indagación y recopilación de datos que permitan realizar una base referencial orientada al desarrollo de una guía que permita dar ilustración sobre cómo está conformado estructuralmente un cuadricóptero, su instrumentación asociada y los esquemas de control que este mismo utiliza para su funcionamiento.

Cabe destacar que aeronaves como los cuadricópteros han desempeñado un papel importante en el área de la educación, puesto a que estos artefactos se usan para el aprendizaje activo y la enseñanza interdisciplinaria donde se pueden encontrar materias como las matemáticas, electrónica, programación embebida o materias relacionadas en el área del control, entre otras. Puesto a que este trabajo se enfoca en la enseñanza del control y programación embebida es preciso dar claridad a temas de importancia como los siguientes:

2.1 ACTUADORES.

Un actuador es un dispositivo capaz de generar energía eléctrica, hidráulica o neumática con el fin de producir un efecto en un proceso o sistema que se desee controlar. Para el caso de los cuadricópteros los actuadores serían los motores que propulsan las hélices y gran parte de estas aeronaves utilizan motores sin escobillas o “*brushless*”, puesto que entregan una mejor relación entre potencia de salida y tamaño en comparación al motor con escobillas. A continuación, se explicará el modo de funcionamiento de estos dos tipos de motores y las ventajas – desventajas que poseen.

2.1.1 Motor con escobillas.

El motor de corriente continua con escobillas se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte a la estructura interna del motor además de poseer un agujero en el centro que generalmente es de forma cilíndrica. Dentro del estator se encuentran los polos magnéticos que probablemente sean de imanes permanentes o devanados. El rotor que es el segundo componente y típicamente de forma cilíndrica, también posee un devanado con un núcleo al que llega la corriente en pulsos conmutada por escobillas (ver figura 1).

Para que el motor gire es necesario conmutar mecánicamente la corriente que ingresa al rotor, para lograrlo, el motor posee internamente un anillo de láminas de cobre llamadas delgas que se encuentra sobre el eje del rotor y sirve para conectar las bobinas del inducido al circuito exterior a través de las escobillas.

Las escobillas son láminas de grafito que se colocan sobre el colector de delgas, permitiendo la unión eléctrica de las delgas con los bornes de conexión. Al girar el rotor las escobillas se rozan continuamente con las delgas conectando la bobina correspondiente a cada delga.

Las desventajas de este motor se deben que al rozarse las escobillas con las delgas se genera fricción, chispas, ruido eléctrico además de provocar pérdida de potencia y el deterioro de las escobillas, las cuales deben ser reemplazadas si se tiene un uso constante. Por estos motivos se usan estos motores en Cuadricópteros pequeños que tengan un peso entre los 100g a 350g.

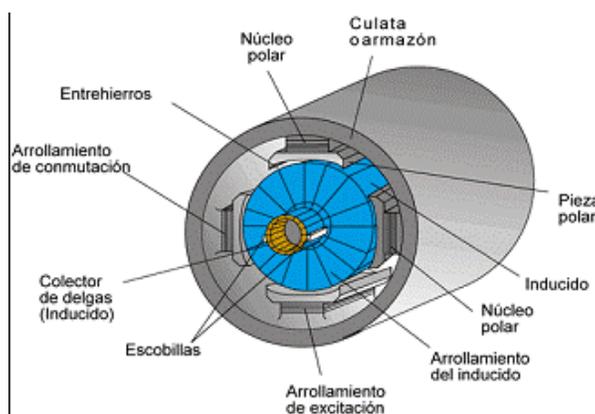


Figura 1. Motor de corriente continua de escobillas, tomado de [20]

2.1.2 Motor sin escobillas

Los motores sin escobillas cuentan con 3 bobinas de cobre en conexión estrella. Típicamente los polos de las bobinas están en el estator y alrededor de ellas se encuentran imanes que están pegados en el rotor, de esta manera al energizar las bobinas se hace girar el rotor convirtiendo la energía eléctrica a mecánica (ver figura 2).

El modo de funcionamiento consiste que al energizar dos polos de las 3 bobinas se produce un campo magnético en la misma, así, los polos energizados son repelidos por el campo magnético que producen los imanes para luego generar un pequeño movimiento en el rotor.

Al producirse este pequeño movimiento del rotor hacia una dirección, es al mismo tiempo repelido por un imán y atraído por otro. En este preciso momento es cuando se suspende el potencial eléctrico en la bobina previamente energizada e inmediatamente se energiza otra de las 2 bobinas restantes. Es ligeramente complicado controlar la velocidad de este tipo de motores puesto que es imposible realizar esta conmutación eléctrica de las bobinas manualmente, por tanto, se utiliza un dispositivo electrónico llamado variador de velocidad

o ESC (*Electronic Speed Controllers*). Al realizar la conmutación de las bobinas electrónicamente, se evita generar chispas, ruido eléctrico, sobrecalentamiento y pérdida de potencia, ya que el rotor no tiene roces con el estator.

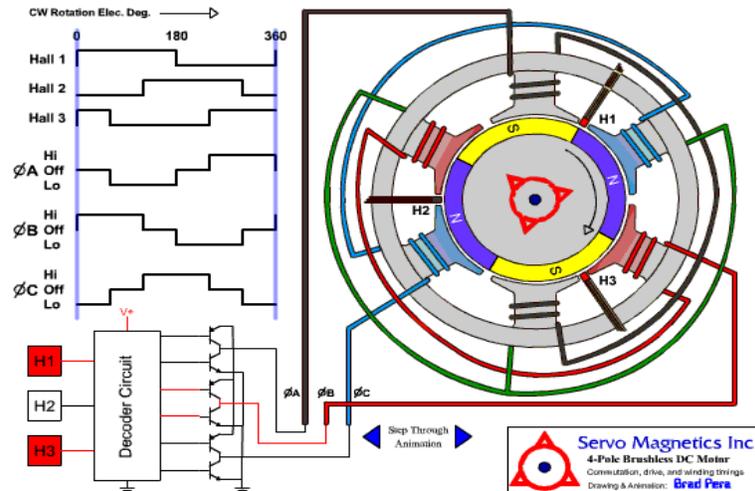


Figura 2. Motor de corriente continua sin escobillas brushless, tomado de [21].

2.2 ESTRUCTURA DE DRONES MULTIROTOR Y CONFIGURACION DINAMICA.

La estructura de aeronaves tipo multi rotor están definidas por tener un cuerpo central que se utiliza para albergar componentes electrónicos y batería. También de este cuerpo central se desprenden múltiples brazos que son utilizados para sostener fijamente a motores de corriente continua típicamente sin escobillas.

2.2.1 Configuraciones convencionales

El sistema de vuelo de estas aeronaves tipo dron multi rotor depende del giro invertido de los rotores, dependiendo del número de rotores que tenga la aeronave la mitad de estos deben girar a favor de las manecillas del reloj (CW) y la mitad restante en contra de las manecillas del reloj (CCW), se hace de esta manera para contrarrestar el momento de inercia que generan los motores y hélices al girar. En las estructuras de aeronaves tipo multi rotor más destacadas

se encuentran los tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros. En la figura 3 se observan las diversas configuraciones de los drones multi rotor descritas anteriormente.

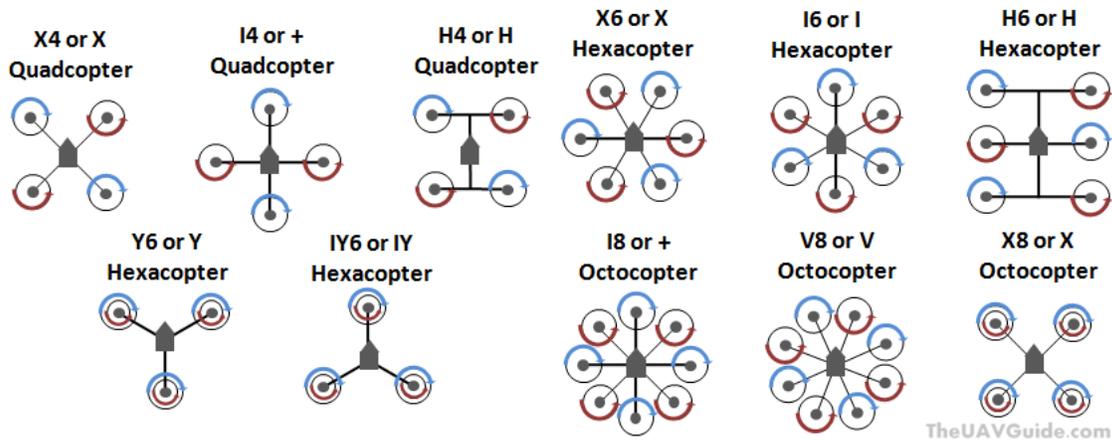


Figura 3. Estructura de drones multi rotor, tomado de [22].

La estructura tipo cuadricóptero es una de las más comunes dentro de las aeronaves tipo multi rotor, y esta al igual que la estructura tipo Hexacóptero y Octocoptero se configura mediante las formas “X”, “+” o “H”.

2.2.2 Configuración en X

Existen diferentes formas de configurar la estructura de un cuadricóptero entre ellas está la configuración en X, cruz y H. Para este caso se utilizará el arreglo en X, ya que brinda un campo de visión amplio puesto que los motores no interfieren con la cámara si se requiere [1].

En la figura 4 se puede ver la estructura del dron en configuración X, este chasis cuenta con dos plataformas perforadas las cuales sostienen de manera firme mediante tornillos las placas de circuitos necesarias para su funcionamiento. En los extremos de cada brazo va ubicado cada motor.



Figura 4: estructura en X, tomado de [23].

2.2.3 Sentido de giro de motores

Para mantener la estabilidad del dron, dos de los cuatro motores deben girar a favor de las manecillas del reloj y los dos motores restantes deben de girar en contra de las manecillas del reloj, en la figura 5 se puede apreciar la ubicación de cada motor enumerados del 1 al 4 junto a su sentido de giro.

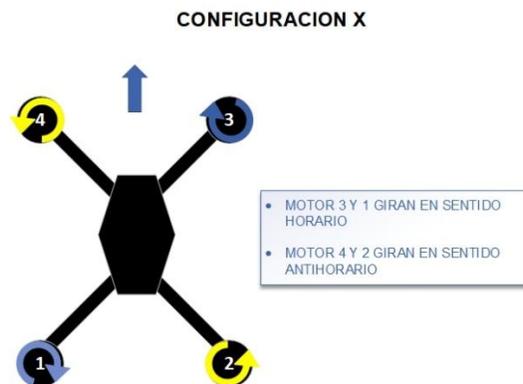


Figura 5: Sentido de giro de cada motor para estructura en x, diseño propio.

2.2.4 Instalación de hélices

Una vez verificado el sentido de giro para los cuatro motores se procede a instalar las hélices, en la figura 6 se indica como ubicarlas, es importante que cada hélice se instale en el motor correspondiente de lo contrario el cuadricóptero no podrá elevarse.

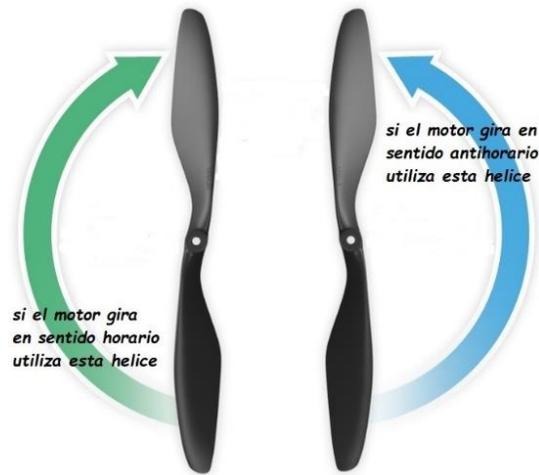


Figura 6: Sentido de giro de cada hélice, tomado de [24].

2.2.5 Movimientos de un cuadricóptero

El aumento y la reducción de las revoluciones de cada motor permite al cuadricóptero realizar movimientos en los ejes (x, y, z) o (pitch, roll, yaw) respectivamente como se representa en la figura 7.

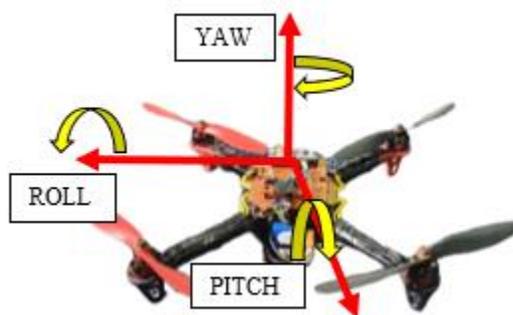


Figura 7: movimientos de un cuadricóptero, diseño propio.

Yaw es el movimiento de giro sobre su propio eje, roll es el movimiento de inclinación, ya sea hacia la derecha o izquierda, pitch es el movimiento hacia adelante y hacia atrás

Para moverse en el eje longitudinal o (*yaw*) en sentido horario, se efectúan mediante el aumento de revoluciones en los motores 1,3 y disminución de velocidad en los motores 2 y 4 como se observa en la figura 8 dibujo E, mientras si se desea ir en sentido antihorario los motores 1,3 deberán disminuir las revoluciones y aumentar la velocidad en los motores 3 y 4 (ver figura 8 dibujo F).

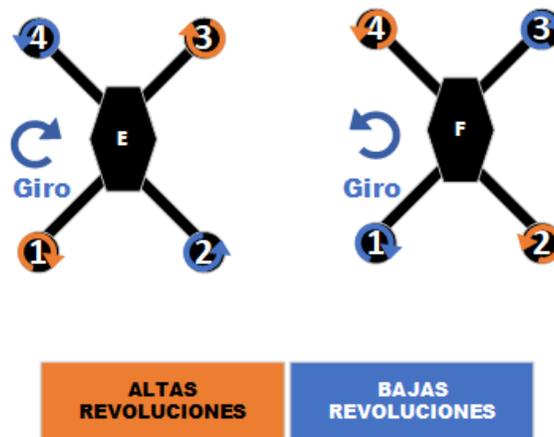


Figura 8. movimiento yaw en un cuadricóptero, diseño propio.

Para realizar movimientos en el eje transversal (*pitch*) se aumentan las revoluciones en los motores 3,4 y se disminuyen las revoluciones de los motores 2,1, así, el cuadricóptero se inclinará hacia adelante como se ve en la figura 9 dibujo A. Por el contrario, si se aumenta las revoluciones en los motores 2,1 y se disminuyen en 3,4 el cuadricóptero se inclina hacia atrás (figura 9 dibujo B).

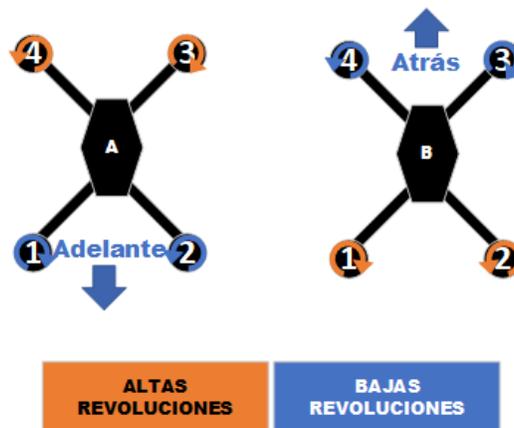


Figura 9. movimiento pitch en un cuadricóptero, diseño propio.

Los movimientos en eje *roll*, se llevan a cabo mediante el aumento de revoluciones en los motores 4,1 y disminución de revoluciones para los motores 3,2. De esta manera el cuadricóptero se dirigirá hacia la derecha (ver figura 10 dibujo C). Para dirigir la aeronave hacia la izquierda se debe aumentar las revoluciones en los motores 1,4 y disminuirlas en los motores 2,3 (ver figura 10 dibujo D).

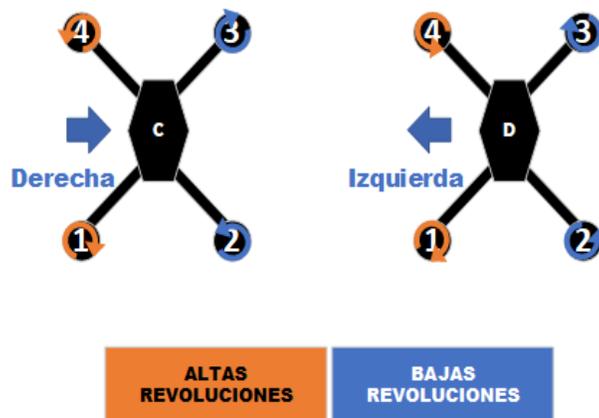


Figura 10. movimiento roll en un cuadricóptero, diseño propio.

En la figura 11 dibujos G, H, se ilustra como al aumentar las revoluciones en los 4 motores se gana altura, por el contrario, al disminuirlas se pierde altura.

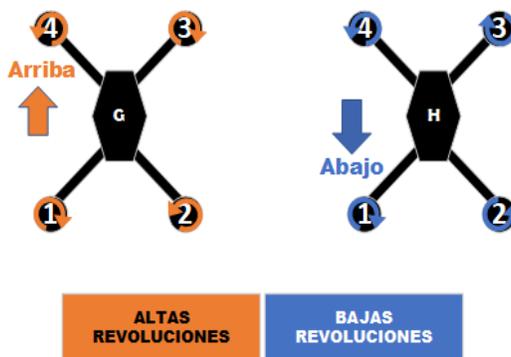


Figura 11. movimiento de ascenso y descenso en un cuadricóptero, diseño propio.

Para coordinar los movimientos descritos anteriormente y brindar estabilidad en vuelo, el cuadricóptero utiliza sistemas de giroscopios, acelerómetros y algoritmos de control.

2.4 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN Y SEÑALES UTILIZADAS EN CUADRICOPTEROS

2.4.1 PWM

La modulación por ancho de pulso (PWM) usa la salida digital del microcontrolador para simular una señal analógica, la señal de PWM se genera mientras el ciclo de trabajo esta activado y dependiendo del número de veces que sea activado, como se ve en la figura 12.

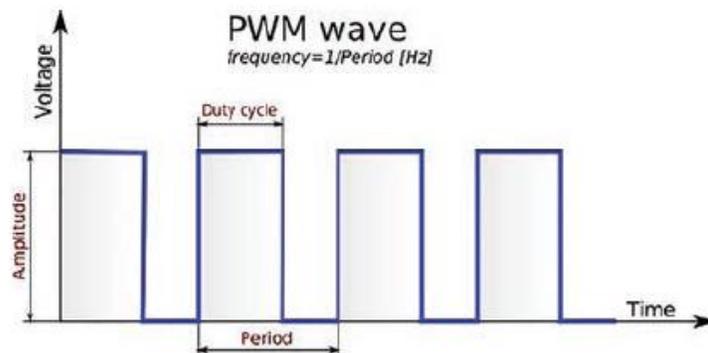


Figura 12. Señal PWM, tomado de [25].

2.4.2 I2C

El I2C (*Inter-Integrated Circuit*) es un protocolo de comunicación que se utiliza en diferentes dispositivos con circuitos integrados, su funcionamiento se basa en la comunicación serial ya que la información de bit a bit se transmite usando únicamente un cable, el envío y la recepción de la información también se hace mediante el mismo cable.

Este sistema de comunicación tolera hasta 112 dispositivos, entre ellos debe existir mínimo un dispositivo maestro y un esclavo, su velocidad de operación está entre los **100 y 400KHz**.

En la figura 13 se muestra el esquema básico para establecer una comunicación mediante I2C, las líneas de comunicación *serial Data* (SDA) y *serial Clock* (SCL) deben estar siempre conectadas a los dispositivos que se desean comunicar.

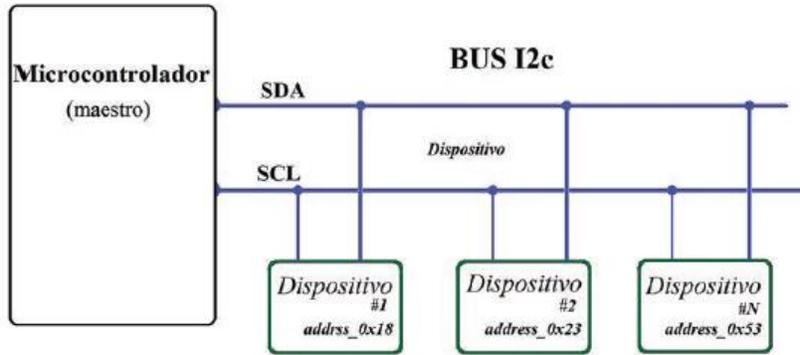


Figura 13. Esquema de comunicación I2C, tomado de [25].

El envío de tramas de información debe cumplir con una condición de inicio (*Start*) y una condición de finalización (*Stop*) como se ve en la figura 14.

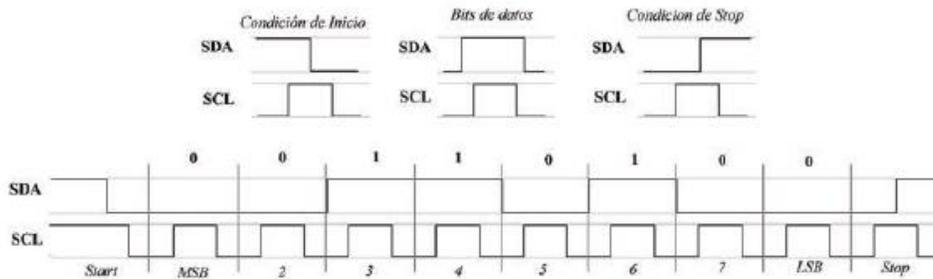


Figura 14. Condiciones start y stop, tomado de [25].

La Condición de Inicio (*Start*), se produce cuando la línea SDA pasa de un nivel alto a un nivel bajo, antes de que la otra línea, la SCL, cambie de nivel alto a nivel bajo

La Condición de finalización (*Stop*) se da tras enviar los datos de la comunicación, entonces la línea SDA cambia de un nivel bajo a nivel alto después de que la línea SCL cambie de nivel bajo a nivel alto[25].

2.4.3 SPI

SPI (*Serial Peripheral Interface*) fue desarrollado por motorola, es un sistema de comunicación que se usa para la transferencia de información entre circuitos integrados,

también emplea la metodología de maestro y esclavo, sin embargo, en este caso los dispositivos configurados como esclavos no pueden comunicarse entre ellos, ni iniciar una comunicación. Su velocidad de reloj es de hasta **50MHz**[26].

Este se compone por cuatro líneas como se ve en la figura 15, MOSI (*Master Output Slave Input*) proporciona una comunicación entre maestro y esclavo, MISO (*Master Input Slave Output*) accede a la comunicación del esclavo hacia el maestro, la línea *serial Clock* (SCK) proporciona una señal de reloj que sincroniza los dispositivos esclavos.

En algunos casos se requerirá de una línea adicional SS (*Slave Select*) para cada dispositivo esclavo conectado, esto permitirá seleccionar cuál de los dispositivos se comunicará con el maestro.

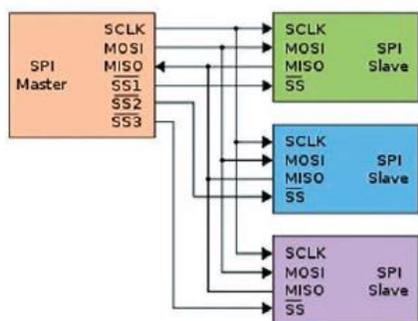


Figura 15. Bus SPI un maestro y tres esclavos, tomado de [25].

El dispositivo maestro siempre tiene en alto la señal SS, cuando él quiere comunicarse con un esclavo la señal SS pasara a bajo, cada que se genera un pulso de reloj en el maestro, este envía un bit por medio de la línea MOSI hacia el esclavo, a su vez si el esclavo necesita comunicarse con el maestro también procede a utilizar el pulso de reloj, pero en la línea SCK y luego por la línea de MISO hacia el maestro, todo este proceso se evidencia en la figura 16.

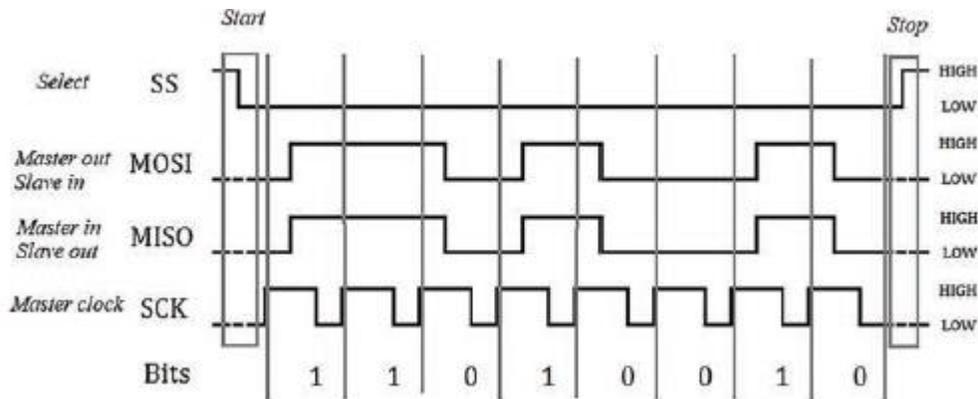


Figura 16. Condiciones start y stop SPI, tomado de [25].

2.4.4 Comunicación serial

La comunicación serie consiste en enviar datos bit a bit sobre una línea de comunicación, este protocolo permite la comunicación entre periféricos de forma síncrona o asíncrona.

En el modo síncrono es permitido la transmisión continua de datos y no hay un límite de tamaño sin embargo no es posible enviar información en ambos sentidos al mismo tiempo. En este modo se puede trabajar como maestro o esclavo, el maestro genera la señal de reloj e inicia o finaliza la comunicación mientras que el esclavo recibe la señal de reloj y espera instrucciones del maestro para enviar o recibir información.

En el modo asíncrono se usan relojes tanto para el emisor como para el receptor, los cuales deben estar sincronizados, cada trama de datos tiene una condición de inicio (*start*) y una condición de final (*stop*) para conseguir dicha sincronización (ver figura 17), para el modo asíncrono se usan dos líneas, RX (receptor) y TX (transmisor) lo cual es de utilidad gracias a que es posible enviar y recibir información de forma simultánea a diferencia del modo síncrono, por esta razón es habitual el uso del modo asíncrono[27].

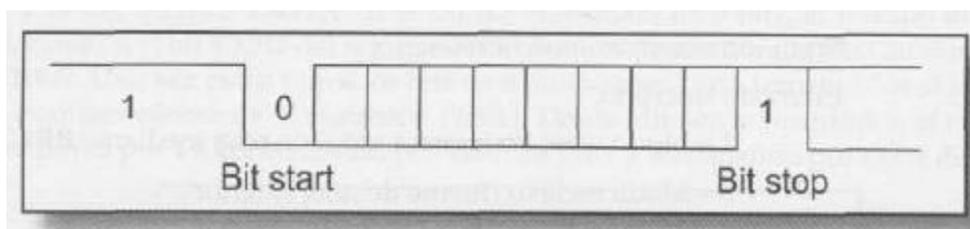


Figura 17. Transmisión asíncrona, tomado de [27].

2.5 FILTROS DIGITALES

En procesamiento digital de señales se le conoce como filtro digital al sistema que transforma los datos digitalizados en otros datos del mismo tipo por medio de un algoritmo. Es común que en los dispositivos electrónicos existan señales basura que afectan el desempeño, por esta razón existen los filtros, estos permiten el paso de cierto tipo de señales en un intervalo de frecuencia determinado, las señales que vulneran la estabilidad del sistema se les conoce como ruido y son eliminadas.

2.5.1 Filtro FIR (*Finite Impulse Response*)

Este tipo de filtro es una respuesta al impulso finita, tienen la ventaja de ser diseñados en base lineal, lo cual es vital cuando se requieren cero retardos de unas frecuencias respecto a otras, este filtro es estable gracias a su condición de recursividad, es decir que no necesita una realimentación de la salida a la entrada[28].

La ecuación 1 representa el filtro FIR en el dominio del tiempo, donde:

- $y(n)$ es la salida.
- $x(n)$ es la entrada.

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n - k]$$

Ecuación 1 filtro FIR

La salida del filtro es una sumatoria de las entradas en instantes anteriores empezando desde cero, todas las entradas desde la actual hasta la $-M$ se suman multiplicadas individualmente por un factor de diferencia b_k .

En la figura 18 se ve el filtro FIR representado en diagrama de bloques, donde:

- $x[n]$ es la secuencia de entrada.
- $x[n - N]$ es la secuencia de entradas retrasadas N muestras.

- $y[n]$ es la secuencia de salida del filtro.
- $b(n)$ valor de los coeficientes no recursivos.
- Z^{-1} retardo de una muestra.

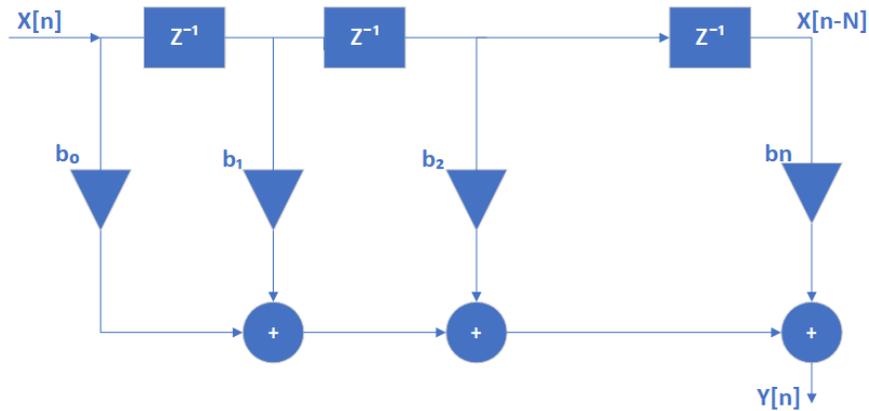


Figura 18. Diagrama de bloques de un filtro FIR, tomado de[28].

Cuando ingresa una muestra a la entrada del filtro en el instante cero, esta se multiplica por b_0 , como es la primera muestra en ingresar los bloques de retardo Z^{-1} valen cero, por lo tanto, no hay ninguna contribución por parte de b_1 a b_n , así que la salida del filtro será igual a b_0 .

La siguiente muestra pasa por el primer bloque de retardo, por ende, tiene la contribución de la muestra anterior y la actual, así que la salida del filtro será $b_1 + b_0$, este mismo proceso se repite n veces con las muestras necesarias, si el filtro tiene una gran cantidad de muestras se va a demorar más en procesar la salida lo cual se traduce en un tiempo de respuesta largo dependiendo del sistema.

2.5.2 Filtro media móvil

La técnica de media móvil se usa para conseguir el promedio de las muestras a medida que van ingresando, las muestras que ingresan se suman y se dividen, de ahí se deriva su nombre. El promedio es móvil cuando se recalcula cada vez que se alcanza una muestra nueva,

tomando las anteriores M muestras, este es un filtro recursivo ya que posee una realimentación.

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k]$$

Ecuación 2 filtro media móvil

En la ecuación 2 se muestra matemáticamente el filtro media móvil, donde:

- $x[n]$ es la secuencia de entrada.
- $x[n-k]$ es la secuencia de entradas retrasadas N muestras.
- $y[n]$ es la secuencia de salida del filtro.
- M es el numero de lecturas.

La finalidad de este filtro es eliminar los picos de las frecuencias altas que no aportan datos relevantes sino ruido y realizar una media con las muestras restantes para así generar un valor más acorde a la realidad en la salida.

2.5.3 Filtro complementario

Este tipo de filtro es ampliamente usado en sistemas de navegación inercial y sistemas de visión, no necesita ninguna exposición estadística de la señal de ruido que causa perturbación al sistema, gracias a esto los cálculos matemáticos que realiza no son exhaustivos, lo cual se traduce en un mejor rendimiento computacional ya que el procesador consume pocos recursos[29].

La representación matemática del filtro complementario está dada por:

$$\theta = A \cdot (\theta_{prev} + \theta_{gyro}) + B \cdot \theta_{accel}$$

Ecuación 3. filtro complementario

Donde A y B son constantes cuyo valor inicial puede ser 0.98 y 0.02 respectivamente, el filtro se puede calibrar variando estas constantes siempre y cuando la suma de ambos sea menor o igual a 1.

2.6 INSTRUMENTOS ELECTRONICOS UTILIZADOS EN CUADRICOPTEROS.

Para el caso del control de un cuadricóptero existen múltiples variables a controlar, tales como: velocidad angular, aceleración lineal, altura y posición. Sin embargo, la velocidad angular y aceleración lineal son indispensables puesto que con estas medidas se obtiene mediante procesos matemáticos la posición angular en los ejes (x, y, z) o (*pitch*, *roll*, *yaw*) de la aeronave como se ve en la figura 19.

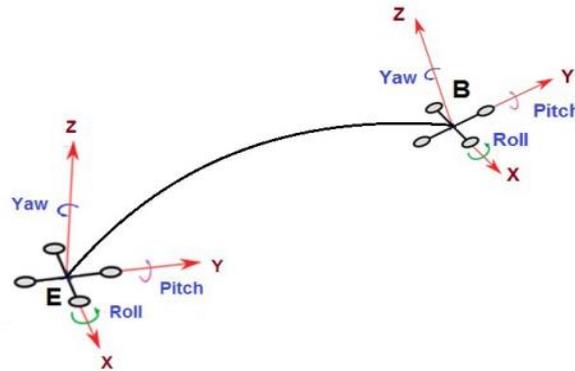


Figura 19. Sistemas de referencia de un cuadricóptero, tomado de [30].

2.6.1 Acelerómetro

Tal como su nombre lo indica el acelerómetro mide la aceleración que actúan sobre un objeto en unidades de metros por segundo al cuadrado (m/s^2), estos sensores pueden medir la aceleración en uno o tres ejes, el acelerómetro de un eje es nombrado direccional, mientras que el acelerómetro de 3 ejes o 3D se le conoce como ortogonal ya que mide la aceleración lineal en X, Y y Z.

En el mercado se encuentran diferentes tipos de acelerómetros, su uso depende del requerimiento que se desea satisfacer, en la tabla 1 se muestran las principales aplicaciones de cada uno de ellos.

Tipo de acelerómetro	Aplicación
Piezoeléctrico baja impedancia	- Investigación

	- Altas temperaturas (>120°)
Piezoeléctrico de alta impedancia	- Industria
MEMS	- Control de airbags en automóviles - Sistemas de frenado antibloqueo
Mecánico	- Acelerómetro de masa sísmica, detectan la fuerza impuesta sobre una masa sísmica
Piezo-resistivo	- Aplicaciones de vibración en baja frecuencia (2.0Hz)

Tabla 1 tipos de acelerómetros, tomado de [31].

2.6.2 Giroscopio

El giroscopio es un dispositivo mecánico que mide el cambio en la posición angular del objeto en funcionamiento, manteniendo estable su orientación, la mayoría de ellos basan su construcción en sistemas microelectromecánicos (MEMS) dado que estos no se ven afectados por perturbaciones relacionadas con campos magnéticos o gravitatorios, al igual que los acelerómetros, los giroscopios emplean de uno a tres ejes, el giroscopio de tres ejes mide la velocidad angular en X, Y y Z, su unidad de medida se da en grados por segundos (°/s).

Además de los MEMS existen otros tipos de giroscopios, los cuales son utilizados en diferentes aplicaciones como se ve en la tabla 2.

Tipo de giroscopio	Aplicación
MEMS	- Medición inercial - Robótica
Óptico	- Navegación - Estabilización
Mecánicos	- Disminución del balanceo de navíos - Estabilizar plataformas de tiro

Tabla 2 tipos de giroscopio, tomado de [32].

2.6.3 Errores en los giroscopios y acelerómetros

Particularmente, tanto giroscopio, como acelerómetro poseen diferentes características que son de utilidad, sin embargo, hacer uso de ellos de manera individual conlleva a diferentes errores, como los que se describen a continuación:

2.6.4 Vibraciones

Generalmente sensores como el acelerómetro se usan en sistemas que vibran continuamente, la banda de frecuencia vibratoria puede variar entre 20 y 1000Hz, dependiendo del tipo de sensor, sin embargo, los sistemas en funcionamiento pueden incrementar estas vibraciones significativamente, por lo cual la medida del sensor se ve afectada arrojando medidas erróneas[31].

2.6.5 Deriva

Los sistemas guía constantemente agregan cambios a las posiciones que se calculan anticipadamente, esto hace que sean propensos a errores de medición, si ese error no se detecta se ira acumulando, produciendo que el sistema de una ubicación errónea diferente a la real, a esto se le conoce como deriva.

Teniendo en cuenta las complicaciones generadas por estos sensores, los diseñadores decidieron implementar una técnica conocida como fusión de sensores, esta técnica de fusión unifica a los dos sensores en uno solo, logrando así reunir la información relacionada con los fenómenos físicos que actúan sobre un mismo objeto. Esta técnica permite que los datos sensoriales de ambas fuentes converjan generando así una información precisa que compense los errores de ruido y deriva[33].

Para resolver el problema del ruido causado por las altas vibraciones es preciso hacer un análisis de frecuencia en el sensor para determinar si es necesario aplicar una operación matemática discreta para reducir este error[34].

Físicamente existe otra técnica usada para reducir las vibraciones, consiste en localizar el sensor encima de una plataforma hecha con un material como espuma acústica en la placa principal del circuito, de esta manera el sensor no recibe directamente el impacto del sistema en movimiento.

2.6.6 Módulos de comunicación RF

Las comunicaciones por radiofrecuencia son utilizadas en diferentes campos como: la televisión, telefonía móvil, radares, telecomunicaciones, entre otros, este tipo de comunicación se da mediante ondas de radio que viajan por el espectro radioeléctrico, en la actualidad existen chips de comunicación inalámbrica que utilizan radiofrecuencia, estos dispositivos permiten enviar y recibir datos de forma remota, teniendo coberturas de hasta 1 kilómetro, en el mercado existen diferentes módulos para transmisión y recepción de ondas electromagnéticas, entre ellos están: los módulos RF de 433MHz y el NRF24L01 de 2.4GHz (ver figura 20) cada uno de ellos tiene características únicas, su uso dependerá de los requerimientos del sistema al cual serán implementados.

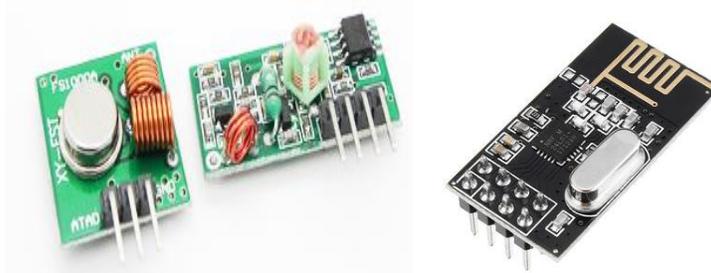


Figura 20. Módulos RF y Transceptor NRF24L01, tomado de [35][36]

2.6.7 Variador de velocidad para motores sin escobillas

En la figura 21 se ve el aspecto de un variador de velocidad o ESC, los cuales funcionan entregándole una señal PWM que le informa a que frecuencia debe realizar la conmutación de las bobinas del motor brushless. Se debe tener en cuenta que una señal PWM usa la salida digital del microcontrolador para simular una señal analógica por tanto podrían producirse problemas de ruido lo cual genera pequeñas oscilaciones en el cuadricóptero, por este motivo se ha desarrollado protocolos de comunicación digitales como el DShot 600, DShot 1200 o multiShot que funcionan a mayor frecuencia que la señal PWM y los datos son encriptados por códigos de redundancia cíclica aumentando la posibilidad de entregar la información correctamente al ESC.

Algunos variadores de velocidad llevan consigo un sistema operativo compatible con un programa llamado BLHely que permite cambiar parámetros como alterar la conmutación para que el motor Gire a favor o en contra de las manecillas del reloj, sistemas de protección para el mismo ESC, entre otros. Cabe destacar que si se desea implementar el DShot 600 o DShot 1200 existen librerías en la web para implementarlas en microcontroladores.

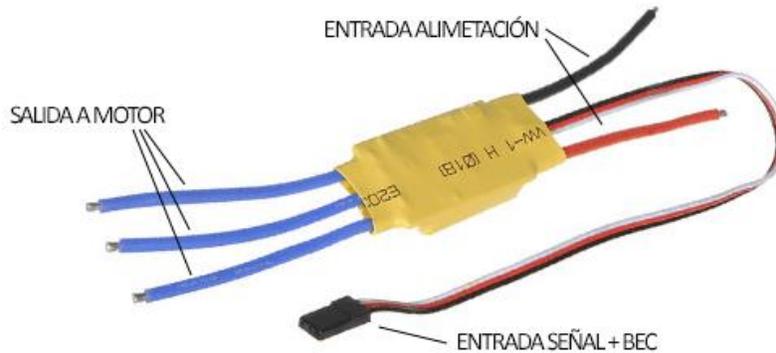


Figura 21. Variador de velocidad, tomado de [37].

2.7 SISTEMAS DE CONTROL

En esta sección se dará un repaso general al concepto de sistemas de control, posteriormente se enfatizará en los aspectos básicos individuales de los controladores PID y difuso.

El controlador es un conjunto de instrucciones encargado de mantener estable un sistema de forma autónoma. Esto se logra mediante la recopilación de información suministrada por sensores que retroalimenta constantemente el controlador y que este aplica diversas estrategias con el fin de mantener estable el sistema o planta.

En la figura 22 se muestra el funcionamiento de un sistema de control realimentado donde la señal de entrada *setpoint* ingresa al comparador y se resta con el valor leído lo cual genera una señal de error que pasa hacia el controlador donde se toma una decisión con el fin de volver el error cero, finalmente esta señal llega a la planta o sistema que se desea controlar y genera una salida correctiva. Las perturbaciones son algo común en estos sistemas por esta razón el controlador debe percatarse y siempre trata de llevar la variable medida al valor deseado.

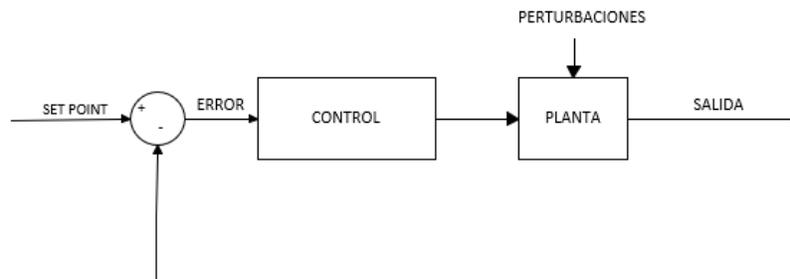


Figura 22. Diagrama de bloques de un sistema de control, diseño propio.

2.7.1 LÓGICA DIFUSA

En la década de los sesenta el ingeniero eléctrico Lofti Zadeh introdujo el concepto de lógica difusa en un artículo llamado “fuzzy sets” donde se expone por primera vez los criterios de esta técnica, sin embargo la primera aplicación de la lógica difusa en un sistema de control fue realizada por Ebrahim Mamdani en 1974[38]. A diferencia de la lógica clásica donde se utilizan valores de veracidad fijos como verdadero o falso, 1 y 0, la lógica difusa considera valores de veracidad parciales, gracias a esto no existe una única respuesta para una afirmación ya que esta puede ser parcialmente verdadera o parcialmente falsa lo cual se acomoda más a la cotidianidad del ser humano debido a que con frecuencia utilizan expresiones lingüísticas como: “la ropa está muy mojada”, “la ropa esta medio mojada”, “el vaso esta medio vacío”, “el vaso está lleno” entre otras. En base a esto es posible automatizar procesos mediante el diseño de un controlador difuso, trasladando el conocimiento del humano hacia un ordenador.

2.7.2 CONTROL DIFUSO

En este apartado se dará a conocer la composición y las bases del funcionamiento de un controlador difuso.

El control difuso es utilizado como técnica de control inteligente, donde su finalidad principal es formular y ordenar variables lingüísticas en un lenguaje matemático que una computadora sea capaz de comprender para así ejecutar una acción de control, este controlador por lo general se usa en sistemas no lineales debido a que no necesita conocer el modelo matemático de la planta aportando así una mayor flexibilidad.

En la figura 23 se muestra el diagrama de bloques de un controlador difuso, dentro del bloque llamado fuzzy se encuentra todo el procesamiento que hace el controlador para dar una respuesta acorde a lo programado.

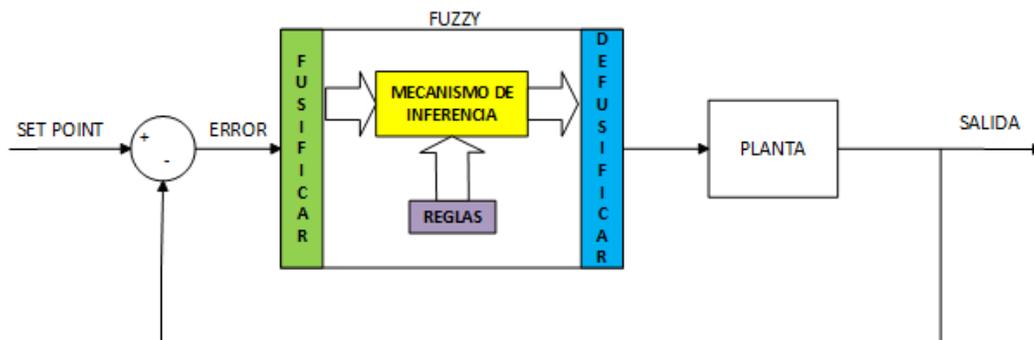


Figura 23. Diagrama de bloques de un sistema de control fuzzy, diseño propio.

Para diseñar un controlador difuso se necesitan de los siguientes elementos:

1. Variables de entrada y salida.
2. Variables lingüísticas.
3. Funciones de membresía.
4. Universo discurso.
5. Reglas de control.
6. Método de inferencia.
7. Defusificación.

2.7.3 Variables de entrada y salida

Para diseñar un controlador difuso inicialmente se deben definir las variables de entrada y salida del sistema, las cuales están asociadas al problema que se requiere solucionar, variable de entrada comúnmente es el error como se ve en el diagrama de la figura 23, dado que esta es la diferencia entre el *setpoint* y la salida.

La variable de salida describe el resultado que se quiere obtener del sistema para así controlar una magnitud deseada, ya sea temperatura, voltaje, velocidad, entre otras.

2.7.4 Variables lingüísticas

Para cada una de las variables de entrada y salida debe haber un número determinado de variables lingüísticas, por ejemplo, si una de las variables de entrada es el “error” entonces los términos lingüísticos asociados serán: “error negativo grande”, “error negativo pequeño”, “error cero”, “error positivo pequeño”, “error positivo grande”. El número de variables lingüísticas se puede hallar usando la experiencia del operador a cargo de la planta o mediante ensayo y error.

2.7.5 Universo de discurso

Las variables de entrada y salida están definidas en un rango de valores determinado donde pueden intervenir, este rango se encuentra indagando sobre el problema que desea solucionar, por ejemplo, si se desea controlar un motor DC de 12 voltios, el rango de operación será fijado con base al voltaje, por lo tanto, el universo discurso será de -12V hasta 12V.

2.7.6 Función de membresía

Las variables lingüísticas deben estar representadas mediante funciones específicas, las cuales se eligen a conveniencia de acuerdo al problema que se desea resolver, se denominan funciones de membresía.

En la figura 24 se muestran las características esenciales de una función de membresía.

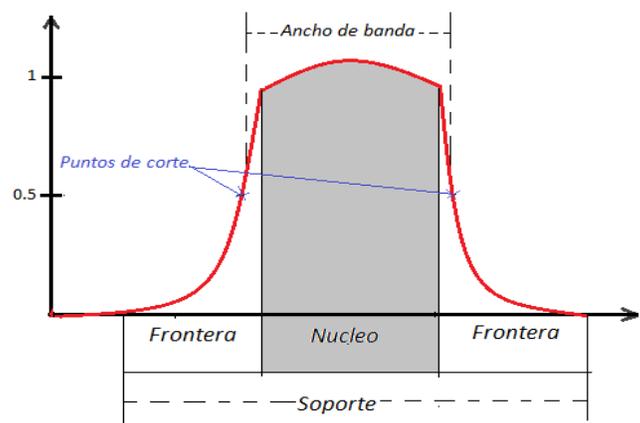


Figura 24. Características de una función de membresía, tomado de [39].

2.7.7 Núcleo

El núcleo es el conjunto de valores en el universo de discurso que posee mayor membresía, es decir su membresía es igual a 1.

2.7.8 Fronteras

Las fronteras son aquellos valores de la función de membresía que toman valores entre 0 y 1.

2.7.9 Soporte

Al unir el núcleo con las fronteras se forma el soporte el cual está formado por todos los valores en el universo discurso mayores a cero.

2.7.9.1 Puntos de cruce

Los puntos de cruce son los elementos en el universo discurso que tienen una membresía igual a 0.5, para el caso de la figura 24 son 2.

2.7.9.2 Ancho de banda

El ancho de banda es el valor absoluto de la diferencia entre los dos puntos de cruce.

2.7.9.3 Tipos de funciones de membresía

A continuación, se dará un breve repaso a las funciones de membresía típicas y sus características.

2.7.9.4 Función triangular

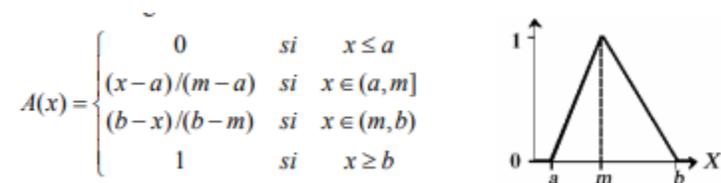


Figura 25. Función triangular, tomado de [40]

La función triangular tiene su primera frontera esta entre “a” y “m”, su segunda frontera esta entre “m” y “b” y su núcleo “m” es igual a 1 como se ve en la figura 25.

2.7.9.5 Función trapezoidal

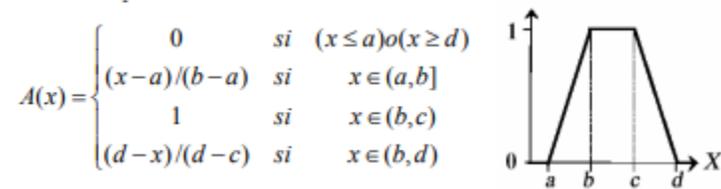


Figura 26. Función trapezoidal, tomado de [40]

La función trapezoidal tiene un núcleo que está entre “b” y “c”, su primera frontera está entre “a” y “b”, la segunda está entre “c” y “d” como se ve en la figura 26.

2.7.9.6 Función sigmoide

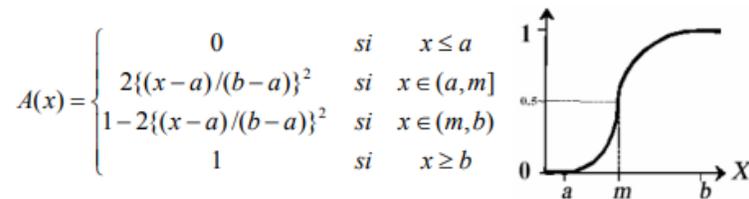


Figura 27. Función S, tomado de [40]

La función forma S es una función abierta, tiene su primera frontera entre “a” y “m”, su segunda frontera entre “m” y “b” y su núcleo está dado por “m” como se ve en la figura 27.

2.7.9.7 Función gaussiana

$$f(x; \sigma, x_0) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_0}{\sigma} \right)^2}$$

Ecuación 4 función gaussiana

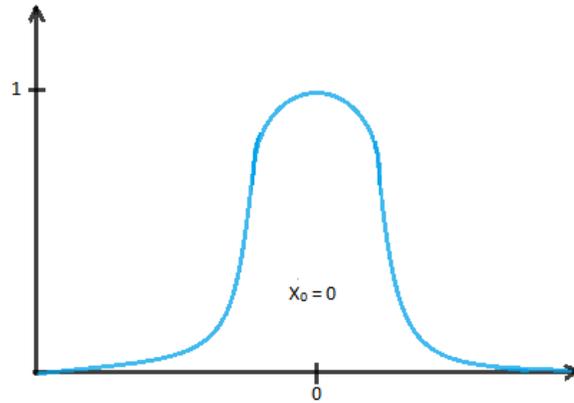


Figura 28. Función campana gaussiana, tomado de [41].

La función gaussiana se expresa matemáticamente como se ve en la ecuación 4, donde sigma (σ) representa el ancho de la función y x_0 determina la posición de la función. La figura 28 ilustra su forma gráfica.

2.7.9.8 Fusificación

La fusificación calcula un valor de membresía para los conjuntos difusos definidos por alguna variable de entrada.

2.7.9.9 Reglas de control

Una vez definidas las funciones de membresía con sus términos lingüísticos correspondientes, se procede a crear las reglas de control, a través de estas reglas el sistema difuso guarda el conocimiento lingüístico que le permite solucionar el problema para el que fue diseñado, el número de reglas está relacionado con el número de variables lingüísticas de entrada y salida creadas, por ejemplo, si el operador creó 5 variables lingüísticas para cada variable de entrada y salida, tendría 25 combinaciones posibles, las cuales puede utilizar según sus necesidades o a conveniencia. Estas reglas son de la forma “SI-ENTONCES”, retomando el ejemplo del voltaje de un motor se tendrían las siguientes reglas:

SI el error es negativo grande ENTONCES el voltaje es negativo grande.

SI el error es negativo pequeño ENTONCES el voltaje es negativo pequeño.

SI el error es cero ENTONCES el voltaje es cero.

SI el error es positivo grande ENTONCES el voltaje es positivo grande.

SI el error es positivo pequeño ENTONCES el voltaje es positivo pequeño.

2.7.9.9.1 Defusificación

Después de que el sistema difuso evalúa las reglas de inferencia y realiza cálculos internamente, el controlador obtiene una respuesta la cual es un único valor escalar, a ese proceso se le denomina defusificación.

2.7.9.9.2 Métodos de inferencia

Los métodos de inferencia nos permiten sintetizar las variables lingüísticas y reglas del controlador difuso para así obtener una variable de salida que sea medible y comparada con el error, existen diferentes métodos de inferencia para diseñar controladores difusos, sin embargo, el principal es el método de Mamdani ya que los demás métodos se derivan de él, por esta razón se usara como ejemplo.

2.7.9.9.3 Mamdani

A continuación, se explicará de manera gráfica el método de inferencia de Mamdani:

La ecuación 5 representa la expresión matemática del controlador de Mamdani, donde A_1 , A_2 , B_1 , B_2 son antecedentes, C_1 y C_2 son consecuentes, x_0 y y_0 son las variables de entrada, c' es el conjunto de salida.

$$\begin{aligned}\mu_{C'_1}(z) &= \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0) \wedge \mu_{C_1}(z) \\ \mu_{C'_2}(z) &= \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0) \wedge \mu_{C_2}(z) \\ \mu_{C'}(z) &= \mu_{C'_1}(z) \vee \mu_{C'_2}(z) \vee \dots\end{aligned}$$

Ecuación 5 Expresión matemática para el método de inferencia Mamdani

El primer paso para diseñar el controlador Mamdani es fusificar los valores de las variables de entrada x_0 y y_0 en A_1 , A_2 , B_1 , B_2 como se ve en la figura 29.

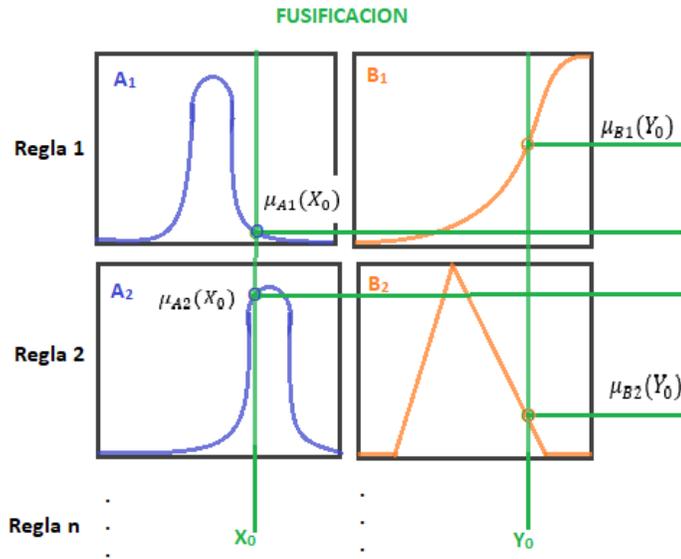


Figura 29. fusificacion de las variables de entrada, tomado de [42].

Para cada una de las reglas solo pasaran los valores mínimos de fusificacion, es decir A_1 y B_2 , con base a estos valores se deben cortar las funciones de los conjuntos de salida C_1 y C_2 a la altura de los valores mínimos de fusificacion, como se ve en las gráficas resaltadas en color amarillo de la figura 30.

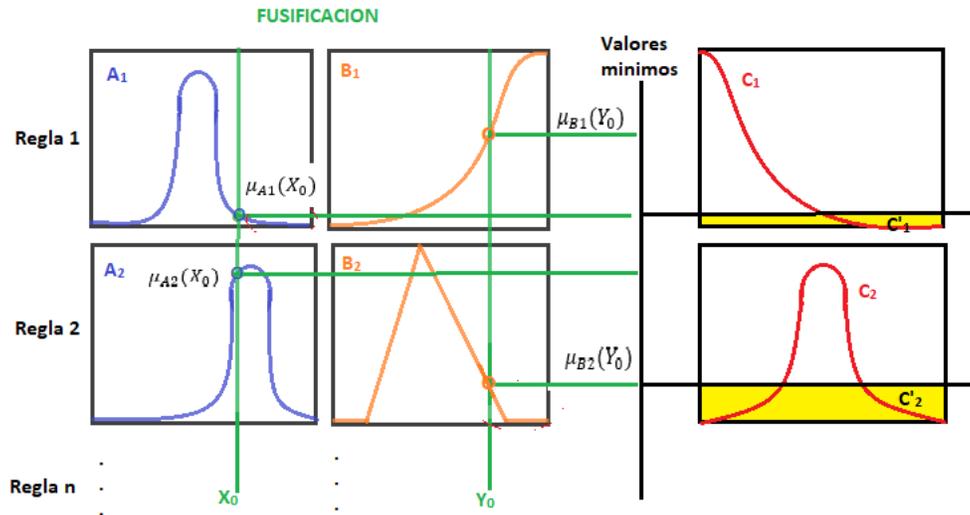


Figura 30. Valores mínimos para cada función de membresía, tomado de [42].

Una vez cortadas las dos funciones (C_1 y C_2) se obtienen dos nuevos conjuntos, C'_1 y C'_2 , los cuales deberán unirse formando una única función como se ve en la figura 31. C' es la función de membresía del conjunto de salida incorporando todas las reglas difusas.

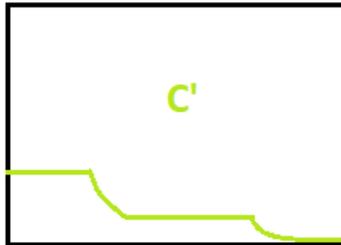


Figura 31. Conjunto resultante tras unir C'_1 y C'_2 , tomado de [42].

Para finalizar el proceso se debe defusificar el conjunto de salida C' para así obtener un único valor escalar que será utilizado como acción de control, los métodos de defusificación se verán a continuación.

2.7.9.4 Centroide o centro de masa

Este método de defusificación considera a la función de membresía como una función de distribución de masa, para lo cual se debe encontrar el centro de masa haciendo uso de la siguiente ecuación (ecuación 6) donde:

m_i es la distribución de masas.

y_i es la distancia.

M masa total.

$$y_{CM} = \frac{\sum m_i y_i}{M}$$

Ecuación 6 centroide, método de defusificación

2.7.9.5 Bisectriz

Para este método se debe hallar un valor que divida el área bajo la curva de la función en partes iguales, el valor y_0 que se encuentra en la mitad será la salida del controlador, como se ve en la figura 32.

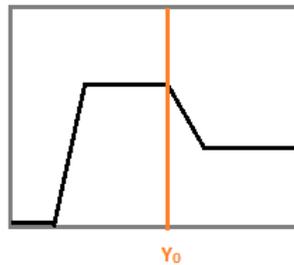


Figura 32. Representación gráfica de la bisectriz, tomado de [43].

2.7.9.6 Máximo central

Para este método se debe hallar el intervalo donde se encuentra el máximo de la función como se ve en la figura 33, una vez hallado se realiza un promedio de todos los valores del intervalo para así obtener la salida del controlador.

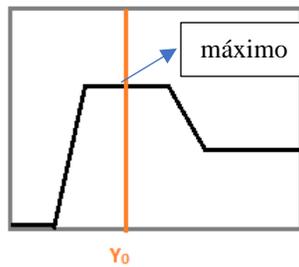


Figura 33. Representación gráfica del máximo central, tomado de [43].

2.7.9.7 Máximo pequeño

En este método al igual que el máximo central se halla el intervalo de valores máximos de la función, pero la diferencia radica en que se toma el menor valor del intervalo como salida del controlador, tal como se ve en la figura 34.

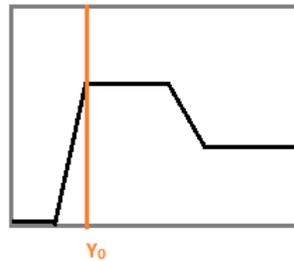


Figura 34. Representación gráfica del máximo pequeño, tomado de [43].

2.7.9.8 Máximo grande

En este método al igual que el máximo central se halla el intervalo de valores máximos de la función, pero la diferencia radica en que se toma el mayor valor del intervalo como salida del controlador, tal como se ve en la figura 35.

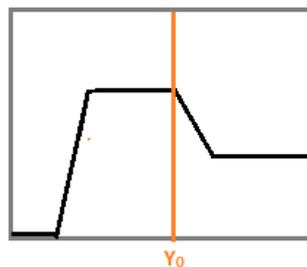


Figura 35. Representación gráfica del máximo grande, tomado de [43].

Una vez defusificado el conjunto de salida C' usando cualquiera de los métodos anteriormente descritos, se obtiene un valor Z_0 como se ve en la figura 36, el cual será la salida del controlador difuso.

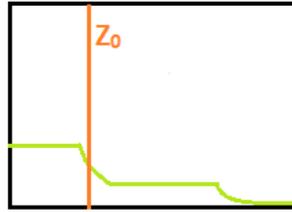


Figura 36. defusificación para obtener la salida, tomado de [43].

2.8 PID

El controlador proporcional integral derivativo (PID) es un mecanismo de control realimentado usado en diferentes procesos, en el control PID ingresa una señal de error la cual se consigue restando la salida deseada menos la salida obtenida dando como resultado una señal de entrada para el sistema que se apetece controlar.

El PID está compuesto por tres acciones de control, la proporcional, la integral y la derivativa como se ve en la figura 37.

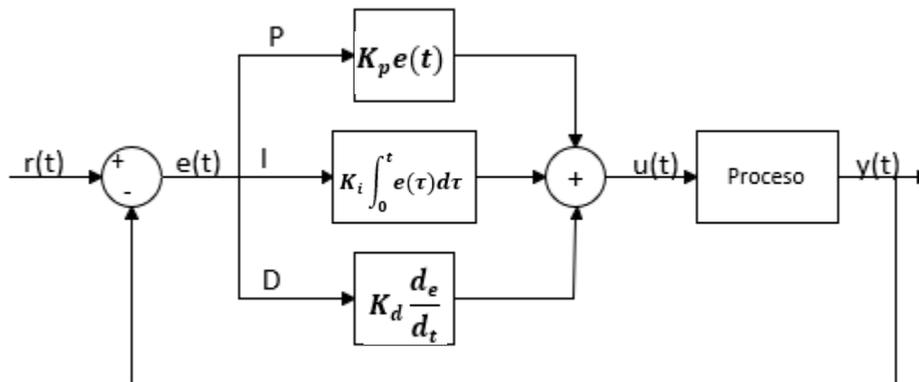


Figura 37 diagrama de bloques estándar de un controlador PID, diseño propio.

A continuación, se describirán cada uno de los componentes del controlador PID junto a sus características principales.

2.8.1 La acción de control proporcional P

Este controlador calcula el valor proporcional del error actual existente en el proceso, el diagrama de la figura 38 representa un proceso donde únicamente se aplica la acción de control proporcional.

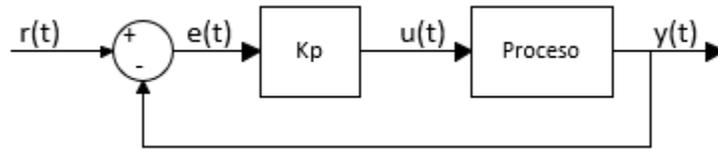


Figura 38 diagrama bloques proporcional, tomado de [44].

La componente proporcional se representa por medio de la ecuación 7:

$$u(t) = K_p e(t)$$

$$u(t) = K_p (r(t) - y(t))$$

Ecuación 7 componente proporcional

- K_p es la ganancia proporcional o valor de sintonización.
- $e(t)$ es el error.
- $e(t) = r(t) - y(t)$ el error es la diferencia entre el *setpoint* y la salida.
- t es el tiempo actual.

Para explicar de manera practica cómo funciona el controlador proporcional se tomará el ejemplo de un proceso de nivel como se ve en la figura 39, en el cual se debe hacer la apertura y cierre de una válvula neumática para realizar el llenado de un tanque hasta alcanzar una referencia, la válvula de salida a_s es una perturbación, en este caso se considerará siempre abierta.

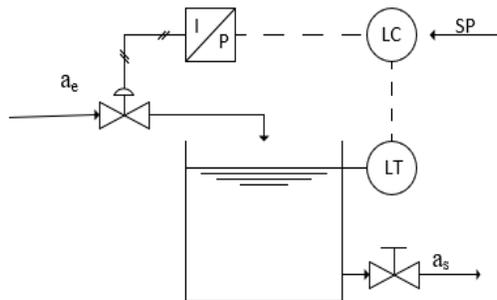


Figura 39, proceso de nivel, tomado de [44].

Aplicando la ecuación 7 al sistema de nivel de un tanque obtenemos:

$$a_e = K_p e_H$$
$$a_e = K_p (H_r - H)$$

Ecuación 8 componente proporcional para un proceso de nivel

Donde:

a_e : abertura de la válvula.

H_r : referencia o *setpoint*.

H : nivel actual.

2.8.2 Banda proporcional

La banda proporcional indica cuanta acción se tiene con el controlador proporcional para influir durante un proceso determinado, para este ejemplo la acción de control se basa en abrir o cerrar la válvula a_e , por esta razón en la figura 40 se muestra una gráfica que va de 0 a 100%.

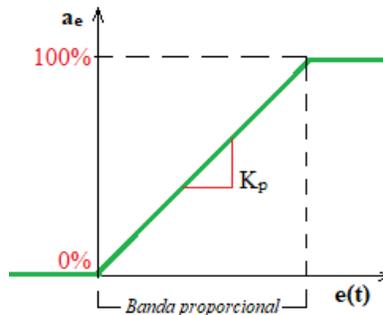


Figura 40 banda proporcional, tomado de [44].

La banda proporcional está representada por la ecuación 9 donde BP es inversamente proporcional a la ganancia K_p , a su vez K_p define la pendiente de la banda proporcional, entre más inclinada este la pendiente, más rápida será la acción de control, en otras palabras, la válvula se abrirá y cerrará rápidamente, lo cual no es recomendable ya que puede afectar el mecanismo del dispositivo por su rápida acción.

$$BP = \frac{100\%}{K_p}$$

Ecuación 9, banda proporcional

Todos los sistemas dinámicos a los cuales se les desea implementar un controlador, ya sea proporcional, integral o derivativo necesitan de un modelo matemático que los represente. Para este ejemplo la ecuación 10 representa la función de transferencia del sistema de nivel.

$$h = \frac{K}{\tau s + 1} a_e$$

Ecuación 10, ejemplo modelo matemático de nivel

Si se considera que el nivel del tanque está en estado estacionario se obtiene la siguiente función de transferencia en lazo cerrado:

$$T_{ss} = \frac{K_p K}{1 + K_p K}$$

Ecuación 11, ejemplo modelo matemático en estado estacionario

Para que el controlador proporcional pueda llegar a la referencia, T_{ss} debe ser aproximadamente uno, lo cual es imposible teniendo en cuenta la forma de la ecuación 11, sin embargo, se podría incrementar el valor de la ganancia K_p exponencialmente hasta lograr que la función en lazo cerrado se aproxime a uno, pero esto no es recomendable en la práctica.

2.8.3 BIAS

El bias es un valor que se ingresa manualmente en el controlador con la finalidad de alcanzar la referencia y eliminar el error en estado estacionario, la ecuación 12 representa el Bias.

$$\mathbf{u(t) = K_p(r(t) - y(t)) + Bias}$$

Ecuación 12, componente proporcional + Bias

Al incluir un Bias se desplaza la pendiente de la banda proporcional hacia la izquierda, lo cual implica que la función ya no inicia en cero sino en el valor del Bias como se ve en la figura 41.

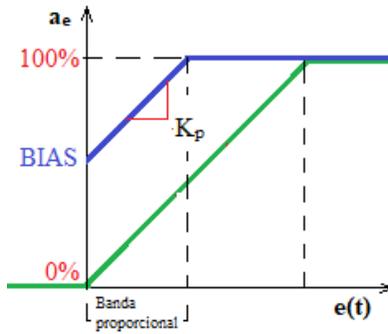


Figura 41, representación gráfica del Bias, tomado de [44].

En conclusión, se puede decir que el control proporcional posee las siguientes características:

- Permite acercar el sistema dinámico a su *setpoint* sin llegar a él.
- Aumenta la velocidad del sistema.
- Elimina el error en estado estacionario mediante el BIAS.

2.8.4 La acción de control integral I

Para explicar de manera práctica el funcionamiento del control integral se retomará el ejemplo de la sección 2.8.1 donde se habla de un proceso de nivel en un tanque, pero en este caso el elemento final de control será una válvula electrónica, la cual tiene en su interior un motor y un motorreductor.

El diagrama de bloques que representa este sistema se ve en la figura 42, donde:

$e(t)$: error.

$u(t)$: velocidad del motor.

$p(t)$: posición motorreductor.

$a(t)$: abertura de la válvula.

$v(t)$: caudal de entrada al tanque.

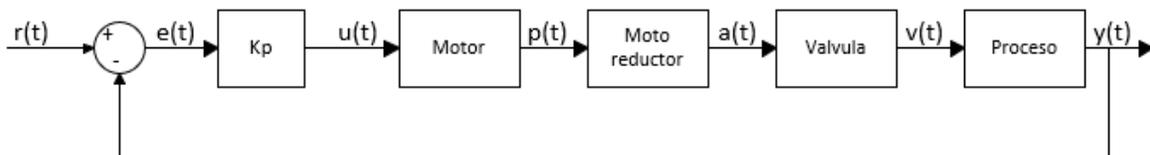


Figura 42, diagrama de bloques de un proceso de nivel con válvula electrónica, tomado de [45].

En la sección 2.8.3 se vio como la acción de control proporcional es capaz de eliminar el error en estado estacionario mediante el BIAS, sin embargo, este método varía dependiendo del estado estacionario donde se quiera colocar el proceso, por lo que es necesario tener un BIAS automático.

La inclusión del motor y moto reductor implica tener una salida diferente a la referencia, por lo tanto el error es diferente de cero, cuando el error es diferente de cero se multiplica por la acción proporcional K_p generando una acción de control que para este caso es la inyección de voltaje hacia el motor, al hacer esto todo el sistema interno de la válvula electrónica (motor y moto reductor) se pone en marcha como se ve en la figura 43, de esa manera se abre la válvula permitiendo el flujo del líquido en el tanque con el objetivo de que la salida alcance a la referencia.

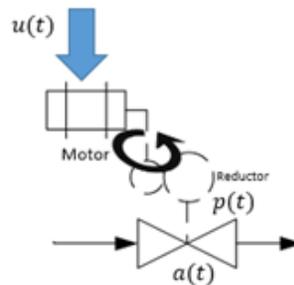


Figura 43, diagrama válvula electrónica, tomado de [45].

Cuando la salida es igual a la referencia se tendrá un error igual a cero, por lo tanto, no habrá inyección de voltaje y el motor dejará de girar, sin embargo, el motorreductor mantendrá la posición de abertura de la válvula llegando así a un punto de equilibrio.

La acción de control integral en un sistema de control PID se comporta como una acumulación de datos del error en el tiempo pasado, en la figura 44 se puede apreciar la acción de control integral, donde en cada tiempo (t) se va midiendo el área bajo la curva y a su vez se almacena en memoria a medida que avanza el tiempo, cada vez que se integra el proceso el sistema se acerca más a su *setpoint*, sin embargo esta tarea puede llegar a ser lenta, por lo tanto se debe adiciona una ganancia K_i la cual acelera o suaviza la respuesta del controlador.

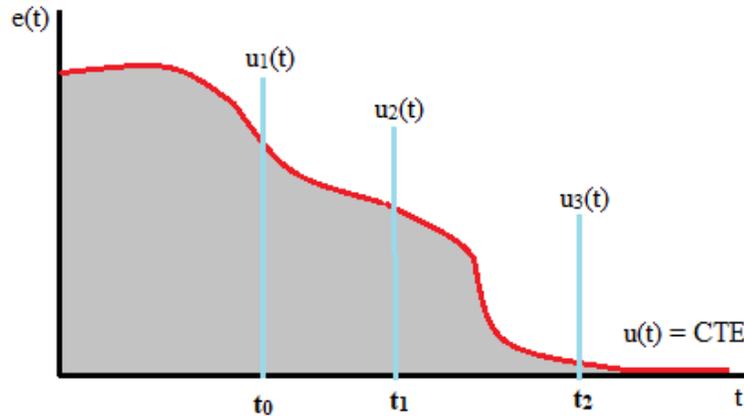


Figura 44 representación gráfica de la acción de control integral, tomado de [45].

La componente integral se representa en definitiva como se ve en la ecuación 13:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Ecuación 13 componente integral.

- K_i representa la ganancia integral.
- τ es la variable de integración, toma el tiempo desde el instante 0 hasta el instante actual t .

En conclusión, la acción de control integral en un controlador PID permite:

- Mantener el sistema en equilibrio sobre una referencia constante.
- Evita que el operador tenga que ajustar constantemente el BIAS del controlador.

2.8.5 La acción de control derivativa D

La componente derivativa se representa por medio de la ecuación 14:

$$D_{sal} = K_d \frac{d_e}{d_t}$$

Ecuación 14 componente derivativo

- K_d es la ganancia derivativa.
- t es el tiempo presente.

La componente derivativa en un sistema de control PID se caracteriza por anticipar los comportamientos futuros de la señal de error recibida, como su nombre lo indica esta predicción se calcula usando la derivada del error.

En la gráfica de la figura 45 se ve como la acción de control derivativa traza una recta tangente en un instante de tiempo actual (t_0) prediciendo de esa manera el posible comportamiento del error.

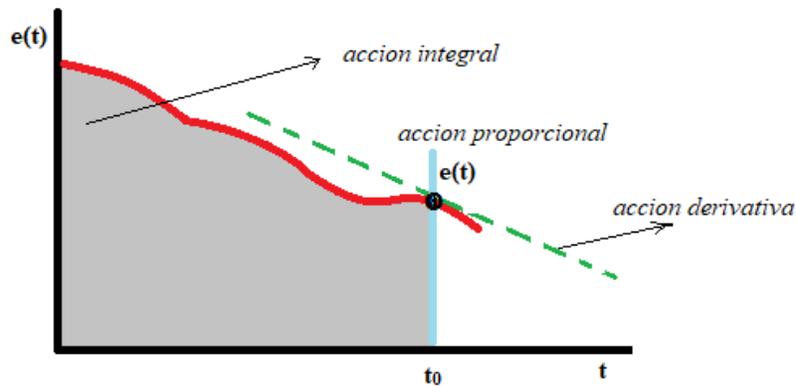


Figura 45 representación gráfica de la acción de control derivativa, tomado de [46]

2.8.6 Ventajas y desventajas

La acción derivativa es útil cuando se desea anticipar un efecto que pueda tener el sistema en el futuro.

Si la acción derivativa es grande implica una anticipación del comportamiento del error en un futuro lejano, por lo tanto, su predicción será errónea causando inestabilidad al sistema.

Si la acción derivativa es pequeña indica una anticipación al error en un futuro muy corto, lo cual no beneficia ni perjudica al sistema, en otras palabras, no se tiene un efecto significativo.

Cuando se tiene un controlador con las tres componentes (PID) juntas, es posible aumentar su respuesta incrementando la ganancia proporcional y disminuyendo la constante integral.

Finalmente uniendo las tres componentes PID se obtiene la siguiente ecuación:

$$K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d_e}{d_t}$$

Ecuación 15. suma de las componentes PID

CAPITULO III: DISEÑO Y DESARROLLO DE LA PLATAFORMA TIPO DRON MULTI ROTOR.

En este capítulo se abordarán los siguientes temas: selección de elementos mecánicos, herramientas de software, diseño de firmware, esquemas de control, descripción del hardware a utilizar, definición del diagrama de bloques del sistema, funcionamiento del prototipo y finalmente se establecerán los requerimientos iniciales o alcances del presente proyecto.

3.1 SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SOFTWARE Y DESCRIPCION DE ELEMENTOS ELECTRONICOS, MECANICOS

Antes de comenzar con las etapas de implementación - desarrollo del algoritmo y ensamblaje de la estructura se anteponen los requerimientos del proyecto que ayudaran a determinar qué elementos tanto electrónicos, mecánicos y de software satisfacen los objetivos planteados inicialmente para desarrollar el prototipo.

La selección y descripción de estos elementos se dividirá en tres etapas; selección de herramientas de software, descripción de dispositivos electrónicos y elementos mecánicos.

3.1.1 Selección de herramientas de software

Con base a los objetivos planteados en el capítulo 1 se hace necesario seleccionar diferentes tipos de software que tengan las siguientes propiedades:

1. Software que integre múltiples herramientas que faciliten el desarrollo del algoritmo.

2. Software que integre un conjunto de herramientas que faciliten al usuario manipular las diversas etapas involucradas en el proceso de diseño para sistemas de inferencia basados en lógica difusa, desde su descripción inicial hasta su implementación final.

A continuación, se realizarán dos indagaciones, una para elegir el software para desarrollar el algoritmo de control y otra para seleccionar el software para implementar el control difuso.

3.1.2 Selección del software para desarrollar la codificación del algoritmo

El tipo de algoritmo a desarrollar será para sistemas electrónicos embebidos y actualmente existen diferentes tipos de software que ofrecen un entorno para hacerlo y posteriormente embeberlo. Cabe destacar que la mayoría de las marcas o empresa que brindan un programa de computadora para el desarrollo del algoritmo también ofrecen el sistema embebido o microcontrolador, por tal motivo cabe la posibilidad que al elegir la herramienta de software indirectamente se elige la marca del microcontrolador.

Con el fin de garantizar la viabilidad y calidad del algoritmo para el proyecto, se tuvo en consideración los siguientes criterios.

1. **Interfaces dinámicas:** se puede entender que tenga una interfaz amigable que sea fácil de usar con el fin de agilizar el trabajo.
2. **Ergonomía:** que no haya necesidad de complejos procesos de instalación o de uso.
3. **Compatibilidad:** que se pueda ejecutar en diferentes sistemas operativos ya sea Windows, macOS, Linux.
4. **Documentación:** se refiere a que haya una amplia comunidad que aporte continuamente preguntas y soluciones para desarrollar, explicar y profundizar conocimientos alrededor de esta herramienta de software.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores surgieron como posibles candidatos los programas; ARDUINO IDE, STM32CubeIDE y KEIL μ VISION 5. Finalmente, para seleccionar uno de estos programas se tendrán en cuenta los siguientes factores técnicos que serán importantes para enfocar la decisión.

1. **Desarrollo de código para microcontroladores tipo ARM 32bits:** software que soporte el desarrollo de código para microcontroladores de arquitectura ARM.

2. **Depuración de código para microcontroladores “*debugger*”:** Es un proceso donde se hace posible identificar y corregir errores de programación mediante el seguimiento de la ejecución del programa, prestando los valores de las variables y direcciones de memoria.
3. **Configuración grafica para periféricos:** Se puede caracterizar como una herramienta integrada que permite la configuración de los periféricos del microcontrolador mediante selección de gráficos, para así generar código C partiendo de la configuración que haya seleccionado el usuario.
4. **Ejecución de sistemas operativos en tiempo real o RTOS:** RTOS es un método de programación que tiene la capacidad de ejecutar múltiples tareas simultáneamente.
5. **Software libre:** Para este caso solo interesa que los creadores de este programa permitan desarrollar y distribuir código sin pago alguno.

En la tabla 3 se pueden analizar los factores técnicos que permitirán la elección de uno de los programas candidatos.

Descripción de símbolos ✓ Cumple con el factor ✗ Cumple, pero necesita de requerimientos adicionales X No cumple con el factor			
Factor de comparación			
F1: Desarrollo de código para microcontroladores tipo ARM 32bits	✓	✓	✓
F2: Depuración de código para microcontrolador	X	✓	✓
F3: Configuración grafica para periféricos	X	✓	✗

			Requiere otro software adicional
F4: Ejecución de sistemas operativos en tiempo real o RTOS	X Requiere de librerías adicionales	✓	✓
F5: Software libre	✓	✓	X

Tabla 3 factores técnicos para elegir el software de programación, diseño propio.

Con los resultados expuestos en la tabla 3 se puede concluir que la herramienta de desarrollo de software escogida es el programa STM32CubeIDE, puesto a que cumple todos los requerimientos establecidos. Para este caso el objetivo es que los estudiantes puedan conocer una herramienta de software que integre diversas funcionalidades para que así les permita agilizar el trabajo y reducir el tiempo en la generación del proyecto al momento de ejecutar las prácticas, lo cual es el principal objetivo de este trabajo de grado.

3.1.3 Selección de software para el diseño de sistemas de inferencia basados en lógica difusa.

En esta sección se investigarán distintos tipos de software con el fin de seleccionar uno de ellos que permitan realizar el diseño e implementación del controlador difuso para el cuadricóptero.

Con el fin de garantizar la viabilidad del proyecto se tuvieron en cuenta los siguientes criterios.

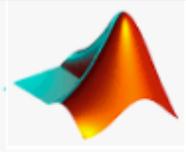
1. **Interfases dinámicas:** sinónimo de interfaces amigables, atractivas y que sean fáciles de usar a fin de agilizar el trabajo.
2. **Consistencia:** gravita en la uniformidad en apariencia, colocación y comportamiento en las actividades de diseño.

3. **Estética:** busca que los elementos de la interfaz gráfica sean agradables a la vista.

Partiendo de los criterios expuestos anteriormente surgen como posibles herramientas de software los programas, Matlab Simulink, labview, Xfuzzy, para considerar una de ellas se tendrá en cuenta los siguientes parámetros técnicos que orientaran la decisión, los cuales se presentaran a continuación.

- **Síntesis a C:** Que tenga la capacidad de sintetizar el diseño del controlador difuso para realizar la compilación a lenguaje C.
- **Software libre:** Son programas informáticos que le dan al usuario, el acceso al código fuente para que se pueda copiar, modificar, distribuirlo libremente.
- **Entorno académico:** Puesto que este proyecto se encuentra dentro de proyectos investigativos se precisa que el software sea popular para desarrollo de diferentes practicas típicas en los procesos formativos.
- **Visualización de gráficos interactivos:** Se presenta visualización de datos y comunicación de resultados en dos y tres dimensiones.
- **Velocidad y rendimiento:** se refiere al tiempo en el que se ejecuta el código.

En la siguiente tabla comparativa (ver Tabla 4) se presentan un análisis de los factores técnicos que permitirán seleccionar la herramienta de desarrollo más adecuada.

	✓ Cumple con el factor	✗ Cumple, pero necesita de requerimientos adicionales	X No cumple con el factor
Descripción de símbolos			
Factor de comparación			
F1: Síntesis a C	✓	X	✓
F2: Software libre			

	X	X	✓
F3: Entorno académico	✓	✓	✓
F4: Visualización de gráficos interactivos	✓	✓	✓ Los gráficos suministrados no son configurables a gusto del usuario.
F5: Velocidad y rendimiento	✓ Se ejecuta lentamente	X	✓

Tabla 4 elección del software para diseño del controlador fuzzy, diseño propio.

Según el análisis expuesto en la tabla 4 surgen como posibles candidatos los programas Matlab Simulink o Xfuzzy, sin embargo, uno de los factores técnicos más decisivos es el F5: Velocidad y rendimiento, puesto que entre menor sea el tiempo de ejecución del controlador difuso será más efectivo el control ejercido sobre el cuadricóptero.

Para determinar en qué tiempo se ejecuta el algoritmo de control diseñado en Matlab y Xfuzzy, se realizó un experimento utilizando los siguientes dispositivos electrónicos:

1. Microcontrolador STM32f103c8t6.
2. Osciloscopio de almacenamiento digital Tektronix TBS1032B.

3.1.4 Experimento.

Se realizó el mismo diseño de control difuso tanto para el programa Matlab y Xfuzzy, con el fin de compilar-embeber el algoritmo generado por estos dos softwares. La dinámica para medir el tiempo en que tarda en ejecutar el código generado tanto de Matlab y Xfuzzy se basa en alternar una salida digital del microcontrolador cada vez que se haya efectuado un ciclo máquina, de esta forma se pudo medir el tiempo de ejecución para luego comparar que algoritmo se ejecuta más rápido. Los resultados de este experimento se pueden observar en la tabla 5.

Microcontrolador	Frecuencia en CPU.	Tiempo de ejecución Matlab.	Tiempo de ejecución Xfuzzy.
STM32F103C8T6	72MHZ	38ms o 26.31HZ	940us o 1.064KHZ

Tabla 5 comparativa del tiempo de ejecución del algoritmo en Matlab vs Xfuzzy, diseño propio

A partir de los resultados expuestos en la tabla 4 y tabla 5 es posible analizar los resultados de la evaluación según los requerimientos técnicos establecidos para la selección del software. Para este caso el objetivo es diseñar e implementar un controlador difuso que se ejecute rápidamente en el microcontrolador elegido, además que el software en que se diseña el controlador le permita al usuario cambiar constantemente ciertos parámetros hasta encontrar el control óptimo para el cuadricóptero. Por estas razones se eligió el programa Xfuzzy ya que le permite al usuario cubrir las diversas etapas involucradas en el proceso de diseño para sistemas de inferencia basados en lógica difusa, desde su descripción inicial hasta su implementación final.

3.2 CONFIGURACION DEL PUERTO DE COMUNICACIÓN I2C

El sensor mpu6050 se comunica con el microcontrolador a través del puerto i2c, se debe tener en cuenta que al momento de leer los datos de este sensor se requiere un tiempo para solicitar las mediciones y cuando el sensor las tenga listas para enviarlas, proceder a leerlas. Es conveniente notar que si se solicitan las mediciones a una frecuencia más alta que el sensor pueda soportar, se producirían errores al leer estos datos. Por tanto, se realizó un experimento que trata de medir el tiempo en que tarda el sensor mpu6050 en enviar los datos al stm32f103c8t6.

3.2.1 Experimento:

Para estimar este tiempo solo se leerán los valores sin procesar (*RAW data*) del sensor mpu6050, cuando estos valores los haya leído el microcontrolador alternará una salida digital para medir esta frecuencia utilizando un osciloscopio. Los resultados de este experimento se muestran en la tabla 6.

Microcontrolador	Frecuencia en CPU (MHz)	Frecuencia de velocidad I2C (KHz)	Frecuencia de envío de mediciones (Hz)	Sensor
Stm32f103c8t6	72	100	333.3	MPU6050
Stm32f103c8t6	72	400	925.9	MPU6050

Tabla 6 tiempo de muestreo, diseño propio.

Como se puede observar en la tabla 6 solamente se experimentó con 2 velocidades de frecuencia en i2c, 100KHz que es la mínima que permite el microcontrolador y de 400KHz la máxima permitida. La frecuencia de envío de mediciones más alta y sin errores de transmisión se obtuvo configurando el puerto i2c a 400KHz, así que se dejó este valor. Ahora bien, sabiendo que a 925.9Hz o cada 1.08ms se reciben las mediciones del mpu6050 es posible establecer un tiempo de muestreo que no debe ser inferior a 1.08ms para leer este sensor.

3.3 TIEMPO DE EJECUCION

Para calcular el tiempo mínimo de ejecución para cada ciclo maquina se debe tener en cuenta el tiempo que tarda el microcontrolador en realizar todos los procesos que se le han designado. En la tabla 7 se muestran los procesos que realiza el MCU con su respectivo tiempo.

N°	Proceso	Tiempo de ejecución (us)
1	Cálculo de control difuso (ver capítulo 3.1.4)	940
2	Lectura del MPU6050 (ver capítulo 3.2.1)	1008
3	Lectura de NRF24L01	435
4	Cálculo de ángulos de inclinación, lectura ADC, filtro digital media móvil.	760

Tabla 7. Tiempo de ejecución de cada ciclo máquina, diseño propio.

Para obtener el tiempo de ejecución para los procesos 3 y 4 se hizo siguiendo la misma metodología que en los procesos 1, 2. El resultado de sumar todos estos tiempos es de 3143us, en otras palabras, el tiempo de ejecución no puede ser inferior a 3143us, por este motivo se estableció un valor de 4000us para así dejar un espacio o tiempo de 857us en que no se ejecuta ningún proceso por si se desea agregar otra tarea que ejecute el microcontrolador.

3.4 CALCULO DE ANGULOS DE INCLINACION

Para aplicar las acciones de control es necesario calcular los ángulos de inclinación en los ejes *pitch* y *roll* del cuadricóptero, para esto se utiliza el sensor mpu6050 ya que este tiene la capacidad de medir la velocidad angular en los ejes (x, y, z) y la aceleración lineal en los ejes (x, y, z) de un objeto en movimiento. Con estos valores es posible estimar los ángulos de inclinación en los ejes *pitch*, *roll* de la aeronave.

3.4.1 Calculo para los ángulos de inclinación mediante aceleraciones

Para estimar los ángulos de inclinación en los ejes *pitch*, *roll* mediante aceleraciones se siguieron los siguientes pasos; Inicialmente se calcula el módulo o magnitud (ver ecuación 16) utilizando las aceleraciones en los ejes (x, y, z).

$$|M_{acc}| = \sqrt{acc_x^2 + acc_y^2 + acc_z^2}$$

Ecuación 16 módulo de aceleraciones para estimar los ángulos pitch y roll.

Una vez se haya encontrado la magnitud es posible calcular el ángulo de inclinación para el eje *pitch* mediante la (ecuación 17) y para el eje *roll* con la (ecuación 18).

$$accPITCH = \sin^{-1}\left(\frac{acc_y}{|M_{acc}|}\right)$$

Ecuación 17 ángulo de inclinación pitch

$$accROLL = \sin^{-1}\left(\frac{acc_x}{|M_{acc}|}\right)$$

Ecuación 18 ángulo de inclinación roll

Donde:

- $|M_{acc}|$ es el módulo de las aceleraciones.
- acc_x aceleración respecto al eje x.
- acc_y aceleración respecto al eje y.
- acc_z aceleración respecto al eje z.
- $accROLL$ ángulo estimado en el eje *roll*.
- $accPITCH$ ángulo estimado en el eje *pitch*.

Sin embargo, esta estimación en los ejes *accPITCH*, *accROLL* que se calculó mediante aceleraciones es susceptible a las vibraciones. En la imagen 46 se observa el ruido producido por vibraciones que daña totalmente el cálculo de los ángulos

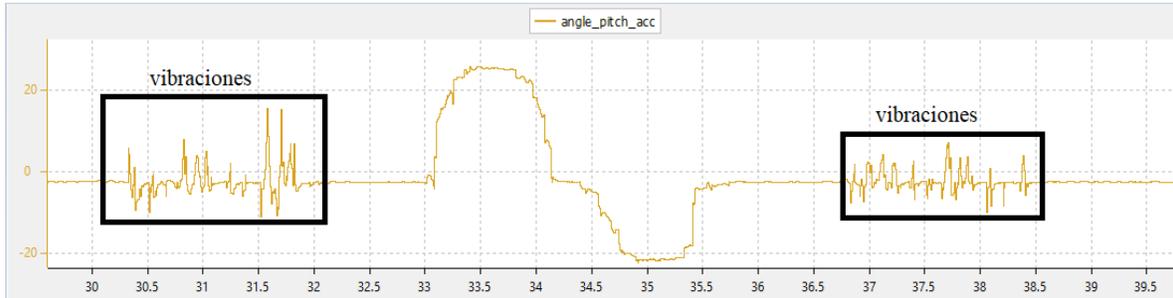


Figura 46 ruido en el ángulo pitch, diseño propio

3.4.2 Cálculo de los ángulos de inclinación mediante velocidad angular

Para calcular los ángulos en los ejes *pitch*, *roll* mediante la velocidad angular se siguieron los siguientes pasos:

1. Establecer la escala en el giroscopio del sensor mpu6050 a 500°/s. Con esta configuración la sensibilidad del bit menos significativo (LSB) en la lectura será de 65.5 LSB/°/s [47].
2. Cuando el sensor MPU6050 está en reposo la velocidad angular en los ejes (x, y, z) no es cero, estos valores son constantes y diferentes de cero. Por tanto, se debe hacer un promedio del valor para las velocidades angulares en (x, y, z) y después restar este promedio a la lectura del giroscopio en cada eje, así cuando el MPU6050 está en reposo la lectura del giroscopio en (x, y, z) será cercana a 0.

Teniendo en cuenta los puntos de la sección 3.4.2 es posible calcular los ángulos de inclinación mediante las ecuaciones 19 y 20.

$$pitch = vel_x \times \left(\frac{T_s}{65.5} \right)$$

Ecuación 19 ecuación ángulo pitch

$$roll = vel_y \times \left(\frac{T_s}{65.5} \right)$$

Ecuación 20 ecuación ángulo roll

Donde:

- $pitch$ es la posición angular en el eje (y).
- $roll$ es la posición angular en el eje (x).
- vel_y es la velocidad angular en el eje(y).
- vel_x es la velocidad angular en el eje(x).
- T_s es el tiempo de ejecución que se estableció a 4000us (ver sección 3.3).

La estimación de los ángulos $pitch$, $roll$ utilizando las ecuaciones 19, 20 es correcta solamente cuando se gira el sensor mpu6050 ya sea en el eje x o sobre el eje y, pero si se gira sobre ambos ejes se debe tener en cuenta la velocidad angular sobre el eje z. Al involucrar la rotación en el eje z se obtienen las ecuaciones 22, 23 utilizando los ángulos $pitch$, $roll$ de la ecuación 19, 20.

$$f_c = \left(\frac{T_s}{65.5}\right) \times \left(\frac{\pi}{180}\right)$$

Ecuación 21 escala a grados

$$gyroPITCH = pitch - \text{anguloROLL}(\text{sen}(vel_z \times f_c))$$

Ecuación 22 rotación eje z en pitch

$$gyroROLL = roll - \text{anguloPITCH}(\text{sen}(vel_z \times f_c))$$

Ecuación 23 rotación en eje z en roll

Donde:

- $gyroPITCH$ es el ángulo calculado en el eje pitch en grados.
- $gyroROLL$ es el ángulo calculado en el eje roll en grados.
- vel_z velocidad angular en el eje z.
- f_c factor de escala a grados.

El resultado que se obtuvo utilizando la ecuación 23 para calcular el ángulo de inclinación en el eje $roll$ se observan en la figura 47.

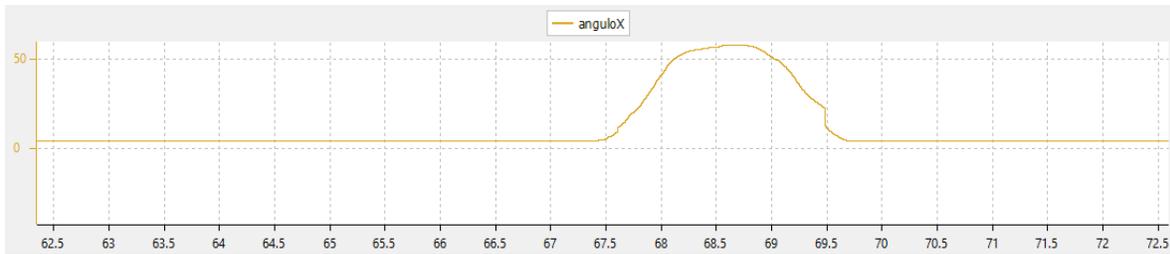


Figura 47 ángulo de inclinación en roll, diseño propio.

La estimación de los ángulos de inclinación utilizando las velocidades angulares les afecta muy poco las vibraciones a diferencia de del cálculo mediante aceleraciones. El problema que tiene este proceso es que al pasar el tiempo el ángulo se va desfasando puesto que el giroscopio del sensor MPU6050 al estar en reposo no entrega un valor de cero sino cercano, por tanto, esto produce un error que se acumula con el tiempo que desfasa el ángulo.

3.4.3 Filtro complementario

Con este filtro se calcula los ángulos de inclinación utilizando las estimaciones mediante aceleraciones y velocidades angulares. Se calculo estos ángulos utilizando los resultados de las ecuaciones 17, 18 (ver sección 3.4.1) y las ecuaciones 22, 23 (ver sección 3.4.2).

$$\text{anguloPITCH} = \text{gyroPITCH} \times 0.9996 + \text{accPITCH} \times 0.0004$$

Ecuación 24 calculo ángulo pitch mediante aceleraciones y velocidades angulares

$$\text{anguloROLL} = \text{gyroROLL} \times 0.9996 + \text{accROLL} \times 0.0004$$

Ecuación 25 calculo ángulo pitch mediante aceleraciones y velocidades angulares

Donde:

- *gyroPITCH* estimación del ángulo en *pitch* utilizando velocidades angulares.
- *gyroROLL* estimación del ángulo en *roll* utilizando velocidades angulares.
- *accPITCH* estimación del ángulo en *pitch* utilizando aceleraciones.
- *accROLL* estimación del ángulo en *roll* utilizando aceleraciones.

Mediante este filtro es posible eliminar el ruido generado por las vibraciones ya que el ángulo que aporta el método de las aceleraciones se multiplica por 0.0004 y el desfase producido por el método de las velocidades angulares afecta muy poco al ser multiplicado por 0.9996.

3.5 DESCRIPCIÓN Y ELECCION DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS Y DE POTENCIA.

El cuadricóptero está conformado electrónicamente por múltiples dispositivos que tienen funcionalidades específicas enfocadas a lograr el control de la aeronave. Ahora, en esta sección se describirán las características de los dispositivos electrónicos y de potencia que se utilizarán en este proyecto.

3.5.1 Dispositivos electrónicos.

Mediante la tabla 6 se nombrarán los dispositivos electrónicos necesarios para el desarrollo del cuadricóptero con sus respectivas funcionalidades.

N.º	Dispositivo electrónico	Propiedad o funcionalidad
1	Microcontrolador	Circuito integrado programable capaz de ejecutar órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales que cumplen una tarea en específico.
2	Variador de velocidad "ESC"	Dispositivo electrónico empleado para controlar la velocidad de una máquina, especialmente de motores eléctricos.
3	Sensor de unidad de medición inercia "IMU"	Dispositivo que es capaz de informar la velocidad, orientación y fuerzas gravitatorias de un aparato usando combinaciones de acelerómetros y giroscopios.
4	Transceptor	Dispositivo electrónico que puede ser utilizado como transmisor o receptor
5	Regulador de voltaje	Dispositivo electrónico diseñado para mantener un nivel de tensión constante o regulable.

Tabla 6 funcionalidad de cada dispositivo electrónico usado, diseño propio.

Con la finalidad de garantizar la viabilidad del proyecto se consideraron las siguientes características técnicas para la elección de estos dispositivos:

- Que todos los dispositivos electrónicos sean modulares, integrando dentro de sí lo necesario para usarlos, con la finalidad de reducir tiempo y complejidad en el diseño electrónico del proyecto.

- Las características técnicas consideradas para la elección de los dispositivos o módulos electrónicos se describen en la tabla 7.

N.º	Dispositivo electrónico	Características técnicas
1	Microcontrolador	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modularidad. ➤ Mínimo 4 salidas PWM de 16 bits ➤ Puerto I2C ➤ Puerto SPI ➤ Mínimo 2 temporizadores de 16bits ➤ Puerto USART ➤ funcionamiento entre 2.0 a 3.6 voltios. ➤ Controlador DMA
2	Variador de velocidad “ESC”	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modularidad ➤ Configurar mediante software el sentido de giro de los motores ➤ Corriente de operación mínimo 25A
3	Sensor de unidad de medición inercia “IMU”	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modularidad
4	Transceptor	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modularidad ➤ Velocidad de transmisión superior a 1Mbps ➤ Funcionamiento entre 1.9 a 3.6 voltios
5	Regulador de voltaje	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modularidad ➤ Regulador tipo conmutado DC-DC ➤ Corriente de salida 1A

Tabla 7 Características técnicas consideradas para elegir cada dispositivo electrónico, diseño propio.

Teniendo en cuenta las características técnicas de la tabla 7 se eligieron los siguientes módulos electrónicos:

1. Modulo blue Pill.

Este módulo de la figura 48 integra el microcontrolador STM32f103c8 y distribuye todas las entradas-salidas digitales, entradas analógicas, puertos de comunicación I2C, SPI, USART, USB del microcontrolador. Las características técnicas del MCU se describen en [48].

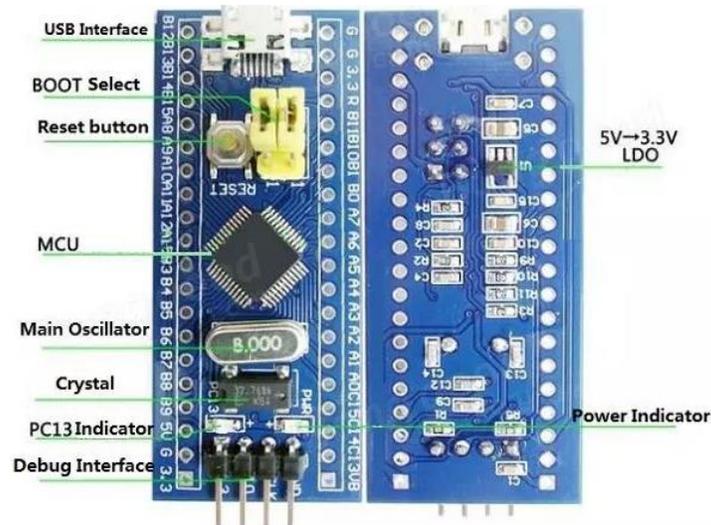


Figura 48. Módulo blue pill, tomado de [49]

El análisis de configuración para los pines de E/S del módulo Blue Pill STM32F103c8t6 se mencionan en la tabla 8.

Tipo	Nombre del pin	Función
Energía	1. 3,3v 2. 5v 3. GND	1. Voltaje de salida 2. Fuente de alimentación desde USB o una de fuente externa 3. Conexión a negativo
Pines analógicos	PA0-PA7, PB0-PB1	10 pines ADC de resolución de 12bits
Pines de E/S	PA0-PA15, PB0-PB15, PC13-PC15	37 pines de E/S de propósito general
Interrupciones externas	PA0-PA15, PB0-PB15, PC13-PC15	Pines de interrupción
Comunicación serial (USART)	TX1, RX1, TX2, RX2, TX3, RX3	Pines RTS, CTS USART
SPI	MISO0, MOSI0, SCK0, MISO1, MOSI1, SCK1, CS0, CS1	pines de 2 periféricos (Serial Peripheral Interface)
CAN	CAN0TX, CAN0RX	Pines del periférico (Controller Area Network)
PWM	PA0-PA3, PA6-PA10, PB0-PB1, PB6-PB9	15 pines de modulación por ancho de pulso

IC2	SCL1, SCL2, SDA1, SD2	Pines del periférico (Inter-Integrated Circuit)
Led	PC13	LED indicador

Tabla 8 análisis de los pines E/S del STM32F103C8, diseño propio

2. Variador de velocidad Racerstar Rev35A 4in1 ESC.

Las características de este variador de velocidad es que integra 4 ESC en 1, además de ser compatible con BLheli por el cual se pueden cambiar distintos parámetros configurables del ESC, uno de ellos es invertir el sentido de giro de los motores *brushless* mediante *software*. A continuación, se describen las características técnicas del ESC:

1. Soporta baterías Lipo entre 2 a 6S o (7,4v a 22.2v).
2. Corriente de 35A.
3. PEAK corriente de 40A por 10s.
4. Peso de 13g.
5. cuatro entradas PWM.
6. Incluye sensor de corriente[50].

El variador de velocidad viene configurado de la siguiente manera: las entradas IN1, IN2, IN3, IN4 controlan las velocidades de giro para las salidas; motor1, motor2, motor3, motor4 respectivamente, sin embargo, este orden puede ser cambiado mediante software. La salida CRNT entrega información con el fin de calcular la corriente, VBAT es la salida directamente tomada de la batería. En la figura 49 se observa el variador de velocidad.

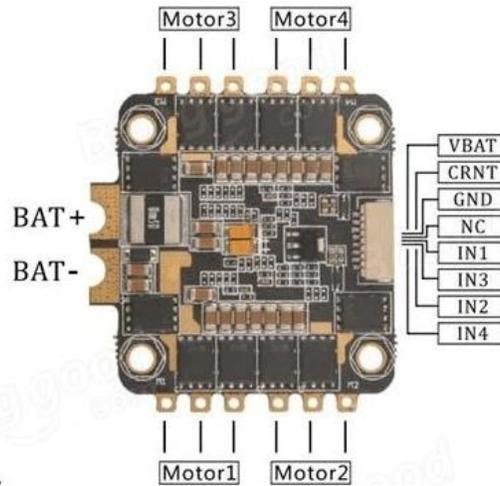


Figura 49, pines de salida del ESC RecerStar, tomado de [50].

3. Modulo GY 521 MPU-6050.

Este módulo integra el sensor MPU650 el cual es una unidad de medida inercial, es decir integra tanto acelerómetro como giroscopio, el voltaje de alimentación esta entre los 3.3v y 5v, funciona a través del protocolo de comunicación I2C. las características técnicas del sensor MPU6050 se describen en [47]. en la figura 50 se observa el módulo GY 521.

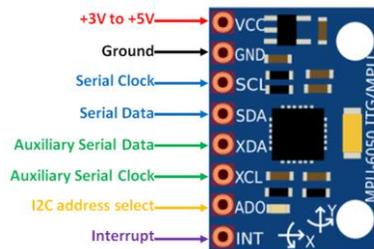


Figura 50 modulo GY-512, tomado de [51].

4. Modulo NRF24L01 transceptor.

Esta antena transceptora opera en la banda ISM de 2.4GHz y utiliza la modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana (GFSK) para la comunicación de datos. La velocidad de transferencia puede ser modificada entre los 250Kbps, 1Mbps, 2Mbps. Esta antena cuenta con un módulo de potencia que puede ser programable desde los 0 dBm, -6 dBm, -12 dBm o -18 dBm.

El consumo de corriente para una ganancia de 0dBm oscila entre los 12mah.

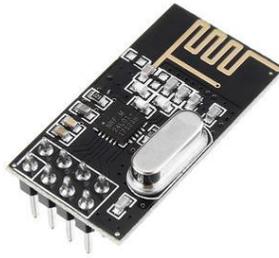


Figura 51 NRF24L01, tomado de [36]

El módulo NRF24L01 utiliza la interfaz de periféricos serial (SPI) y puede llegar hasta una velocidad máxima en transmisión y recepción de datos de 10 Mbps. todos los parámetros configurables como la potencia de salida, velocidad de transmisión, modo transmisor o receptor se configuran a través del protocolo SPI. A continuación, se describen las características de este módulo:

- Rango de frecuencia 2.4 GHz Banda ISM.
- Tasa máxima de datos aéreos 2 Mb/s.
- Formato de modulación GFSK.
- Max. Potencia de salida 0 dBm.
- Tensión de alimentación de funcionamiento 1,9 V a 3,6 V.
- Max. Corriente de operación 13.5mA.
- Min. Corriente (Modo de espera) 26 μ A.
- Entradas lógicas 5V Tolerante.
- Alcance de la comunicación 800m (línea de visión)[36].

5. Regulador de voltaje LM2596.

Este regulador (ver figura 52) es de tipo DC-DC Step Down y, permiten transformar un nivel de voltaje a otro de mayor o menor nivel. Los reguladores tipo DC-DC conmutados (*switching*) entregan un nivel de eficiencia energética superior al 80% por lo que es conveniente utilizarlos en proyectos de robótica móvil para así optimizar el consumo de energía puesto que la mayoría de estos funcionan con baterías.



Figura 52 Regulador de voltaje LM2596, tomado de [52].

A continuación, se nombrarán las características técnicas de este regulador[53].

- Voltaje de entrada: 4.5v a 40v DC.
- Voltaje de salida: 1.23v a 37v DC.
- Corriente de salida: max. 3A, 2.5A recomendado.
- Potencia de salida 25W.
- Eficiencia de conversión 92%.
- Dimensiones 43mm*21mm*13mm.

3.5.2 Módulo de potencia o batería.

Para alimentar a los dispositivos electrónicos y electromecánicos es necesario un módulo que suministre energía suficiente que permita a los motores girar las hélices para generar fuerza de sustentación con el propósito de elevar la aeronave. Las baterías utilizadas para este fin son de tipo “LiPo” (ver figura 53), puesto que, entregan gran cantidad de potencia en un periodo reducido de tiempo. Otro atributo de ser utilizadas para este fin es que son livianas haciéndolas ideales para aeromodelismo en comparación con las baterías de Niquel-cadmio. Para la selección de estas baterías hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:

- La intensidad de descarga constante (C).
- La capacidad de la batería (mAh).
- El voltaje de la batería (v).



Figura 53, batería LiPo, tomado de [54]

3.5.3 Corriente máxima en una batería.

Este parámetro es utilizado para identificar cual es la corriente máxima que pueda entregar la batería en un instante de tiempo dado sin sufrir daños. La expresión matemática utilizada para calcular dicha constante se define en la ecuación 26.

$$\text{Corrientemax} = Ct \times C$$

Ecuación 26 corriente máxima en batería

donde: *Corrientemax*: Capacidad de corriente máxima que puede suministra la batería (A), *Ct*: Intensidad de descarga constante.

3.5.4 Tiempo de vuelo.

Para calcular el tiempo de vuelo solamente se tiene en cuenta el consumo de potencia de los motores y no se incluye el consumo de la electrónica puesto que consume poca corriente. Se considera que una aeronave tipo cuadricóptero necesita un 50% del consumo máximo que pueda suministrar la batería para vuelos en horizontal, lateral, 20% para vuelos verticales o en punto fijo. Para calcular el tiempo de vuelo se utiliza la ecuación 27.

$$T = \frac{Cap * vol}{P_t}$$

Ecuación 27 tiempo de vuelo

donde: T : Tiempo estimado de vuelo (h), Cap : Capacidad de almacenamiento de la batería (mAh), P_t : Consumo total de los motores (W), vol : voltaje de la batería (v).

Teniendo en cuenta el consumo de los motores se eligió una batería de 3 celdas que sumadas dan un voltaje nominal de 11.1v y, su intensidad de descarga es de 30C, que a su vez suministra una corriente de 2200mah dando un tiempo de vuelo teórico de 14min. Utilizando la ecuación 16 se calculó la máxima intensidad de descarga para lapsos de tiempo entre 5 segundos, dando como resultado 66(A), que es suficiente para alimentar la electrónica y los motores de la aeronave que su máximo consumo ronda entre los 16(A).

3.6 DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS Y ELECTROMECAÑICOS

En contexto, conforme se mencionó en el capítulo anterior donde se describe y se eligen los componentes electrónicos, ahora en esta sección se mencionará que tipo de estructura será utilizada para albergar todos los componentes electrónicos elegidos. También se describirá que tipo de motores y hélices serán utilizados.

3.6.1 Chasis para cuadricóptero

En la estructura del cuadricóptero convergen todos los elementos tanto mecánicos como electrónicos, por tanto, debe estar diseñada de tal manera que permita fijar o sostener de forma segura los diversos elementos que integra la aeronave en cuestión.

El *frame* o chasis F330 integra dos plataformas en fibra de vidrio ya que este material es liviano y reduce las vibraciones producidas por los motores, además, con esta plataforma es posible colocar la electrónica y fijar firmemente 4 brazos de poliamida de nylon separados uno de otro a 90° dándole una forma en X. En la figura 54 se observa el *frame* F330 armado.



Figura 54 chasis F330, tomado de [55].

En la tabla 9 se observan las características del *frame* F330 que será utilizado en este proyecto.

Características del frame F330	
Distancia entre ejes	330mm
Peso del chasis	145g
Altura	36mm
Material	Fibra de vidrio y plástico resistente a golpes

Tabla 9 características del frame F330, diseño propio.

3.6.2 Motores Emax RS2205 2300kv.

Estos motores son de tipo *brushless* o sin escobillas, su función es propulsar las hélices del cuadricóptero para poder elevarse, se escogió un par de motores tipo CW y CCW ya que estos tienen una característica que las tuercas utilizadas para sujetar las hélices se fijan girándolas en contra del sentido de giro del motor, dando como resultado que sea más difícil que las hélices se aflojen por causa de la inercia que producen los motores al girar. En la figura 55 se observan los motores seleccionados y, que estos tienen tuercas de distintos colores que representan el sentido de giro de los motores (negro-CW, plateado-CCW).



Figura 55 motores Emax RS2205, tomado de [55].

Las especificaciones técnicas del motor Emax RS2205 2300kv se describirán a continuación:

- KV: 2300kv.
- Peso: Aprox. 1.06 oz con cables.

- Cable AWG: 20 CAE (AWG).
- Diámetro del estator: 0.866 in.
- Altura del estator: 0.197 in.
- Diámetro del eje: 0.118 in.
- Diámetro del motor: 1.094 in
- Altura del motor: 1.248 in.
- Rosca del eje del adaptador de propina: M5.
- Voltaje de entrada: 2S-4S (8.4 - 16.8v).
- KV2300 con HQ5045 BN máx. de empuje: 102.36 oz.

3.6.3 Hélices.

Para la elección de las hélices se realizó una investigación en proyectos relacionados sobre cuadricópteros como los siguientes: [56], [57], [58]. Esto con el propósito de saber qué tipo de *frame* y hélice utilizaban. Para este caso se enfocó buscar que hélice utilizan los *frames* f330. Pues en los documentos investigados se encontró la relación que la hélice tipo 8045 que significa 80 pulgadas de diámetro y 45 pulgadas de paso fueron implementadas en cuadricópteros con chasis f330.

Así que se eligieron 4 hélices 8045, un par tipo CW y otro CCW. En la figura 56 se observa las hélices.



Figura 56 Hélices 8045, diseño propio.

3.7 ESQUEMA DE CONTROL IMPLEMENTADO EN EL CUADRICÓPTERO

Una vez seleccionadas las herramientas de software, dispositivos electrónicos y dispositivos mecánicos que serán utilizados para desarrollar y posteriormente implementar el firmware que hará operativo el cuadricóptero se procede en esta sección a definir el esquema de control difuso. Para esto se dividirán en las siguientes etapas: definición de arquitectura de control, cálculo de error y cambio de error, definir variables lingüísticas, reglas difusas.

3.7.1 Arquitectura de control difuso.

El esquema de control difuso utiliza como entrada una referencia de velocidad en *grados/s* para los ejes pitch y roll del cuadricóptero, este parámetro también es utilizado para calcular el error y el cambio del error, las cuales serán las variables de entrada a convertir en valores difusos. En seguida se crean las reglas difusas mediante el método de Mamdani. Estas reglas deben ser descritas adecuadamente puesto que definen el resultado dependiendo de las condiciones dadas durante la etapa de fusificación y defusificación. En la figura 57 se observa el esquema de control difuso utilizado.

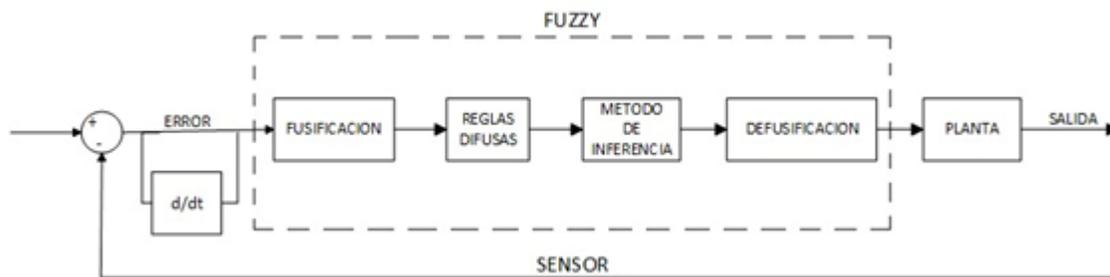


Figura 57 esquema de control difuso, diseño propio.

3.7.2 Cálculo del error

Como se puede observar en la figura 57 el controlador difuso tiene como parámetros de entrada las variables error y el cambio del error. La fórmula que se utilizó en el microcontrolador para calcular el error está dada por la ecuación 28:

$$E_{\alpha} = gyro_{\alpha} - \frac{(sp_{\alpha} - (\alpha * 30.30)) - 1000}{6}$$

Ecuación 28 cálculo del error – diseño propio.

Donde:

- E_{α} es el error con respecto a ángulo pitch.
- $gyro_{\alpha}$ es la velocidad angular respecto al eje pitch.
- α es el ángulo respecto al eje pitch.
- sp_{α} set point o referencia respecto al eje pitch.

En la tabla 10 se observa en que rangos operan las variables de la ecuación 18.

Variables	Rango mínimo	Rango medio	Rango máximo	Unidad de medición
E_{α}	-333	0	333	°/s
$gyro_{\alpha}$	-166	0	166	°/s
sp_{α}	0	1000	2000	°/s
α	-33	0	33	° grados

Tabla 10 rangos de operación de las variables en la ecuación del error, diseño propio.

Para calcular el cambio del error es necesario realizar una evaluación numérica de la derivada $\frac{dE_{\alpha}}{d(t)}$, que se representa mediante la ecuación 29.

$$\frac{dE_{\alpha}}{d(t)} \approx \frac{E_{\alpha(n)} - E_{\alpha(n-1)}}{Ts}$$

Ecuación 29 evaluación mediante derivada para encontrar el cambio del error

Donde:

- $E_{\alpha}(n)$ es la muestra actual del error.
- $E_{\alpha}(n - 1)$ es la muestra anterior del error.

- T_s es el tiempo de muestreo.

Cabe destacar que para calcular el error y el cambio del error para el ángulo roll también se utilizan las ecuaciones 28,29.

3.7.3 Variables de entrada y salida en el controlador.

Luego de calcular el error y el cambio del error que son parámetros de entrada para el bloque "control difuso" (ver figura 58 dibujo A, se procede a convertir estas variables a valores difusos como se detalla en la figura 58 dibujo B, allí se observa que el error y el cambio del error se conectan a un bloque que representa la fusificación utilizando el método de Mamdani y, que este a su vez tiene como parámetro de salida una variable denominada "PWM" que especifica que potencia se debe entregar a los motores según las condiciones que se hayan establecido dentro del bloque fusificación.

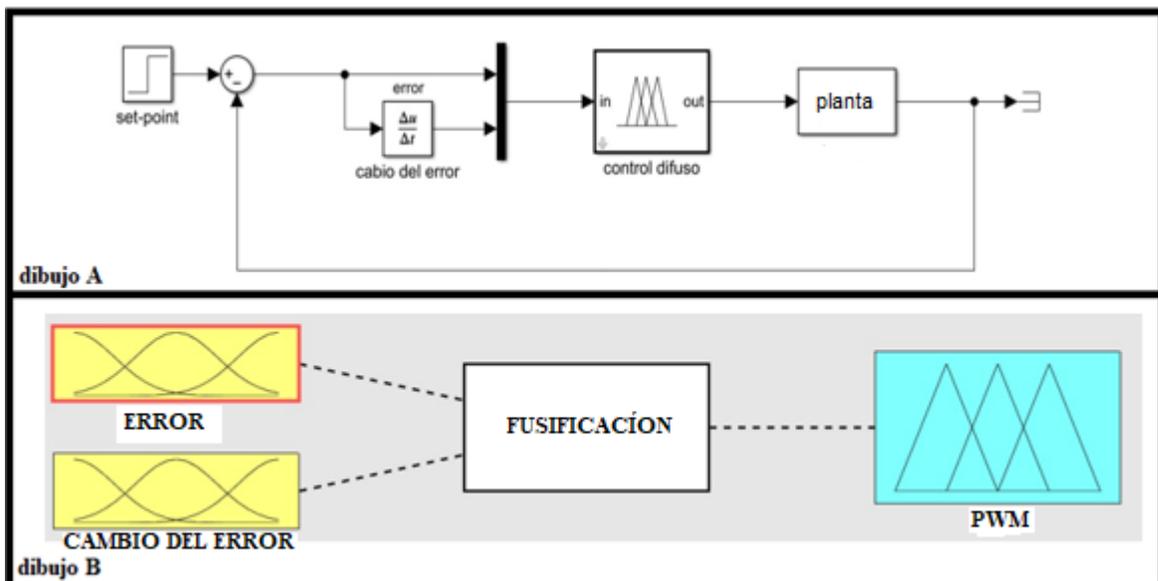


Figura 58, diagrama en bloques del controlador difuso, diseño propio.

3.7.4 Definición de parámetros del sistema de control difuso.

Para realizar la fusificación de las variables de entrada error y cambio del error es importante escoger que tipo de función de membresía se va a utilizar para este propósito. En este caso se optó por la función triangular, esta función como su nombre lo indica está formada por una pendiente positiva que es constante hasta llegar a 1, luego desciende de manera estable,

debido a su simplicidad matemática y alta manejabilidad se convierte en una de las funciones de pertenencia más utilizadas [59]. Otra de sus características es el uso en situaciones en las que se tiene un valor optimo central, el cual se va perdiendo conforme 1 se aleja de él [60]. En la figura 59 se observa cómo la función inicia en “a”, termina en “b” y su pico máximo es en “m”.

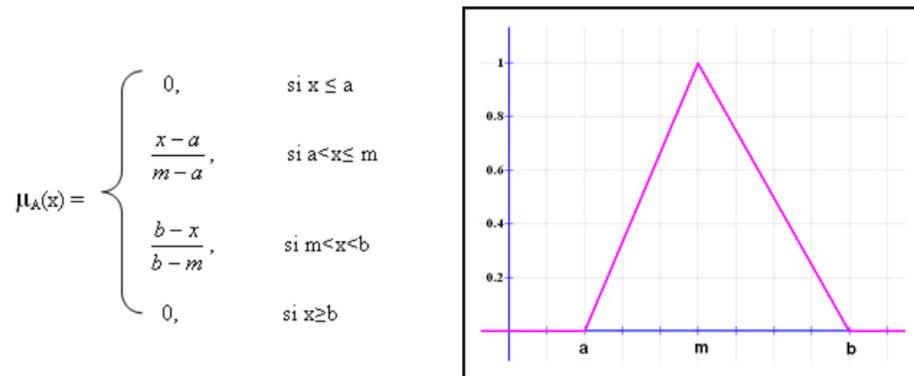


Figura 59 composición de la función triangular, tomado de [55].

3.7.5 Definición de variables lingüísticas de entrada.

Como se puede observar en la figura 58 dibujo B, una de las dos variables de entrada es el error, puesto que es la diferencia entre el valor de referencia respecto a los datos de la variable del sistema.

Para esta entrada se van a crear siete variables lingüísticas que dividen el universo de discurso. Las cuales son:

- **N_error_3** indica cuando la variable *error* está muy arriba del valor de referencia.
- **N_error_2** indica cuando la variable *error* esta medianamente arriba de valor de referencia.
- **N_error_1** indica cuando la variable *error* está arriba, pero por poca diferencia del valor de referencia.
- **Z_error_0** indica cuando la variable *error* es igual al valor de reverencia o que toma valores muy cercanos a cero.

- **P_error_1** indica cuando la variable *error* está por debajo, pero por poca diferencia del valor de referencia.
- **P_error_2** indica cuando la variable *error* esta medianamente por debajo del del valor de referencia.
- **P_error_3** indica cuando la variable *error* está muy por debajo del valor de referencia.

La otra variable de entrada para el sistema difuso es el cambio del error, esta entrada describe cuanto cambia el error en un instante de tiempo.

Las variables lingüísticas para esta entrada son las siguientes:

- **N_Cerror_3** indica cuando la variable *cambio del error* tiene una pendiente positiva.
- **N_Cerror_2** indica cuando la variable *cambio del error* tiene una pendiente medianamente positiva.
- **N_Cerror_1** indica cuando la variable *cambio del error* tiene una pendiente positiva casi constante.
- **N_Cerror_0** indica cuando la variable *cambio del error* tes constante o su pendiente es cero.
- **P_Cerror_1** indica cuando la variable *cambio del error* tiene una pendiente negativa casi constante.
- **P_Cerror_2** indica cuando la variable *cambio del error* tiene una pendiente medianamente negativa.
- **P_Cerror_3** indica cuando la variable *cambio del error* tiene una pendiente negativa.

3.7.6 Definición de variables lingüísticas de salida.

Esta variable describe que tan rápido deben hacer girar los motores el variador de velocidad. Para este caso también se realizaron siete variables lingüísticas dentro del universo de discurso. Las cuales son las siguientes:

- **N_salida_3** es necesario bajar muy rápidamente la velocidad de giro de los motores mediante el ESC.

- **N_salida_2** es necesario bajar medianamente rápido la velocidad de giro de los motores mediante el ESC.
- **N_salida_1** se necesita bajar lentamente la velocidad de giro de los motores mediante el ESC.
- **Z_salida_0** indica que se debe dejar constante la velocidad de giro de los motores.
- **P_salida_1** se necesita subir lentamente la velocidad de giro de los motores mediante el ESC.
- **P_salida_2** es necesario subir medianamente rápido la velocidad de giro de los motores mediante el ESC.
- **P_salida_3** es necesario subir muy rápidamente la velocidad de giro de los motores mediante el ESC.

3.7.7 Reglas difusas.

Mediante las reglas de inferencia el sistema toma los niveles de pertenencia de las variables de entrada y salida del controlador para así generar una respuesta en el sistema. Mediante la creación de las reglas el sistema difuso guarda el conocimiento lingüístico permitiendo así resolver los problemas para el cual fue diseñado. Las reglas que se implementaron son de tipo IF-THEN.

Para la creación de las reglas se utilizó una matriz de 7×7 en la cual se representan las variables lingüísticas del *error* y *el cambio del error*. Ver tabla 11.

R_cambio_error								
R_error		N_Cerror_3	N_Cerror_2	N_Cerror_1	Z_Cerror_0	P_Cerror_1	P_Cerror_2	P_Cerror_3
	N_error_3	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0
	N_error_2	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1
	N_error_1	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2
	Z_error_0	Z_salida_3	Z_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2	P_salida_3
	P_error_1	N_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2	P_salida_3	P_salida_3
	P_error_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2	P_salida_3	P_salida_3	P_salida_3
	P_error_3	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2	P_salida_3	P_salida_3	P_salida_3	P_salida_3

Tabla 11 matriz de reglas de inferencia, diseño propio.

La elaboración de las reglas se hizo siguiendo la metodología de la tabla **FAM** (Fuzzy Association Matrix), con esta metodología es posible tener el resultado de todas las combinaciones que se puedan dar en el proceso partiendo del número de variables lingüísticas que se hayan definido para las entradas y salidas del sistema. Este método consiste en involucrar todas las variables de la primera fila y columna de la tabla 11, dando como resultado la intersección de estas variables. Para definir las primeras tres reglas de inferencia se constituyeron de la siguiente manera:

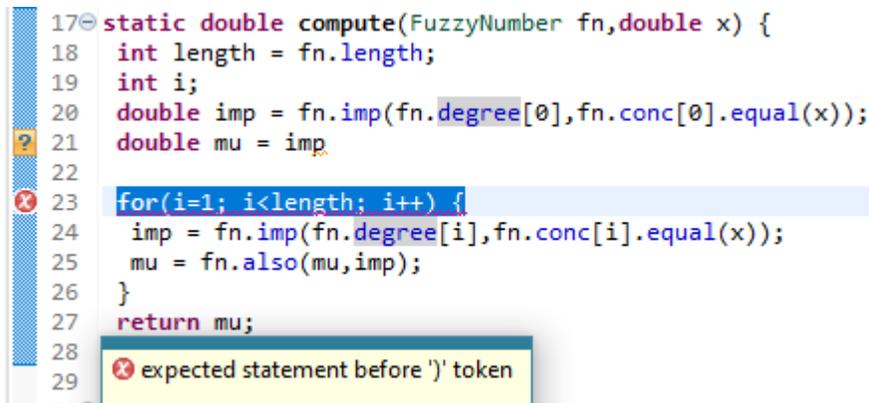
1. IF (ERROR is N_ERROR_3) and (CAMBIO_DEL_ERROR is N_Cerror_3) then (SALIDA is N_salida_3)
2. IF (ERROR is N_ERROR_3) and (CAMBIO_DEL_ERROR is N_Cerror_2) then (SALIDA is N_salida_3)
3. IF (ERROR is N_ERROR_3) and (CAMBIO_DEL_ERROR is N_Cerror_1) then (SALIDA is N_salida_3)

3.7.8 Método de inferencia

Una vez se tienen las reglas difusas correspondientes a las variables de entrada “error” y “cambio del error” el sistema procede a realizar la inferencia por medio del método de Mamdani el cual corta las funciones de membresía de las entradas en los valores de fusificación mínimos, a raíz de ello se generan diferentes conjuntos difusos los cuales deben ser defusificados para obtener un valor escalar que le sirva al sistema como salida, este método de inferencia se eligió debido a que se adapta de forma aceptable a la dinámica del proceso, gracias al manejo de los conjuntos difusos que permiten relacionar las salidas del controlador con respecto a la entrada, en función de las reglas difusas establecidas [61].

3.7.9 Defusificación

Después de la ejecución del método de inferencia de mandani se genera un conjunto difuso el cual debe ser “traducido” a un valor escalar legible por el sistema, en otras palabras, la defusificación es una herramienta para obtener una acción de control nítida a partir de una acción de control difusa[60]. Existen diferentes métodos para defusificar tal como se vio en la sección 2.7.9.4, para este caso en particular se iniciaron las pruebas en xfuzzy con el método de defusificación llamado centroide o centro de masa. Con este método se tuvo problemas al momento de compilar el código generado por xfuzzy en el programa stm32CubeIDE, genera un error en la librería del controlador difuso como se muestra en la imagen 60.



```
17 static double compute(FuzzyNumber fn, double x) {
18     int length = fn.length;
19     int i;
20     double imp = fn.imp(fn.degree[0], fn.conc[0].equal(x));
21     double mu = imp;
22
23     for(i=1; i<length; i++) {
24         imp = fn.imp(fn.degree[i], fn.conc[i].equal(x));
25         mu = fn.also(mu, imp);
26     }
27     return mu;
28
29     expected statement before \')' token
```

Figura 60 error de compilación, diseño propio.

Dado a que el error se genera en una función que calcula el centro de área se decidió experimenta con otro método de defusificación.

El programa Xfuzzy ofrece diferentes métodos para realizar la defusificación, entre ellos esta *fuzzy mean* o media difusa ponderada, este es un método de defusificación simplificado lo cual implica que los procesos de inferencia y defusificación se combinan en un mecanismo de cálculo de la media ponderada extendida sólo al conjunto de reglas[62]. Con este método de defusificación no se tuvo ningún error al compilar, por tanto, se optó implementarlo.

En la figura 61 se representa una comparación de la salida del controlador utilizando los métodos de defusificación centro de área y media difusa ponderada mediante un gráfico tridimensional generado por el programa Xfuzzy donde se ve cómo actúa la salida del sistema en función de las variables de entrada *error* y *cambio del error*.

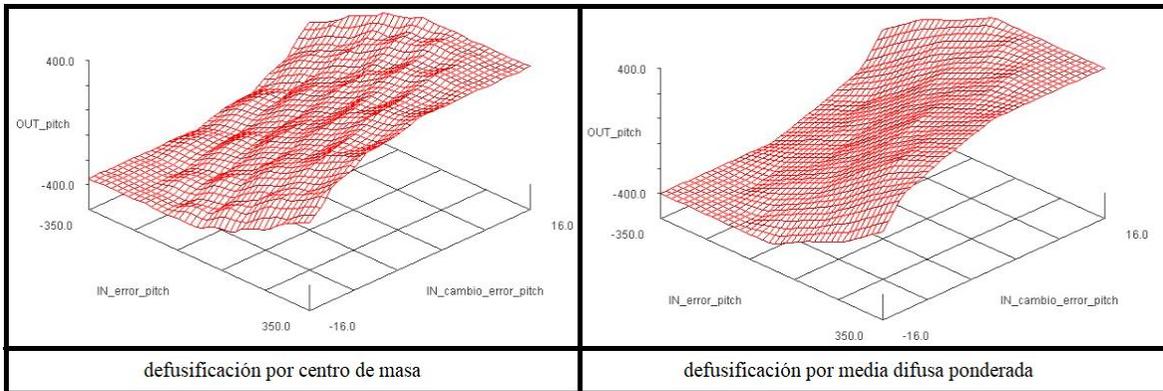


Figura 61 comportamiento del control difuso, diseño propio.

3.7.9.1 Diagrama de control difuso pitch y roll

En contexto se definió teóricamente el control difuso que será implementado para controlar los ejes pitch y roll del cuadricóptero, en la figura 62 se observa en diagrama de bloques la arquitectura de control que hasta ahora se ha desarrollado más un filtro tipo media móvil para cada salida de los bloques error pitch y error roll. Cabe destacar que los bloques que calculan el error utilizan la ecuación 18 que se mostró en la sección 3.4.2.

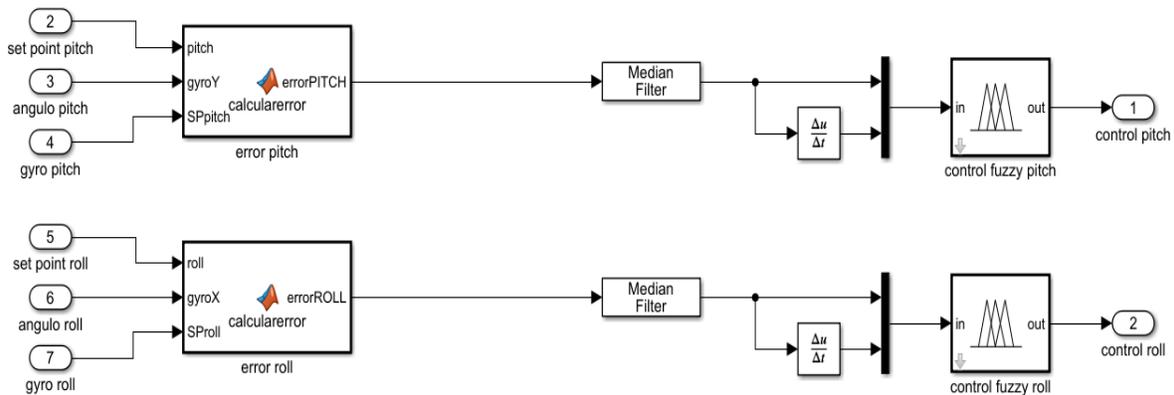


Figura 62 diagrama en bloques de la arquitectura del controlador, diseño propio.

3.7.9.2 Filtro media móvil

El ingreso de ruido en el lazo de control ocasiona fallas en el cálculo de la derivada discreta afectando la estabilidad de vuelo del cuadricóptero, razón por la cual se decidió implementar este filtro. Este ruido es producido en gran parte por las vibraciones que generan los motores al girar, el filtro media móvil reduce este ruido obteniendo promedios de muestras de la variable error a medida que esta va ingresando, la idea de obtener el promedio se basa en tomar N muestras, sumarlas para después dividir las por N, así el promedio es móvil cuando se recalcula cada vez que ingresa una nueva muestra para añadirla a las anteriores.

La fórmula del filtro media móvil que se utilizó en el microcontrolador se describe en la ecuación 30.

$$PN[n] = PN[n - 1] - \frac{PN[n - 1]}{N} + \frac{e[n]}{N}$$

Ecuación 30 representación matemática del filtro media móvil utilizado

Donde:

- $e[n]$ es la medición del error en el instante n.
- N es la constante del promedio móvil.
- $PN[n]$ es la estimación filtrada del error en el instante n.
- $PN[n - 1]$ es la estimación filtrada del error en el instante anterior.

El único parámetro que es modificable en la ecuación 30 es la constante de promedio móvil N, que para este caso se hizo N=20. Los resultados de implementar este filtro se observan en la figura 63, donde se expone la variable error pitch aplicando el filtro y sin él.

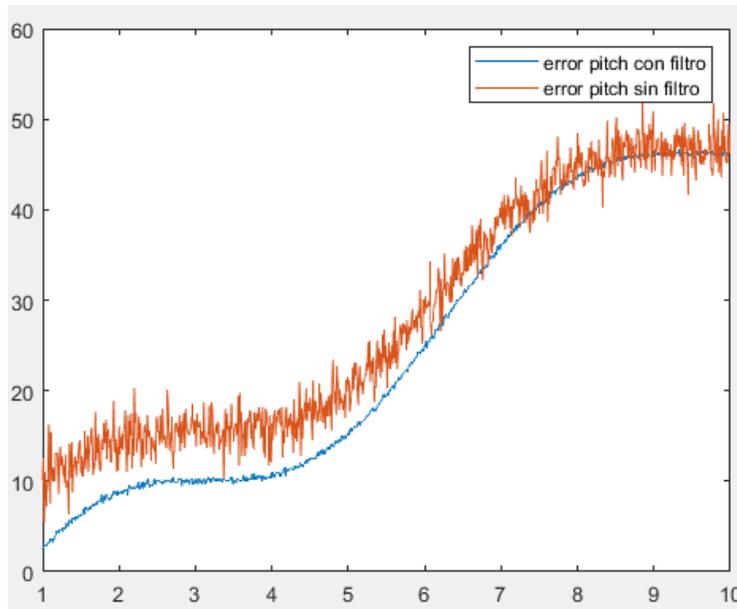


Figura 63 gráfica error pitch con y sin filtro, diseño propio.

3.8 MEDICIÓN DEL VOLTAJE DE LA BATERÍA.

El tipo de baterías utilizadas para estos proyectos son de tipo Li-Po, estas son susceptibles a daños permanentes si se llegan a dar casos de sobre descargas, para evitarlo es necesario medir constantemente a que voltaje se encuentra la batería cuando el cuadricóptero este en vuelo. Es recomendable no descargarla por debajo del 20% de la carga completa. La batería Li-Po escogida es de tres celdas y cada celda tiene un voltaje nominal aproximado de 3.7v. Cuando las celdas están completamente cargadas el voltaje individual es de 4.2v y cuando estas llegan al 20% de carga, el voltaje es de unos 3.74v. Por tanto, cuando la batería está completamente cargada la suma de las 3 celdas da un voltaje de 12.6v, cuando está a un 20% la suma de voltaje de las 3 celdas es de 11.22v. Partiendo de saber cuál es el voltaje de operación de la batería se debe evitar que sobrepase los valores permitidos utilizando el conversor análogo digital o ADC del microcontrolador.

La mayoría de los pines de entrada del MCU soportan voltajes de 5v, aunque es recomendable trabajar a 3.3v. Para medir el voltaje de la batería que varía entre los 11.22v y 12.6v se debe usar un divisor de voltaje utilizando resistencias.

La fórmula utilizada para calcular el valor de las resistencias se describe en la ecuación 31.

$$V_{med} = V_{Bat} \frac{R2}{R1 + R2}$$

Ecuación 31 cálculo del valor de resistencias.

Donde:

- V_{med} es el voltaje medido en la entrada analógica del MCU no superior a 1.16v.
- V_{Bat} es el voltaje nominal de la batería de 3 celdas o 12.6v.
- R_1, R_2 son las resistencias que conforman el divisor de voltaje.

Para encontrar el valor de la resistencia R_1 se despeja la ecuación 32 como se muestra a continuación:

$$R_1 = \left(\frac{V_{Bat}}{V_{med}} - 1 \right) R_2$$

Ecuación 32 encontrar el valor de R_1 .

Sin embargo, para calcular el valor de R_1 utilizando la ecuación 32, es necesario definir un valor comercial para la resistencia R_2 , que para este caso se hizo $R_2=1k\Omega$. Una vez definidas todas las variables de la ecuación 33 se sustituye para encontrar el valor de R_1 .

$$R_1 = \left(\frac{12.6v}{1.16v} - 1 \right) 1k\Omega$$

$$R_1 = 9862\Omega$$

Ecuación 33 valor definitivo de la resistencia.

Final mente R_1 se aproxima al valor comercial más cercano, que para este caso es de $10k\Omega$.

En la figura 64 se muestra el divisor de voltaje utilizado para medir el nivel de la batería, también se le añadió un condensador de 10uF para ayudar a eliminar el rizado con el objetivo de medir un voltaje más preciso por el ADC del microcontrolador.

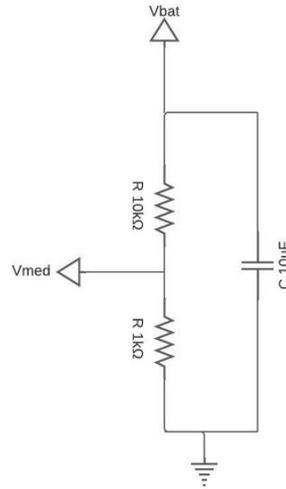


Figura 64 divisor de voltaje, diseño propio.

En la tabla 12 se observan los valores que toma la medición del nivel de la batería comenzando por el divisor de voltaje hasta el valor que toma el ADC.

Voltaje de la batería	Divisor de voltaje	Valor ADC	Porcentaje
12.6v	1.16v	1390	100%
11.22v	0.83v	1335	0%

Tabla 12 valores de medición del nivel de batería, diseño propio.

3.8.1 Filtro digital para batería.

Debido que el rango de medición entre la carga completa y carga baja es pequeño, cualquier tipo de ruido producido por el consumo de los motores o factores externos afecta gravemente el censado del voltaje de la batería. Por tanto, se implementó un filtro digital complementario que actúa como filtro paso bajo. La ecuación 34 describe al filtro complementario utilizado en el microcontrolador.

$$Pv[n] = Pv[n - 1] * 0.92 + V_{bat} * 0.098$$

Ecuación 34 representación matemática del filtro complementario implementado.

Donde:

- $Pv[n]$ es la estimación filtrada del voltaje de la batería en el instante n .
- $Pv[n - 1]$ es la estimación filtrada del voltaje de la batería en el instante anterior.
- V_{bat} es la medición del voltaje de la batería en el instante n .

Los resultados de implementar este filtro se observan en la figura 65, donde se expone el ADC del voltaje de la batería implementando el filtro complementario y sin él.

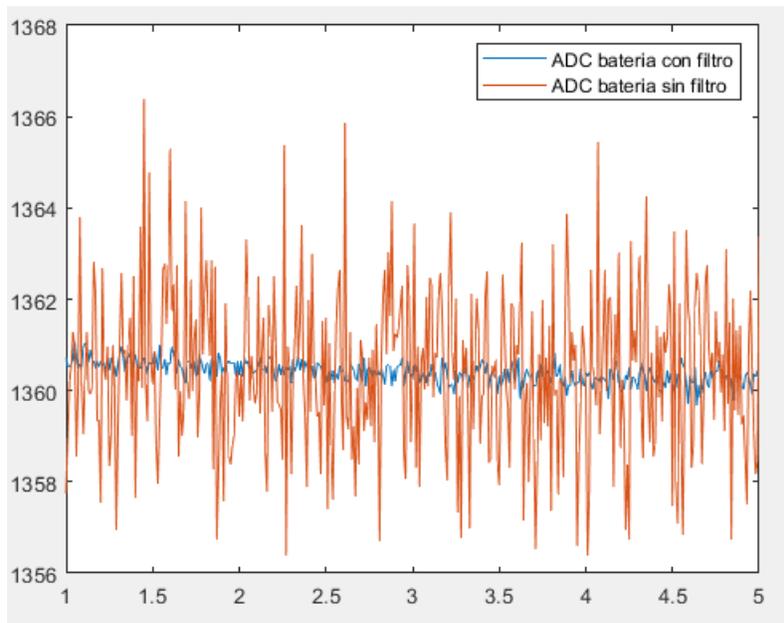


Figura 65 voltaje ADC de la batería con y sin filtro, diseño propio

3.8.2 Acción de batería baja

El cuadricóptero posee una acción para indicar el nivel bajo de la batería la cual consiste en un bombillo LED incrustado en la placa principal, este LED parpadea cuando la batería es demasiado baja, de esa manera el piloto puede saber cuándo cargarla.

3.9 MEZCLADOR DE SEÑALES DE CONTROL.

Para controlar los ejes pitch, roll y altura se requiere mezclar las señales de control que proporciona el sistema difuso. De acuerdo con la configuración tipo “X” que se elijo para controlar el cuadricóptero, el mezclador de estas señales debe cumplir con las características descritas en la sección 2.2.4.

El mezclador de señales debe tener en cuenta las siguientes variables:

- Control de altura: se controla aplicando la misma potencia a todos los motores.
- Control pitch: la señal de control aumenta para los dos motores traseros y disminuye para los motores delanteros para inclinar el cuadricóptero hacia delante, o viceversa para inclinar el cuadricóptero hacia atrás.
- Control roll: la señal de control aumenta para los dos motores laterales derechos y disminuye para los motores laterales izquierdos para inclinar el cuadricóptero a la derecha. Y, viceversa para inclinar el cuadricóptero a la izquierda.

El mezclador utilizado para controlar el cuadricóptero con la configuración tipo “X” se muestra en la figura 66.

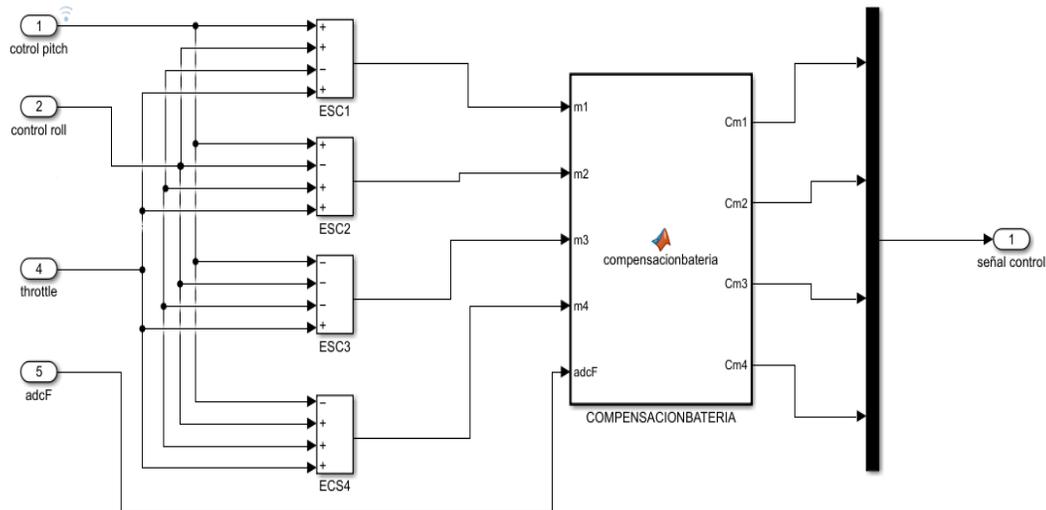


Figura 66 mezclador para controlar el cuadricóptero, diseño propio.

Finalmente, las fórmulas que definen la potencia que se aplica a cada motor se muestran en la ecuación 35.

$$M1 = throttle + control\ pitch + control\ roll$$

$$M2 = throttle - control\ pitch + control\ roll$$

$$M3 = throttle - control\ pitch - control\ roll$$

$$M4 = throttle + control\ pitch - control\ roll$$

Ecuación 35 potencias aplicadas para cada motor

Donde:

- $M1, M2, M3, M4$ son las señales de control para los cuatro motores respectivamente.
- *throttle* aceleración o potencia.
- *control pitch* señal de control para el eje pitch producida por el sistema difuso.
- *control roll* señal de control para el eje roll producida por el sistema difuso.

El rango de operación para las señales de control $M1, M2, M3, M4$ varia entre 0 y 2000, siendo 2000 la potencia máxima aplicada a los motores.

3.9.1 Compensación de batería.

Como se puede observar en la figura 66 existe un bloque llamado “compensación batería”, fue agregado para que la potencia entregada por la batería sea aproximadamente la misma desde un 100% hasta el 0% de carga.

Cuando el cuadricóptero está en vuelo la batería va disminuyendo la capacidad para entregar potencia. De tal modo que, si los controladores difusos calculan un valor numérico que representa potencia que la batería debe suministrar, la potencia será menos cuando la batería este a un 50% de carga respecto si está al 100%, así sea con el mismo valor numérico que calcula el sistema difuso.

Por tanto, es necesario saber en qué porcentaje de carga se encuentra la batería para así recalcular la potencia suministrada a los motores. En la ecuación 36 describe que potencia se les entregan a los motores en función del voltaje de la batería.

$$Mfx = Mx * \frac{1350 - ADC_{battery}}{3500}$$

Ecuación 36 potencia entregada a los motores en función del voltaje de la batería

Donde:

- Mx representa la señal de control para los motores $M1$, $M2$, $M3$ o $M4$.
- $ADC_{battery}$ es la medición del voltaje de la batería mediante el ADC del microcontrolador.
- Mfx es la estimación de la señal de control recalculada según el voltaje de la batería para los motores $M1$, $M2$, $M3$ o $M4$.

3.10 DISEÑO DEL FIRMWARE

En esta sección se describirá el software creado para configurar los periféricos del microcontrolador que serán utilizados para inicializar y calibrar los módulos electrónicos o sensores. A demás se establecerá la secuencia de operación para coordinar los procesos de lectura de sensores, perecimiento de datos y aplicar el control difuso para estabilizar la aeronave.

Para llevar a cabo el firmware se desarrolló en las siguientes subsecciones: configuración de periféricos, configurar módulos electrónicos, diseño del programa principal.

3.10.1 Configuración de periféricos.

El microcontrolador está conformado por múltiples periféricos que son necesarios para comunicarse con dispositivos electrónicos externos como los sensores. Para este caso los módulos y sensores elegidos utilizan los siguientes periféricos del MCU: I2C, SPI, PWM, USART, ADC. En la tabla 13 se menciona la velocidad de operación que se configuro para los periféricos de comunicación y a que modulo electrónico están dedicados.

Periférico	velocidad de operación	Uso DMA	Modulo electrónico
I2C	400Khz	Si	GY-521 MPU6050
SPI	18Mbits/s	Si	NRF24L01
PWM	450hz	No	ESC RacerStar

USART	115200Bits/s	No	Bluetooth hc-06
-------	--------------	----	-----------------

Tabla 13 velocidad de operación para cada periférico de comunicación, diseño propio

Como se puede observar en la tabla 13 los periféricos I2C, SPI utiliza el DMA, esto para disminuir el uso de la CPU del microcontrolador al momento de leer los datos de los módulos GY-521 y NRF24L01.

El ADC es utilizado para leer el voltaje de la batería y también utiliza el DMA del MCU. En la siguiente imagen (ver figura 67), se observa el diagrama de flujo que sigue la secuencia de configuración para los periféricos.

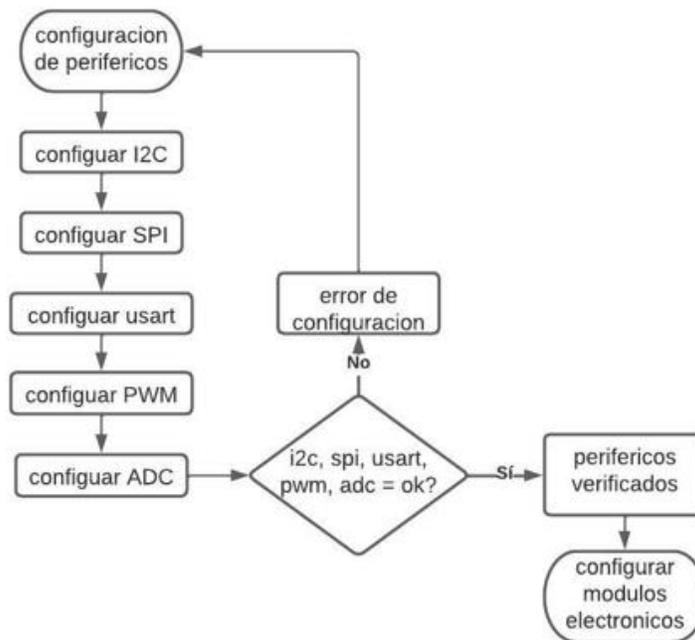


Figura 67 diagrama de flujo de periféricos, diseño propio.

La configuración de los periféricos consiste en determinar la frecuencia de transmisión de envío de datos, además de definir los pines del MCU para cada periférico. En la siguiente imagen (ver figura 68) se observa los pines que se ocuparon en el microcontrolador stm32f103c8t6.

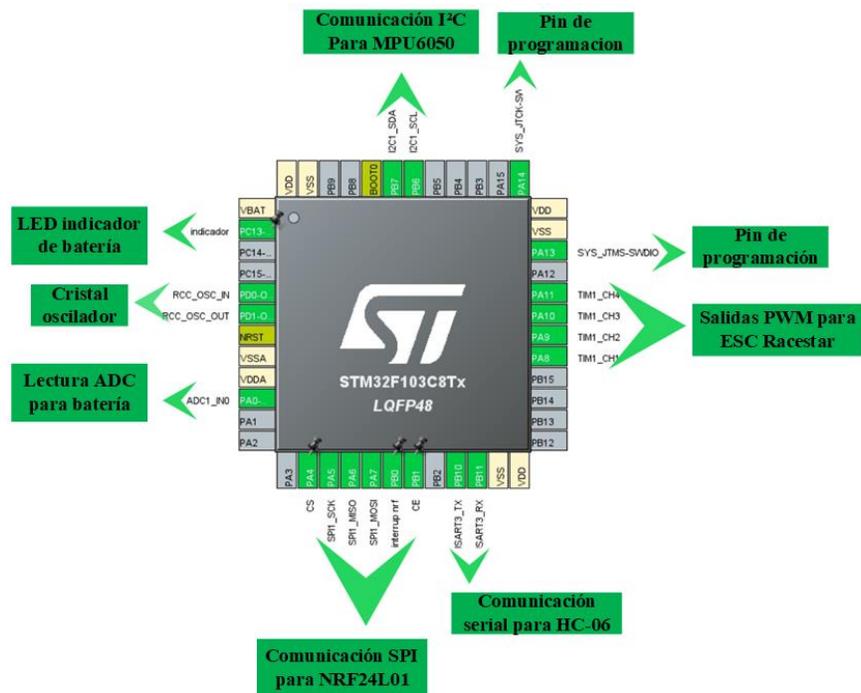


Figura 68 configuración de periféricos, diseño propio.

3.10.2 Configuración de módulos electrónicos.

Una vez se hayan inicializado correctamente los periféricos del MCU, se procede a configurar los sensores y módulos electrónicos utilizando los protocolos de comunicación correspondientes a cada sensor.

Para este caso los módulos que se configuraran son el sensor MPU6050 y el transceptor NRF24L01, en la figura 69 se observa un diagrama de flujo que indica la secuencia sobre la configuración de los módulos.

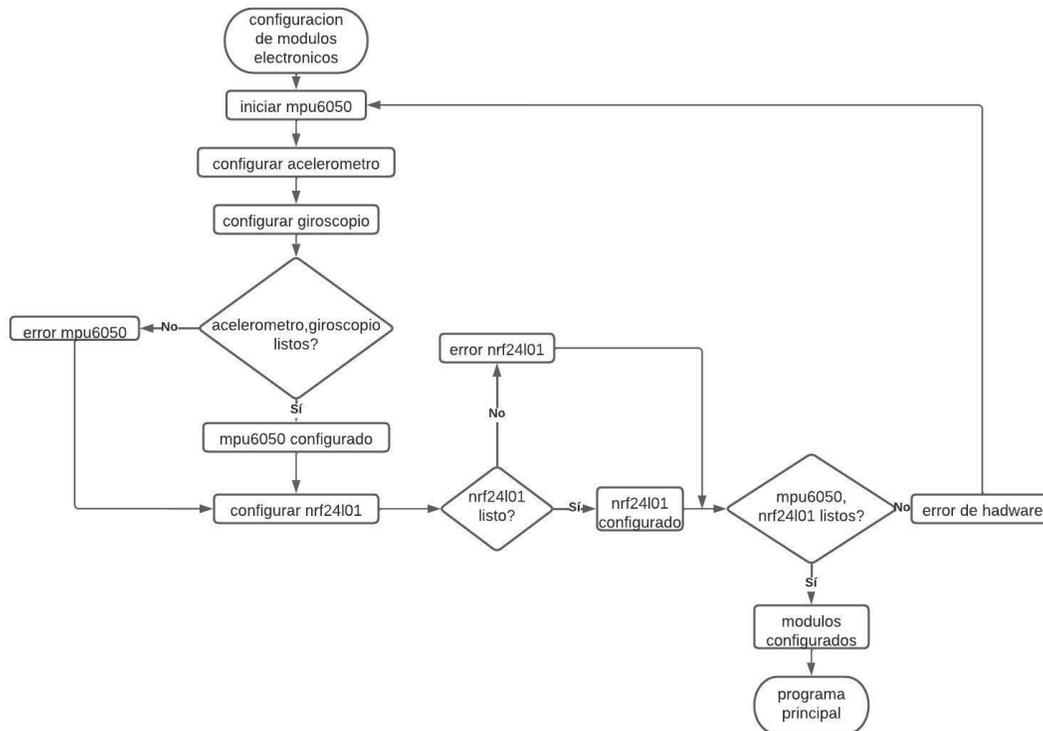


Figura 69 diagrama de flujo de secuencia de los módulos NRF24L01 y MPU6050, diseño propio.

La configuración del sensor mpu6050 consiste en definir a que escala se van a leer los datos del acelerómetro y giroscopio, además de activar un filtro pasa bajas que trae internamente el sensor para reducir el ruido para la velocidad angular y aceleración lineal censadas. Por otra parte, en la configuración del transceptor nrf24l01 se define a qué velocidad de transmisión y potencia va a funcionar además de configurarla como transmisor o receptor.

3.10.3 Programa principal.

El programa principal comienza verificando el nivel de batería y si el radiocontrol está conectado al cuadricóptero mediante el transceptor nrf24l01. una vez haya completado la verificación el programa continúa y, si existe algún error en el hardware el programa no avanza e indica mediante un testigo led. En la figura 70 se observa un diagrama de flujo indicando la secuencia de verificación.

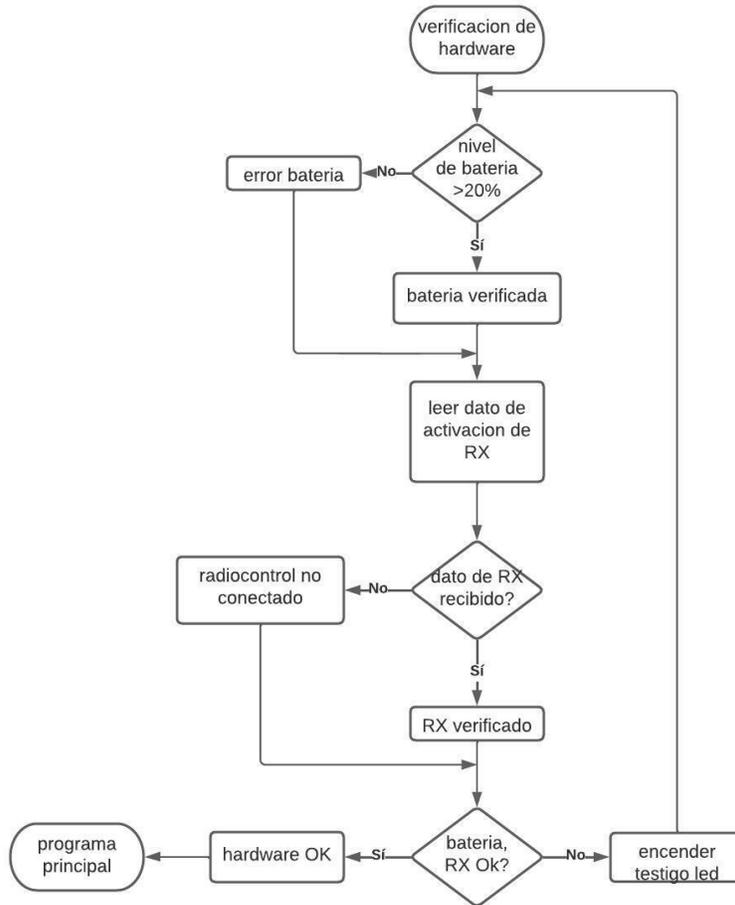


Figura 70 diagrama de flujo de secuencia de verificación, diseño propio.

Luego de haber verificado el hardware el programa procesa los datos que aporta el sensor MPU6050 y la antena NRF24L01, también se realiza el filtrado de las señales para finalmente aplicar la estrategia de control y retornar algunos datos a la estación terrestre. En la figura 71 se muestra el diagrama de flujo que indica la secuencia de operación.

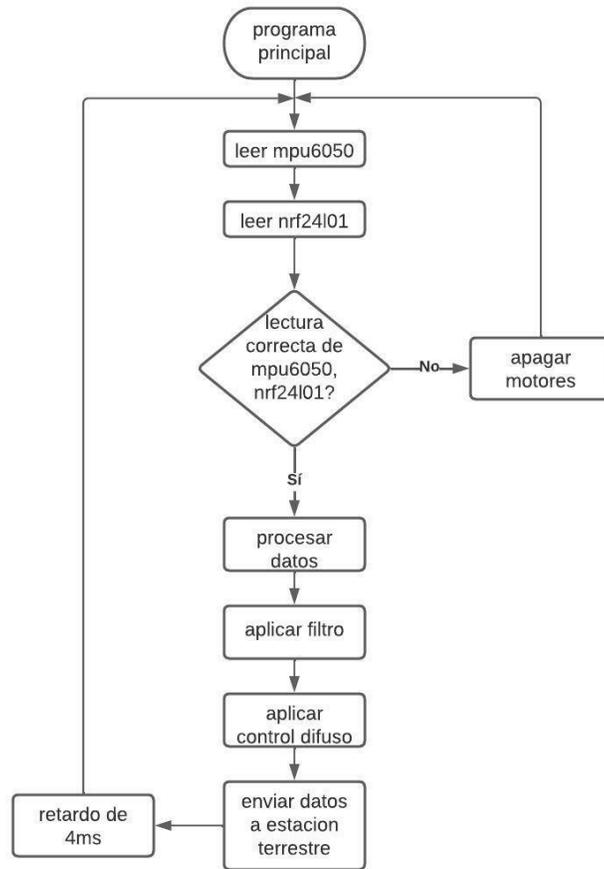


Figura 71 diagrama de flujo de la secuencia de operación, diseño propio.

El programa principal está programado para ejecutarse a una frecuencia de 250hz, por tanto, cada 4ms lee los datos de los sensores, procesa información, aplica filtros y controla la aeronave ejecutando el control difuso. También verifica que los datos suministrados por los sensores sean correctos, porque si no lo son, es posible que el control difuso reciba datos erróneos produciendo cálculos incorrectos que sobrecalientan los motores produciéndoles daño.

CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

En este capítulo se describe la metodología que se aplicó en los estudiantes para dar a conocer la plataforma robótica, posteriormente se analizarán los resultados obtenidos gracias al estudio de caso realizado.

4.1 Metodología para la validación de la plataforma

La metodología utilizada para desarrollo de la plataforma robótica realizada se puede dividir en tres aspectos fundamentales:

- Presentación introductoria en las aulas de clase.
- Ejecución de prácticas con el prototipo.
- Guías de diseño.

A continuación, se describirán cada uno de estos aspectos, dejando en evidencia como se llevó a cabo la validación de la plataforma por parte de los participantes.

4.1.1 Presentación introductoria en las aulas de clase

En el marco de este trabajo de investigación se han aplicado diferentes paradigmas relacionados con la estructura de un cuadricóptero, sistemas de control, lenguajes de programación y electrónica en general. Para los cuadricópteros existen al menos tres diferentes estructuras (estructura en X, cruz y H), cada una de ellas tiene una funcionalidad similar, sin embargo, en todas varía el posicionamiento y sentido de giro tanto de motores, como de hélices. En cuanto a los sistemas de control, es preciso mencionar que se implementaron dos controladores, PID y difuso, el firmware de ambos controladores fue realizado en el programa STM32cubeIDE, mientras que los parámetros correspondientes al control difuso se diseñaron en Xfuzzy.

Teniendo en cuenta la postura anterior, se pensó en la posibilidad de que los estudiantes elegidos para participar de las prácticas no estuvieran contextualizados con estos temas en específico, por lo tanto se consideró pertinente realizar una presentación introductoria en las aulas, para de esta manera dar a conocer los fundamentos teóricos implicados en el diseño de

una plataforma robótica, así los estudiantes tendrían mayores posibilidades de asimilar la temática a trabajar durante el desarrollo de las prácticas.

Se realizaron dos presentaciones, la primera de ellas busca a manera introductoria ambientar a los estudiantes sobre la importancia de los drones y sus principales aplicaciones, después de esa pequeña introducción se comienzan a tratar temas relevantes, como la estructura del dron, sentido de giro de los motores, ubicación de las hélices y control PID.

La segunda presentación se centró en el control difuso para cuadricópteros, donde nuevamente se explicaron los fundamentos utilizados para diseñar el controlador, temas como variables lingüísticas, funciones de membresía y reglas de control fueron expuestos. Adicionalmente se dio a conocer el software Xfuzzy donde se diseñó el controlador difuso, explicando detalladamente su funcionamiento. Al final de cada presentación se resolvieron las preguntas de los estudiantes y profesores correspondientes.

Cabe destacar que cada presentación se ejecutó en diferentes tiempos, es decir, no se realizaron todas las presentaciones en una sola sesión, por el contrario, se dividieron para evitar que los estudiantes se saturasen de información.

4.1.2 Ejecución de prácticas con el prototipo

Una vez terminada cada presentación en el aula de clase se procedió a dividir a los participantes en pequeños grupos de entre tres y cuatro personas, para que de esta manera pudieran ser instruidos de forma integral, sin perderse detalle alguno de la práctica.

La primera practica se llevó a cabo inmediatamente después de realizar la presentación número uno, correspondiente a la estructura del dron y el control PID, los estudiantes fueron llevados a un salón vacío para que de esta manera pudieran ver el prototipo en acción de manera segura , se les indico la manera correcta de instalar los motores y las hélices en la estructura del dron según su sentido de giro (ver figura 72A), seguidamente se les mostro el entorno de programación del software STM32cubeIDE con el objetivo de que ellos pudieran modificar los parámetros PID de los ángulos de navegación pitch, roll y yaw, en la figura 72 se muestra un fragmento de la guía correspondiente a la práctica del controlador PID, donde los estudiantes encontraran los pasos para llevar a cabo la variación de los parámetros del ángulo correspondiente.

1. Se inicia con la acción de **control proporcional para el ángulo "PITCH"** en la cual se probarán valores de ganancia en el rango de 0.8 hasta 1.3, para realizar la prueba siga los siguientes pasos

- I. Abra el software STM32cubeIDE
- II. Abra el código fuente que se dejó en el apartado de herramientas de software en la página 3
- III. Vaya a la línea de código 261, en la cual encontrara tres espacios vacíos
- IV. Cada uno de estos espacios corresponde a un valor P, I, D del ángulo de navegación correspondiente como se ve en la *figura 8*, en este caso es el ángulo pitch.

```
  //P          I          D  
  > /*PITCH*/ gain_pid[0] =  ; gain_pid[1] = . ; gain_pid[2] = . ;
```

Figura 72 práctica de variación de parámetros en el control PID, diseño propio.

En este caso el parámetro de prueba es la acción de control proporcional para el ángulo pitch, el estudiante puede acceder al código fuente ingresando al enlace que se encuentra dentro de la guía No 1.

Una vez se ingresa el valor de prueba se carga el código fuente en el microcontrolador para de esta manera ver el comportamiento del dron (ver figura 73B), gracias a esta metodología los estudiantes pudieron ver la importancia y la función de cada una de las componentes proporcional, integral y derivativa del controlador PID en un cuadricóptero de forma práctica.



Figura 73 prácticas de control PID en un cuadricóptero, diseño propio.

La segunda practica se hizo aproximadamente una semana después de llevar a cabo la primera práctica, después de realizar la presentación número dos, correspondiente a la lógica difusa y el control difuso en un cuadricóptero, nuevamente los estudiantes fueron llevados a un salón vacío por seguridad, donde se les dio a conocer de manera detallada el entorno de diseño del software Xfuzzy, tocando aspectos relevantes como las variables lingüísticas, funciones de membresía y reglas de control. en esta práctica se indicó de qué manera se importa el archivo final generado por Xfuzzy hacia un compilador que usa lenguaje C como lo es el STM32cubeIDE, para posteriormente cargarlo en el microcontrolador. Seguidamente se dio inicio a las pruebas con el prototipo teniendo ya embebido el control difuso (ver figura 74), Gracias a estas prácticas los estudiantes tuvieron la oportunidad de experimentar la implementación de los controladores PID y difuso respectivamente, en un cuadricóptero.



Figura 74 prácticas de control difuso en un cuadricóptero, diseño propio.

Los estudiantes elegidos para participar en estas prácticas hacen parte del programa de ingeniería electrónica, actualmente están cursando noveno semestre, lo cual implica que tienen una visión amplia respecto a los temas relacionados con el control digital e inteligente, sin embargo es lógico que durante el desarrollo de la metodología de enseñanza expuesta anteriormente surjan dudas por parte de los estudiantes e incluso docentes, estas dudas fueron resueltas de manera oportuna por los autores de este trabajo en el instante donde surgieron, dejando en claro cada uno de los temas expuestos.

Cabe destacar que cada practica se realizó bajo la supervisión del docente correspondiente, siendo así, se tiene un total de 13 estudiantes de pregrado y 2 docentes los participantes de estas prácticas.

4.1.3 Guías de diseño

Durante las practicas con el prototipo se llevaron a cabo diferentes actividades como instalación de las hélices, identificación del sentido de giro de motores en un dron, estructura en X, movimientos de un cuadricóptero, ajuste de parámetros, definición del tipo de función de membresía, universo de discurso, entre otras.

Pensando en los estudiantes que no participaron de las practicas con el prototipo debido a que son parte de semestres inferiores, se decidió plasmar todos los pasos que se llevaron a cabo durante las prácticas en un par de guías, las cuales están diseñadas cumpliendo todos los estándares exigidos por los laboratorios institucionales, la primera guía se centra en la estructura del cuadricóptero, control PID y ajuste de parámetros. La segunda guía se centra en el control difuso, instalación y modo de uso del programa Xfuzzy, diseño del controlador, definición de variables lingüísticas, funciones de membresía e importación del archivo. xfl hacia un compilador con lenguaje C (STM32cubeIDE).

Ambas guías están divididas en cinco ítems fundamentales:

1. Introducción.
2. Objetivos.
3. Consultas preliminares.
4. Herramientas de software.
5. Procedimiento.

A continuación, se describirá la composición de cada uno de los ítems.

1. Introducción

En este ítem se busca introducir al lector en lo que será la temática a tratar durante el desarrollo de la guía, dejando en claro el objetivo principal de la plataforma en general, el cual es servir como herramienta de apoyo a los estudiantes y docentes en las materias de control.

2. Objetivos

Ambas guías cuentan con dos objetivos, los cuales van orientados hacia la identificación de la dinámica del dron, diseño e implementación del controlador correspondiente.

3. Consultas preliminares

En las consultas preliminares el estudiante podrá encontrar los temas que debe tener en claro antes de dar inicio al desarrollo de la guía, para lo cual se facilitan una serie de enlaces donde se encontrara información de utilidad relacionada con el contenido de la guía correspondiente.

4. Herramientas de software

En este ítem se encuentran los programas necesarios para el desarrollo de la guía correspondiente, además del código fuente del cuadricóptero, para lo cual se disponen una serie de enlaces, donde el estudiante podrá descargar el software o componente necesario para su posterior uso.

5. Procedimiento

El procedimiento es el componente principal de las guías de diseño, en este se explican los pasos necesarios para diseñar e implementar el controlador correspondiente, el procedimiento se dividió en una serie de pasos que varían dependiendo de la guía, esto se hizo con la finalidad de dar una formación integral hacia los estudiantes.

Cada uno de los pasos se describen detalladamente, sin embargo, en muchos casos los procedimientos que se realizan son algo tediosos y largos como para ser descritos, por esta razón se decidió hacer uso de medios audiovisuales, como videos tutoriales, donde los estudiantes pueden seguir el procedimiento de manera practica y eficiente.

Al finalizar cada guía, se tiene un cuestionario con preguntas relacionadas con los procedimientos que se llevaron a cabo, de esta forma el docente puede corroborar si el aprendizaje fue correcto.

4.1.4 Resultados del cuestionario de aceptación

Para dejar en evidencia el nivel de aceptación que tuvo la plataforma robótica, se diseñó una herramienta donde los estudiantes participantes evaluaron los aspectos relacionados con las prácticas que se llevaron a cabo con el prototipo.

La evaluación del cuestionario realizado contó con la participación de 13 estudiantes de noveno semestre pertenecientes al programa ingeniería electrónica, los cuales previamente tuvieron contacto con el prototipo y fueron instruidos respecto al diseño general de la plataforma, dando así los siguientes resultados:

1. La pregunta número uno evalúa si es conveniente que la universidad fomente las prácticas de robótica móvil orientadas a la sintonización de controladores, donde el 92.3% de los participantes estuvieron en total acuerdo y el 7.7% estuvieron de acuerdo como se ve en el gráfico de la figura 75.

1. ¿Cree usted que es conveniente que la universidad fomente y apoye el desarrollo de practicas con robótica móvil en temas como la sintonización de controladores PID o difuso?
13 respuestas

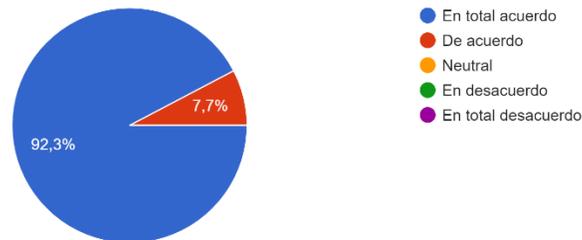


Figura 75 respuesta 1 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.

2. En la pregunta numero dos se evalúa si los estudiantes lograron reforzar sus conocimientos respecto a los paradigmas prácticos de los controladores PID y difuso expuestos durante las practicas, para lo cual el 76.9% respondieron favorablemente y el 23.1% dijo obtener poco conocimiento según la gráfica de la figura 76.

2. ¿ El desarrollo de las practicas considera le ha permitido mejorar o reforzar sus conocimientos respecto a las técnicas de control PID y difuso?

13 respuestas

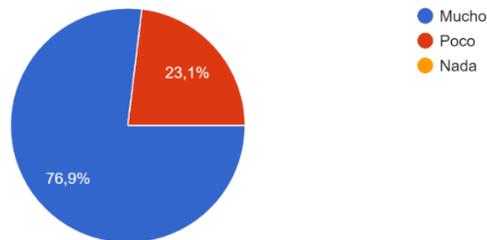


Figura 76 respuesta 2 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.

3. La pregunta tres evalúa si las practicas lograron dar a conocer los aspectos fundamentales de los controladores PID y difuso, para de esa manera comprender los efectos que tiene su implementación en un robot, para esta pregunta se optó por una evaluación de 1 a 5, siendo 5 la calificación más alta.

Nueve de los estudiantes dieron la calificación más alta, dos de ellos la calificaron con 4 y los dos restantes dieron una calificación de 3 como se ve en la figura 77.

3. ¿Cree usted que las practicas cubrieron los aspectos fundamentales para entender los efectos de implementar un controlador, ya sea PID o difuso? ...ifiquelo de 1 a 5, siendo 5 la calificación mas alta

13 respuestas

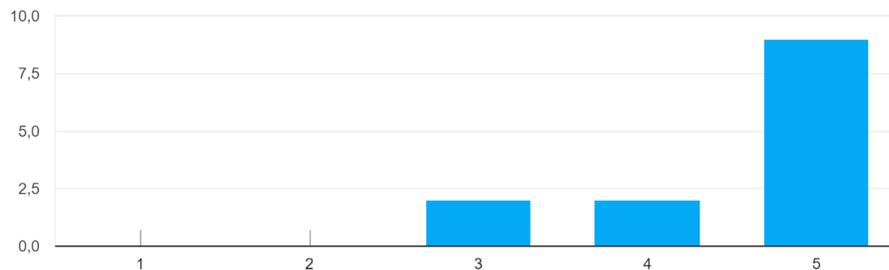


Figura 77 respuesta 3 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.

4. La pregunta 4 califica el conocimiento de los autores del trabajo al momento de dar respuesta a los cuestionamientos dados por los participantes de las practicas, para lo cual el 53.8% dijeron estar muy satisfechos y el 46.2% restante estuvo satisfecho como se evidencia en la gráfica de la figura 78.

4. ¿Qué tan satisfecho esta con las respuestas que dieron los orientadores a sus preguntas durante las practicas?

13 respuestas

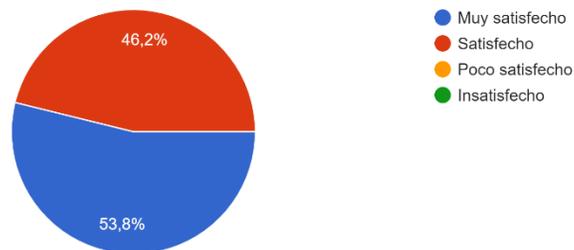


Figura 78 respuesta 4 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.

5. La pregunta cinco busca indagar sobre la motivación que se genera en los estudiantes al realizar las prácticas de controladores con un cuadricóptero, el 61.5% aseguro estar completamente motivado, mientras que el 38.5% lo hizo en gran medida como se ve en el gráfico de la figura 79.

5. ¿Qué tan motivado se sintió al realizar las practicas con el cuadricóptero?

13 respuestas

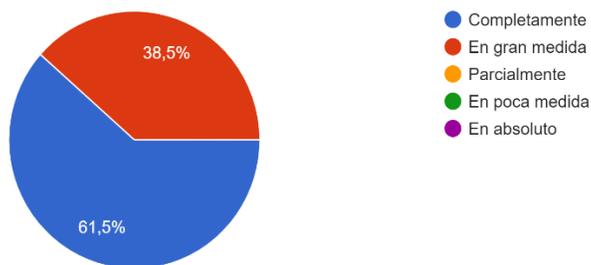


Figura 79 respuesta 5 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.

6. La pregunta 6 tiene como objetivo conocer que tan agradable fue el aprendizaje durante las prácticas que se llevaron a cabo, el 53.8% de los estudiantes está completamente satisfecho, mientras que el 48.2% lo está en gran medida como se ve en la figura 80.

6. ¿Su aprendizaje durante las practicas fue ameno?
13 respuestas

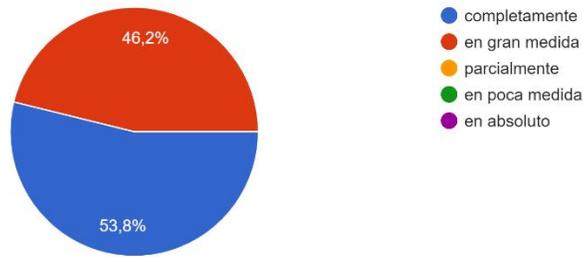


Figura 80 respuesta 6 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio

7. La pregunta siete busca obtener información acerca de la importancia e interés generado en los estudiantes que participaron en las prácticas de control con el cuadricóptero. El 84.6% está en total acuerdo para la realización de este tipo de prácticas, mientras que el 15.4% está de acuerdo como se ve en el gráfico de la figura 81.

7. ¿Le parece interesante e importante realizar practicas con robótica móvil (como los drones) para aplicar técnicas de control como el PID o difuso?
13 respuestas

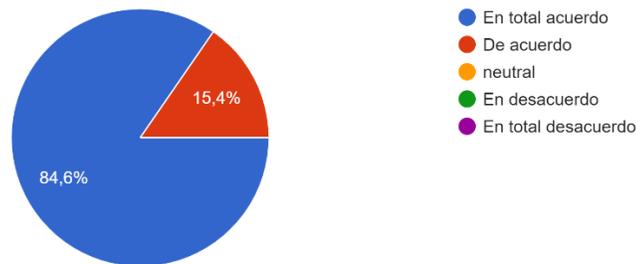


Figura 81 respuesta 7 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.

8. Para estas prácticas previamente se realizaron dos presentaciones en las aulas de clase para cada grupo, con el objetivo de mostrar los fundamentos teórico-prácticos que conlleva el diseño de un controlador PID y difuso en un dron. Por lo tanto, la pregunta ocho busca determinar qué tan claras y coherentes fueron las presentaciones. Según el gráfico de la figura 82 el 61.5% está totalmente de acuerdo y el 38.5% simplemente está de acuerdo.

8. ¿Los contenidos previos (Exposición o guías) a cada practica fueron presentados de forma clara o coherente?

13 respuestas

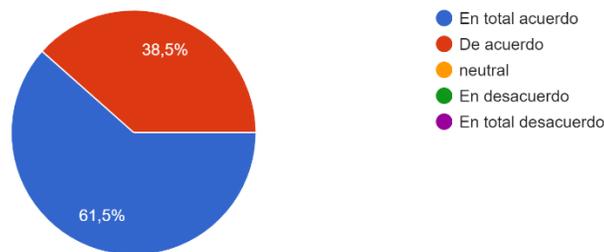


Figura 82 respuesta 8 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.

9. En la pregunta nueve los estudiantes opinan acerca de la inclusión de este tipo de prácticas en los cursos de control que ofrece la universidad, según la gráfica de la figura 83, el 76.9% está en total acuerdo y el 23.1% restante está de acuerdo.

9. ¿Considera necesario y apropiado que en los cursos de control digital, inteligente o afines se incluyan este tipo de practicas como parte de su contenido ?

13 respuestas

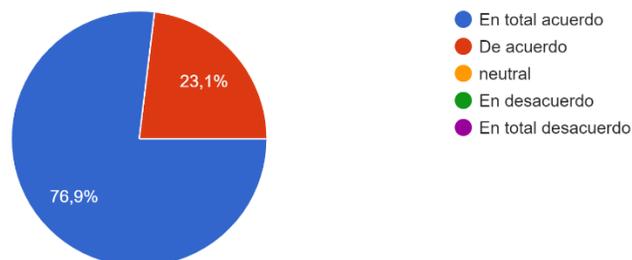


Figura 83 respuesta 9 del cuestionario para validar la plataforma didáctica, diseño propio.

10. La pregunta diez es una pregunta abierta donde los estudiantes que participaron pueden dar su opinión sobre los aspectos más interesantes de la plataforma o hacer sugerencias de mejora en su aplicación.

A continuación, se muestran Algunas de las observaciones hechas por los participantes:

- “Interesante conocer el control PID y difuso más a fondo en una práctica física donde se puede observar de qué manera influye cada uno de los controles en un proceso determinado”.
- “Me pareció interesante la parte de la sintonización del controlador PID, ver cómo al cambiar los valores de las ganancias se lograba estabilizar el dron o, todo lo contrario, se pudo observar que el control derivativo era muy importante para lograr una acción rápida y anticipada para estabilizar el dron”.
- “Profundizar más en el tema difuso y realizar uno o varias prácticas que vayan desde la más fácil hasta la más compleja para así afianzar más los conocimientos en control fuzzy”.

El nivel de aceptación por parte de los participantes se refleja en las respuestas obtenidas por medio de este estudio de caso, las cuales fueron en su totalidad positivas.

Gracias a esto, se confirma la viabilidad de implementar una plataforma de robótica móvil para la realización de prácticas, tanto de control digital, como de control inteligente en el programa de ingeniería electrónica de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.

CAPITULO V: TEST Y RESULTADOS DE LOS CONTROLADORES

Con el fin de obtener resultados sobre el funcionamiento de los controladores tanto como el difuso y PID, se efectuó un plan de pruebas desarrollado en dos etapas; la primera es verificar la conexión entre la computadora y el cuadricóptero; para la segunda se realizó la toma de múltiples datos ya con el cuadricóptero en vuelo con el fin de guardar la información en la computadora para posteriormente analizar el desempeño de los controladores implementados.

5.1 PRUEBA DE CONEXIÓN.

En esta fase se verifico la comunicación entre la aeronave y la computadora con la finalidad de guardar los datos que el cuadricóptero envía. Para esto se utilizó un módulo bluetooth HC-06 como emisor en el cuadricóptero y como receptor el HC-05 conectado a un Arduino UNO, este a su vez envía la información a la computadora a través del puerto serie. En la figura 84 se observa una representación de la conexión implementada.

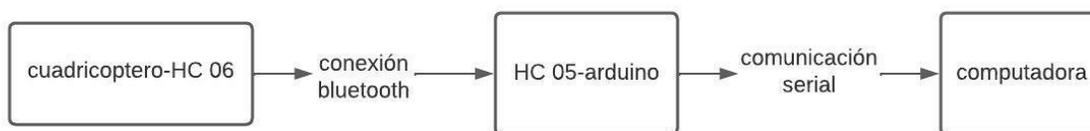


Figura 84 conexión serial dron-computadora

Una vez verificada la conexión se procede guardar los datos recibidos, para esto se utilizó el programa *CoolTerm* que es una herramienta de comunicación de puerto serie que permite visualizar los datos recibidos además de guardarlos automáticamente en formato *txt*. En la figura 85 dibujo A se observa la pantalla principal del programa.

Para configurar las opciones del puerto serie se debe dirigir a *connection -> options* y abrirá la ventana que se visualiza en la figura 85 dibujo B. Para este caso el puerto es el COM3 y la velocidad a la que se transmite es de 9600 baudios.

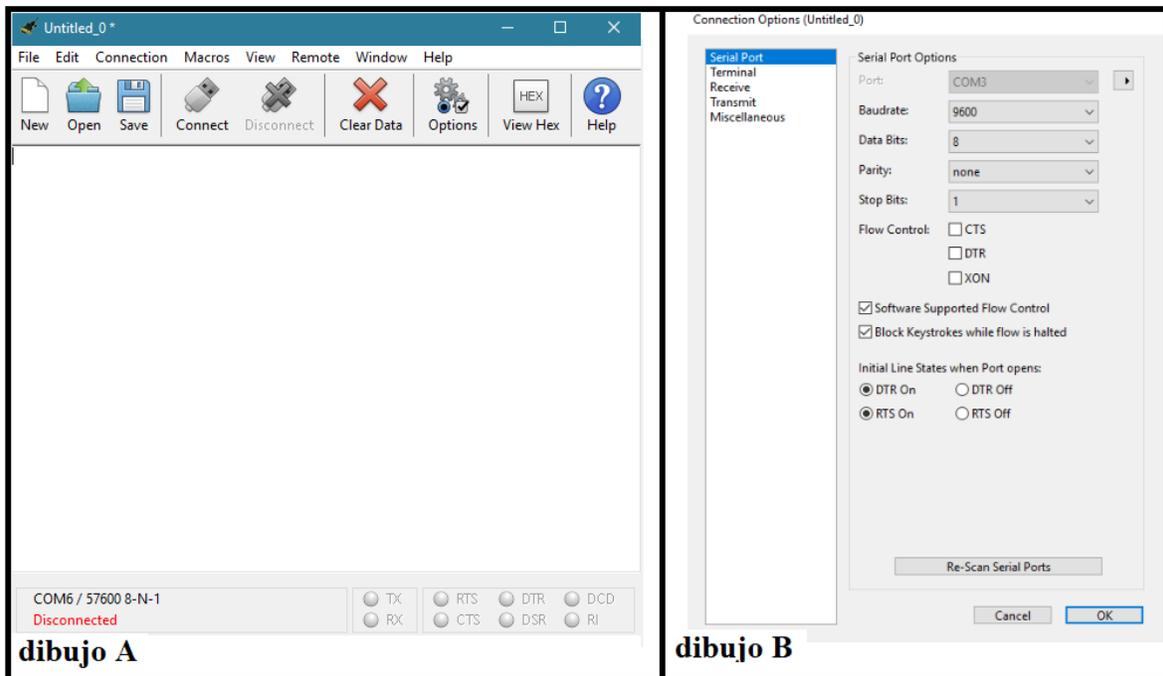


Figura 85 configuración de puerto

Luego de configurar el puerto serie se procede guardar los datos dirigiéndose a *connection -> capture to Text/Binary File->Start* como se observe en la figura 86.

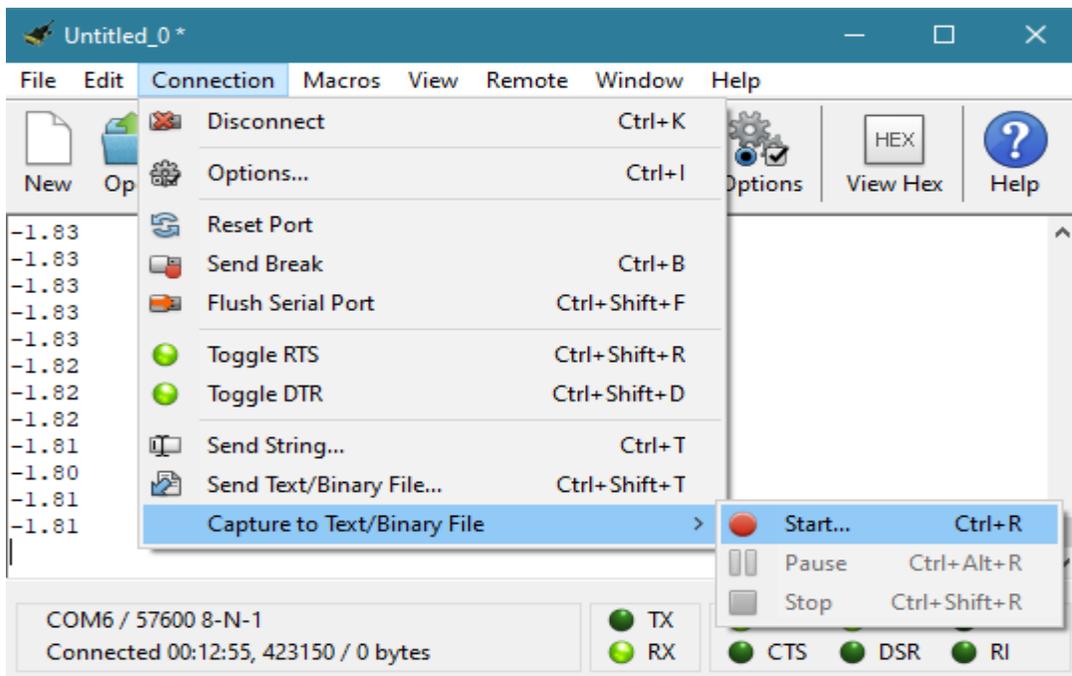


Figura 86 almacenamiento de datos recibidos

Las variables enviadas por el cuadricóptero son los ángulos pitch, roll y las señales de referencia para cada uno de estos. Los datos son separados por una coma ‘,’ y su orden de envío es el siguiente: (anguloX, anguloY, spX, spY). En la figura 87 se observa que el ángulo en X varía entre los (-1.80°), (-1.82°), el ángulo Y varía entre (-0.89°), (-0.91°) y la señal de referencia tanto para el ángulo X como de Y es 0.

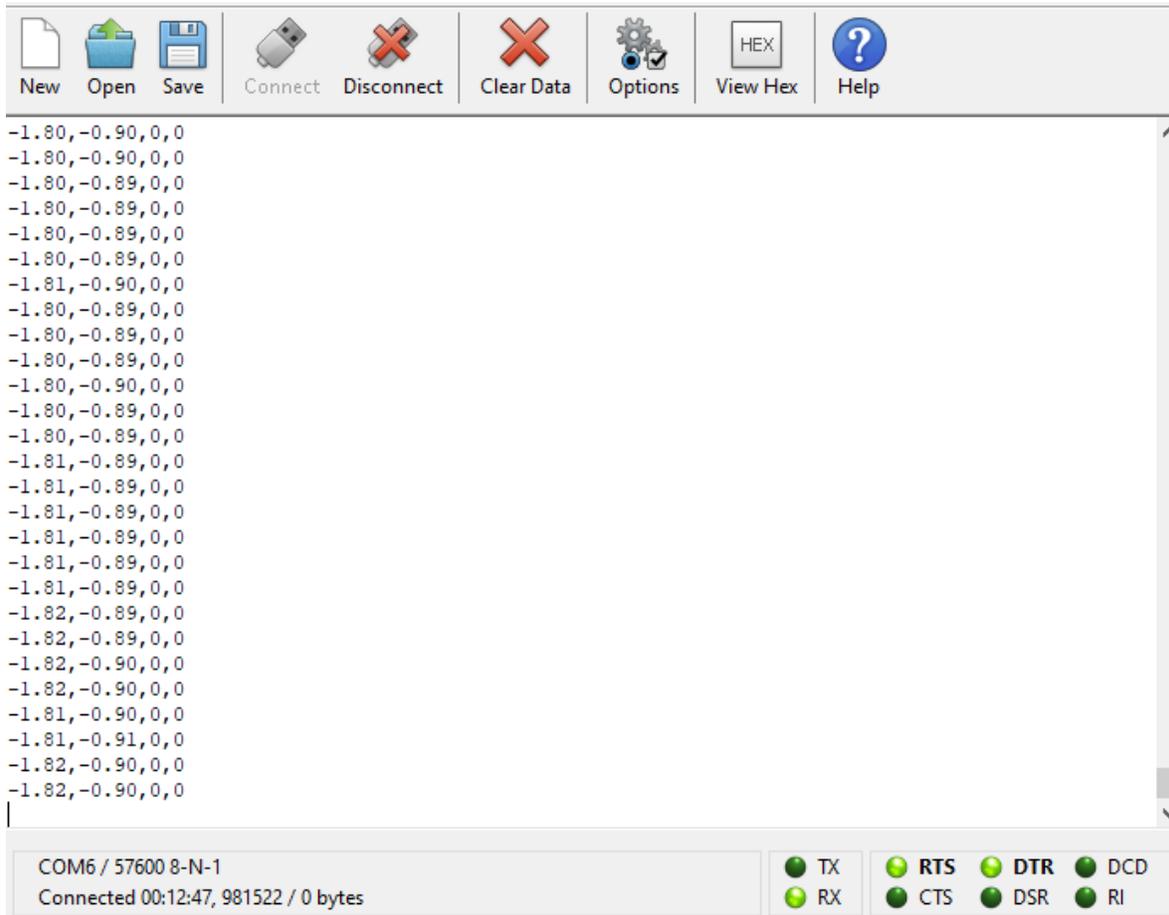


Figura 87 variables enviadas por el cuadricóptero

Si siguiendo los pasos de esta sección es posible realizar la conexión entre el cuadricóptero y el PC asegurándose así de tener los datos en formato *txt* que después serán utilizados para analizar el desempeño de los controladores implementados.

5.2 PRUEBA DE DESEMPEÑO DE LOS CONTROLADORES FUZZY Y PID.

Para esta segunda fase se realizó la prueba de desempeño de ambos controladores. Primeramente, se establece la conexión entre el cuadricóptero y la PC con la finalidad de recolectar la información que el cuadricóptero envía, seguido se pone en vuelo la aeronave primeramente con el control difuso y seguido con el control PID.

5.2.1 Control FUZZY

Para esta práctica solamente se controlan los ángulos pitch, roll y se deja de lado a yaw puesto que al implementar tres controladores difusos o uno para cada ángulo al momento de compilar arroja un error que indica que la memoria del microcontrolador se ha llenado. Por otra parte, la metodología que se siguió para establecer las reglas de control fue a través de la tabla FAM que se anuncia en el capítulo 3.

La experimentación se dio al cambiar la posición de las funciones de membrecía a lo largo del universo de discurso para las variables de entrada “error”, “cambio del error” y la variable de salida “PWM”. Inicialmente se dejó la configuración por defecto que pone Xfuzzy para las funciones de membrecía, que es una distribución uniforme a lo largo del universo de discurso. En la figura 88 se observa los valores que Xfuzzy inicialmente les da y que se enumeran desde p [0] a p [4].

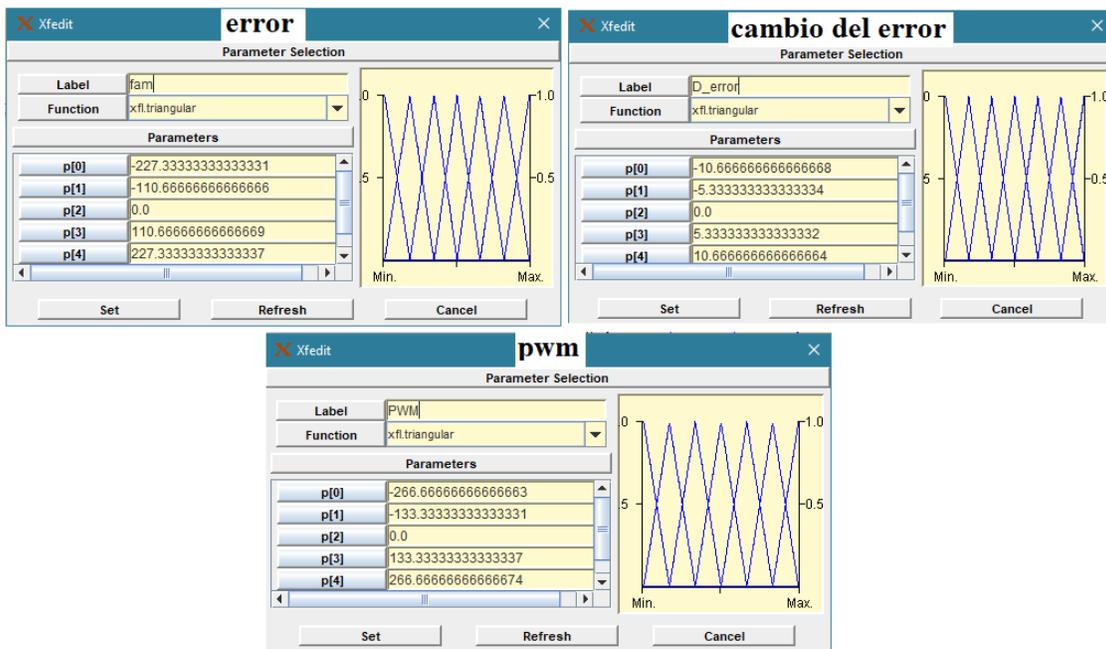


Figura 88 experimentación con funciones de membrecía

Se experimentó con estos valores, pero el control no fue el mejor, el cuadricóptero no permanecía estable y se notaban sobre oscilaciones, signos de que los valores que pone por defecto Xfuzzy no eran los adecuados. Tras realizar varias pruebas modificando los parámetros el control fue mejorando, aunque por alguna razón el cuadricóptero en estado de vuelo tiende a desplazarse hacia delante y al lado derecho. El motivo más probable es que se encuentre más peso en la parte delantera y al lado derecho del cuadricóptero, finalmente no se consiguió mejora alguna para este problema y para estabilizar la aeronave en una posición fija se debe realizar manualmente desde el radio control. En la figura 89 se presentan los valores óptimos que se encontraron experimentalmente con sus respectivas graficas de las funciones de pertenencia en cada variable. Cabe destacar que los valores encontrados se utilizaron tanto para el ángulo *pitch* como para *roll*.

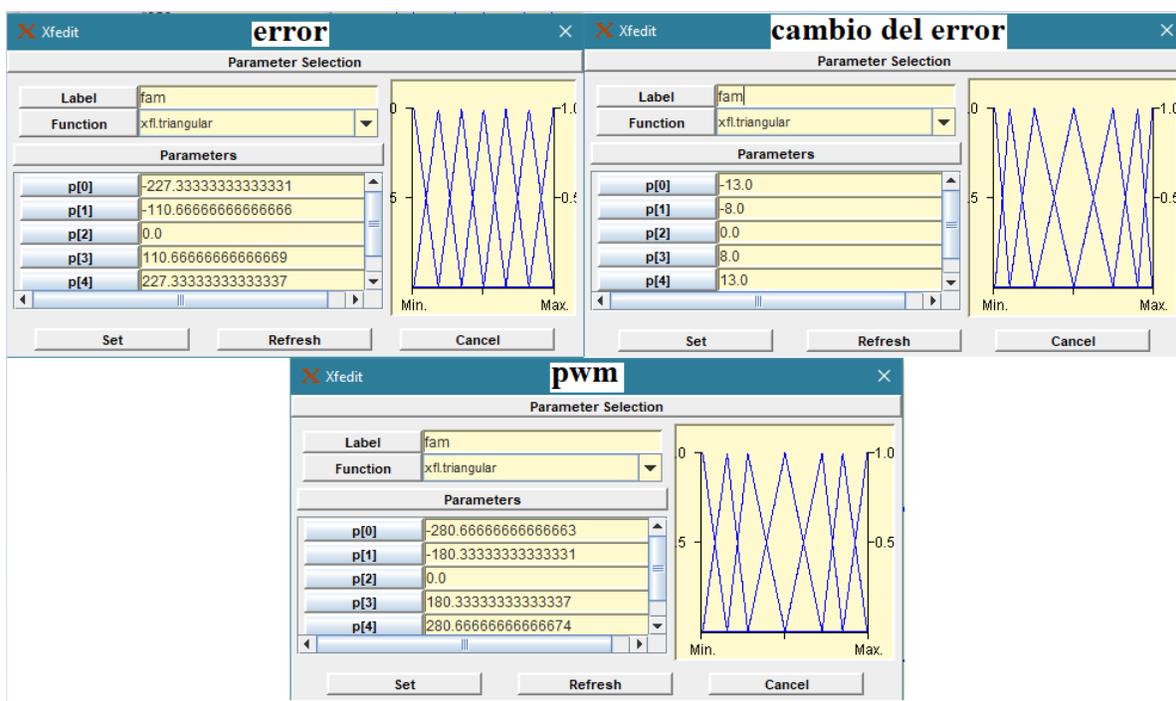


Figura 89 valores de experimentación óptimos

Para probar estos valores encontrados experimentalmente se voló el cuadricóptero aproximadamente 40 segundos, donde primero se le dio dos valores de referencia para el eje *pitch*, el primer valor fue de 20° y seguido se le dio un valor de -10° , en otras palabras, inclinar primero el cuadricóptero hacia adelante 20° y seguido hacia atrás -10° . Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 90.

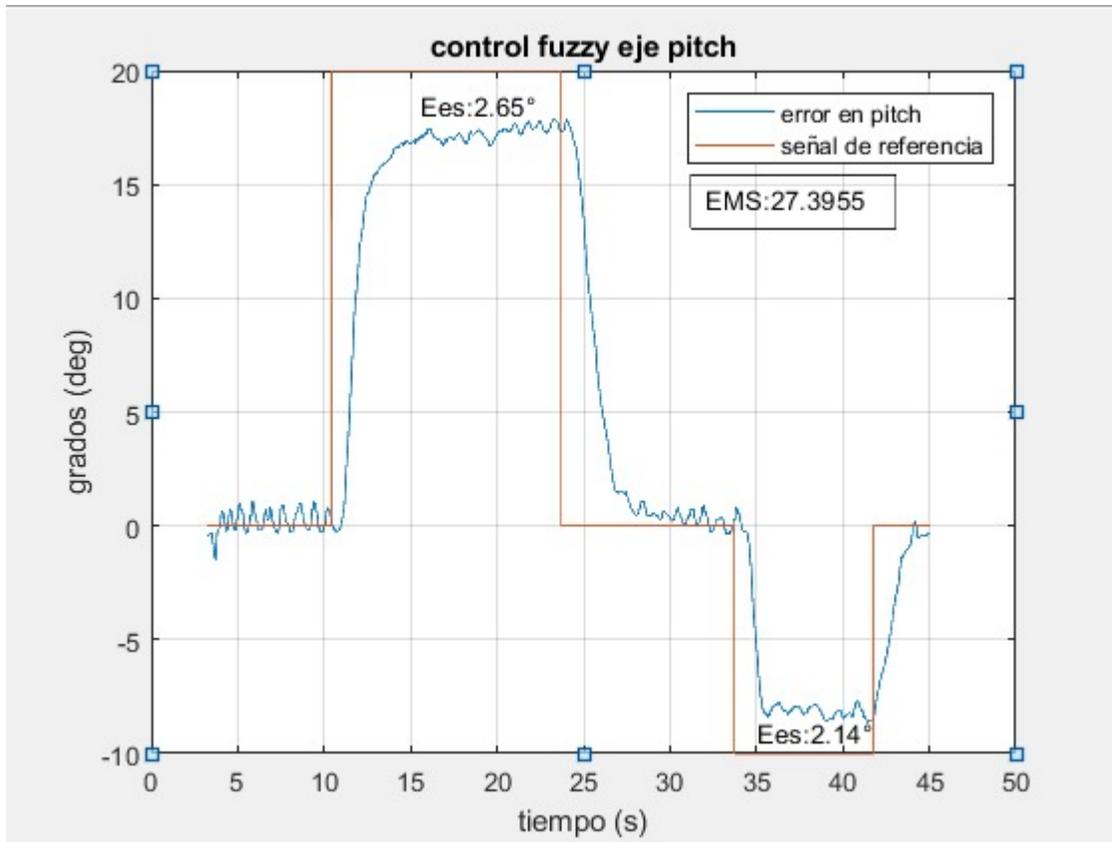


Figura 90 Grafica Control fuzzy, ángulo pitch, diseño propio

Como se puede observar el controlador difuso no alcanza el valor de referencia dando un error en estado estacionario (Ees) de 2.65° para el valor de referencia de 20° y 2.14° para el valor de referencia de -10° . Es posible atribuir este error de estado estacionario a la falta de una acción integral ya que este controlador solo toma en cuenta el error actual y el cambio del error.

La misma prueba se aplicó para el eje *roll* donde también se voló el cuadricóptero unos 40 segundos aplicándole dos valores de referencia 15° y 10° . Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 91.

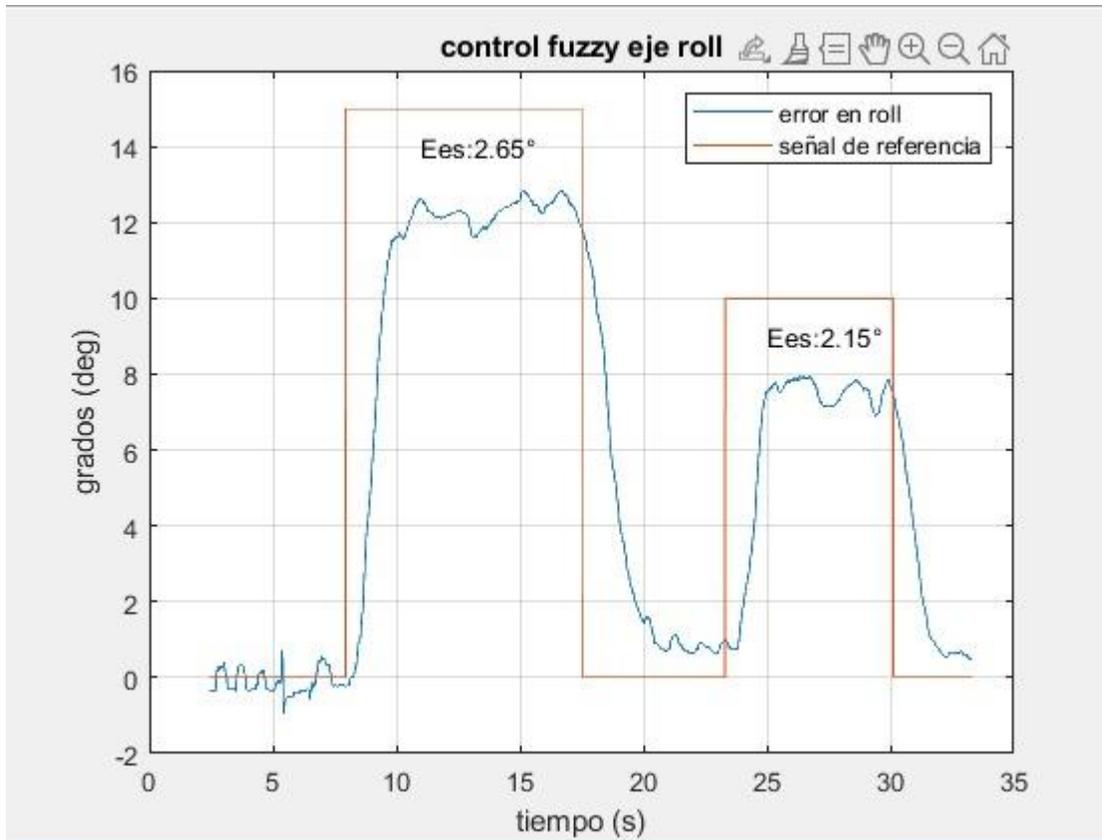


Figura 91 Grafica Control fuzzy, ángulo roll, diseño propio

El resultado para este eje también deja un error en estado estacionario de 2.65° y 2.15° para los valores de referencia de 15° y 10° respectivamente.

5.2.2 Control PID

En este apartado se explicará la manera de encontrar las ganancias proporcional, integral, derivativa que mejor se adapten a este sistema. El método es totalmente experimental, así que se trata de realizar una secuencia de pruebas hasta dar con el mejor resultado de control.

Primero se colocó todas las ganancias a cero excepto la proporcional que se estableció en 1 para los ejes (*pitch*, *roll*). El resultado de esta prueba fue que se obtuvieron fuertes oscilaciones en estos ejes.

Después se tomó el cuadricóptero manualmente para así simular los movimientos en los ejes *pitch*, *roll*, al hacer esto se notó que cuando el cuadricóptero se acercaba al valor deseado no disminuía la velocidad en los motores correspondientes, luego, al sobrepasar el valor de

referencia activaba los motores con demasiada fuerza para intentar corregir el error, pero nuevamente sobrepasaba el valor deseado produciendo así oscilaciones.

Así que se decidió manipular la acción derivativa ya que esta se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error. Inicialmente se colocó la acción derivativa tanto para el eje pitch como para roll a un valor de cuatro, nuevamente se tomó el cuadricóptero con la mano para girarlo, al hacer esto se notó una fuerza leve y opuesta al sentido de giro, esta se iba incrementando a medida que se acercaba al valor de referencia. Debido a esto se decidió aumentar mucho más el valor de la acción derivativa ya que esta fuerza era leve e insuficiente para contrarrestar la inercia producida.

El nuevo valor fue de 12, se realizó el mismo procedimiento experimental y se notó que esta fuerza producida por la acción derivativa era mucho más fuerte, así que se decidió realizar el primer vuelo con las constantes proporcional igual a 1, integral igual a 0 y derivativa con un valor de 12, los valores de las constantes fueron los mismo para el eje *pitch* y *roll*.

El resultado fue que el cuadricóptero al volar seguía teniendo oscilaciones leves, así que se aumentó la acción derivativa a 17. Debido a que las oscilaciones disminuyeron notoriamente se decidió dejar este valor.

El primer paso que se realizó para encontrar la acción integral fue poner su valor en 1, se probó con este valor y el resultado fue de fuertes oscilaciones para los ejes pitch, roll. En ese momento se pensó en una posible falla con el proceso de cálculo para integrar el error así que se imprimió este valor en la pantalla del ordenador haciendo uso del puerto serial. Lo que se observó fue que este valor incrementaba muy rápido, tanto que en 3 segundos llegaba a valores de 80.000, esto pasa debido a que el tiempo de ejecución para cada ciclo es de 4ms, provocando así que cada 4ms se acumule el error. Después de esto se modificó el valor de la acción integral a 0.001 con el fin de reducir el crecimiento tan acelerado que se tiene al integrar el error. El mejor resultado se obtuvo con los valores de 1, 0.001, 17 para las acciones proporcional, integral, derivativa respectivamente.

Para probar este controlador se le dio dos valores de referencia para el eje *roll*, el primero fue de 25° y el segundo de 32°. El resultado de esta prueba se observa la figura 92.

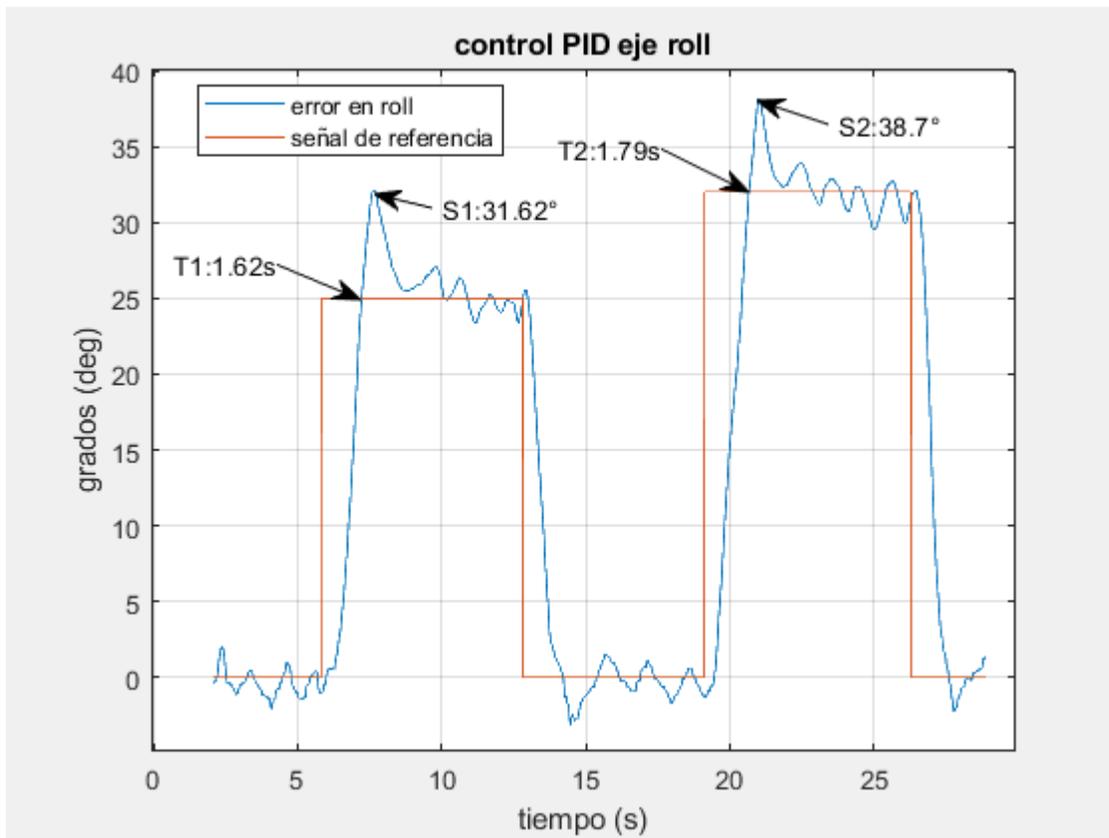


Figura 92 Grafica Control PID, ángulo roll, diseño propio.

Los resultados de esta prueba arrojan la siguiente información:

- El tiempo de subida es 1.62s para el primer valor de referencia y de 1.79s para el segundo valor de referencia.
- El sobre impulso es de 6.62° para el primer valor de referencia y de 6.7° para el segundo valor de referencia.
- El sistema logra llegar a los valores establecidos, pero oscila sobre él.

Esta misma prueba fue realizada para el eje *pitch* donde se le dio dos valores de referencia, el primero fue de 20° y el segundo de -10°. Los resultados de este experimento se observan en la figura 93.

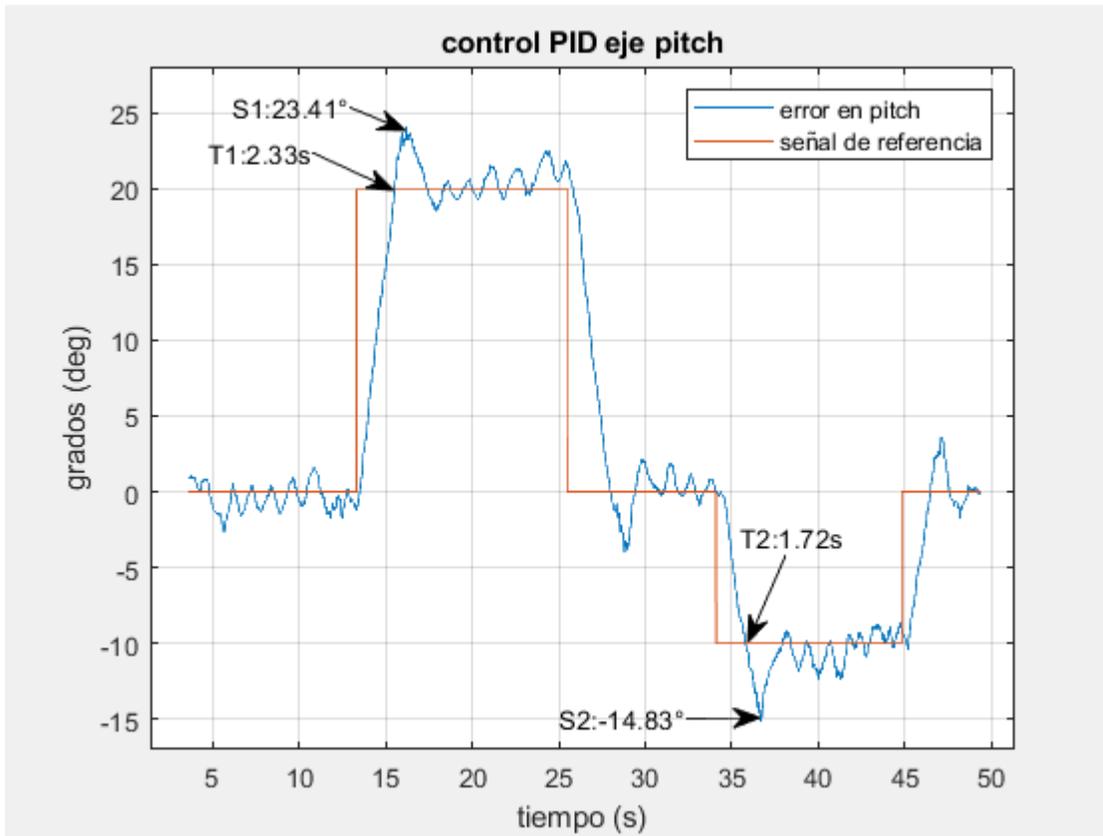


Figura 93 Grafica Control PID, ángulo pitch, diseño propio.

Analizando la gráfica se puede deducir lo siguiente:

- El tiempo de llegada para para el primer valor de referencia es de 2.33s y para el segundo valor de referencia fue de 1.72s.
- El sobre impulso para el primer valor de referencia fue de 3.41° y para el segundo fue de 4.83°.
- Se puede observar que el sistema logra llegar a los puntos establecidos, pero oscilando sobre él.

5.3 COMPARACIÓN ENTRE FUZZY Y PID

En esta sección se realizará una breve comparación sobre el rendimiento y los problemas que se tuvieron con la implementación tanto del control difuso como el PID:

5.3.1 Comparación sobre el rendimiento

Según los resultados expuestos en la sección 5.2.1 el control difuso no alcanzaba el valor de referencia, dejando un error en estado estacionario de aproximadamente 2.5° , mientras tanto el control PID logra llegar al valor deseado. Por otro lado, el control difuso ocupa mucho espacio en la memoria flash del microcontrolador. En la figura 94 se observa la información que brinda STM32cubeIDE al compilar el código del control difuso y el PID.

The image shows two screenshots from STM32CubeIDE's memory usage tool. The top screenshot is for 'control_fuzzycontimer2.elf' and the bottom is for 'control_PID.elf'. Both show memory regions for RAM and FLASH with their respective start/end addresses, sizes, and usage percentages.

control_fuzzycontimer2.elf - /control_fuzzycontimer2/Debug - Jun 29, 2022, 10:45:07 AM						
Memory Regions	Memory Details					
Region	Start address	End address	Size	Free	Used	Usage (%)
RAM	0x20000000	0x20005000	20 KB	15.9 KB	4.1 KB	20.51%
FLASH	0x08000000	0x08010000	64 KB	5.98 KB	58.02 KB	90.65%

control_fuzzy

control_PID.elf - /control_PID/Debug - Jun 29, 2022, 10:48:47 AM						
Memory Regions	Memory Details					
Region	Start address	End address	Size	Free	Used	Usage (%)
RAM	0x20000000	0x20005000	20 KB	16.16 KB	3.84 KB	19.20%
FLASH	0x08000000	0x08010000	64 KB	22.08 KB	41.92 KB	65.50%

control_PID

Figura 94 rendimiento control PID vs fuzzy, diseño propio.

También se realizó una prueba de rapidez para saber que controlador se ejecuta más rápido, las herramientas e instrumentos que se ocuparon para este experimento fue un osciloscopio digital y el microcontrolador stm32f103c8t6 para embeber el código. El microcontrolador se configuro a una frecuencia de reloj de 72Mhz.

El resultado de este experimento se observa en la figura 95.

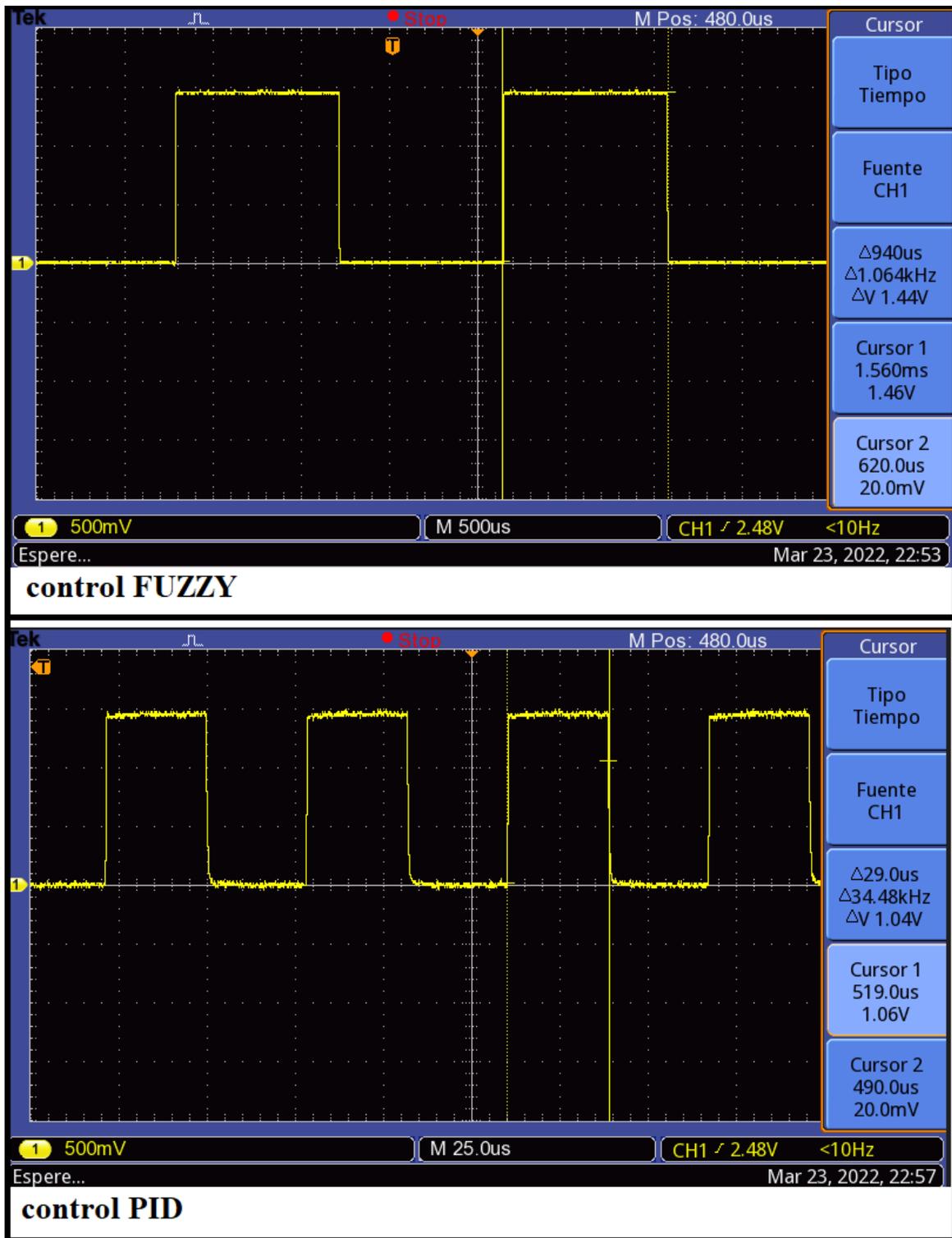


Figura 95 tiempo de ejecución control PID vs fuzzy, diseño propio.

Según los datos que se observan en la figura 95 es posible deducir que el control PID es mucho más rápido en términos de tiempo de ejecución que el difuso, dando así una frecuencia de 34.48kHz para el PID y de 1.064kHz para el control difuso.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

La inclusión de las tecnologías de la información y comunicación TIC abrió camino al uso de herramientas educativas como la robótica móvil, apoyando los contenidos temáticos correspondientes a la educación universitaria. En base a esto se desarrolló una plataforma educativa donde los estudiantes tienen la oportunidad de afianzar sus conocimientos en sistemas de control y electrónica en general de manera didáctica, haciendo uso de un cuadricóptero, para el cual se desarrollaron dos guías donde el estudiante o docente se puede instruir respecto a cómo se realizó el diseño, tanto de software como de hardware del prototipo, enfatizando principalmente la temática de los sistemas de control fuzzy y PID.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede afirmar que el trabajo cumplió de manera satisfactoria con los objetivos propuestos dado que:

1. Durante el desarrollo de las practicas con el prototipo y gracias al estudio de caso realizado se evidenciaron ciertas características que son necesarias para la implementación de una plataforma robótica, las cuales se mencionan a continuación.
 - Los estudiantes que le den uso a la plataforma robótica deben tener un conocimiento básico en controladores.
 - La plataforma debe contar con una metodología donde se den a conocer los fundamentos teóricos antes de realizar prácticas.
 - La Interacción con el prototipo proporciona un aprendizaje ameno y motivacional en los estudiantes según el estudio realizado.
 - Se debe dejar plasmado en uno o varios documentos las instrucciones de cómo llevar a cabo la práctica, pensando en los estudiantes de semestres inferiores que en un futuro puedan llegar a realizarla.

2. Inicialmente se pensaba realizar la plataforma haciendo énfasis únicamente en el controlador difuso, pero en definitiva se decidió añadir un control PID, teniendo así dos opciones, gracias a esto los estudiantes pudieron observar el cuadricóptero en acción haciendo uso de dos controladores diferentes, lo cual le da un valor añadido al trabajo.
3. La metodología utilizada para integrar la plataforma robótica se dio mediante practicas con el prototipo, reuniendo un grupo de estudiantes de noveno semestre a los cuales se les dio a conocer el trabajo a través de una presentación en el aula de clase, donde se explicaron los aspectos fundamentales de los controladores PID y difuso, seguidamente los estudiantes se dividieron en grupos de 4 aproximadamente, para que de esta manera pudieran ser instruidos por los orientadores respecto a las características principales de ambos controladores interactuando con el prototipo.
4. Para un desarrollo integral de la plataforma se pone a disposición de los estudiantes un par de guías basadas en la estructura del cuadricóptero y los sistemas control utilizados.

La guía 1 se centra en el control PID, sus objetivos son:

- Identificar el comportamiento dinámico del dron.
- Experimentar la implementación del PID en un dron.

La guía 2 se centra en el control difuso, sus objetivos son:

- Diseñar un controlador difuso mediante el programa Xfuzzy.
- Experimentar la implementación de un controlador difuso para cuadricóptero.

5. El diseño de las guías se hizo siguiendo el formato de los laboratorios institucionales, en estas guías el estudiante podrá encontrar los pasos que debe seguir para implementar el controlador, tanto PID como difuso, ambas guías cuentan con ayudas audiovisuales para hacer más entendible los procedimientos que se realizan.
6. La evaluación de la metodología aplicada se hizo mediante una encuesta de satisfacción realizada a 13 estudiantes de noveno semestre y 7 de decimo semestre en la facultad de ingeniería electrónica, los cuales tuvieron la oportunidad de interactuar con el prototipo. Los resultados arrojados por el estudio de caso fueron totalmente positivos.
7. La validación de la plataforma se realizó mediante las practicas con el prototipo, en ellas participaron 21 estudiantes en total, pero debido a que la herramienta propuesta es una plataforma didáctica se cree que la población de muestreo debería ser mayor.

6.1.1 Trabajos futuros

En esta sección se plantean las posibles líneas de investigación que se podrían derivar de este trabajo de grado.

1. Desarrollar un control de altura mediante un sensor barométrico o ultrasónico para conseguir estabilizar el dron a una altura deseada.
2. Desarrollar un control de posición mediante el uso de sensores como el magnetómetro y GPS, para así obtener la ubicación en tiempo real del cuadricóptero y a su vez lograr un posicionamiento estable en lugares alejados que están fuera del campo visual del piloto.
3. Mediante el uso de los sensores de posicionamiento desarrollar un algoritmo para seguimiento de trayectorias.
4. Desarrollar el algoritmo de control fuzzy utilizando un microcontrolador de mayor gama.
5. Implementar el código generado por Xfuzzy en un compilador con lenguaje VHDL para posteriormente embeberlo en el cuadricóptero y realizar pruebas.
6. Realizar la validación de la plataforma tomando una población mayor a 21 estudiantes para así tener un análisis más robusto respecto a la plataforma diseñada y a la metodología propuesta en este trabajo.

6.1.2 GLOSARIO DE ACRONIMOS

RE: Robótica Educativa

TIC: Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

DMR: Drones Multi Rotor

PAI: Programa de Ingeniería Electrónica

ESC: *Electronic Speed Controllers*

CW: *Clock Wise* (sentido horario)

CCW: *Counter-ClockWise* (sentido antihorario)

PWM: *Pulse-Width Modulation*

I2C: *Inter-Integrated Circuit*

SDA: *System Data*

SCL: *Sistem Clock*

MOSI: *Master Output Slave Input*

MISO: *Master Input Slave Output*

FIR: *Finite Impulse Response*

RF: Radiofrecuencia

PID: Proporcional Integral Derivativo

SP: *SetPoint*

MCU: *Microcontroller Unit*

FAM: *Fuzzy Association Matrix*

DMA: *Direct Memory Access*

ISM: bandas de radio industriales, científicas y médicas

ANEXO A: GUIAS DE LABORATORIO, CONTROL DIFUSO Y PID

 Uniautónoma DEL CAUCA	LABORATORIOS INSTITUCIONALES Corporación Universitaria Autónoma del Cauca Dirección de Laboratorios	GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO
		Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Electrónica

Nombre del Curso:	Guía No.	G-IE-CI-02
Semestre:	Laboratorio:	Electrónica básica y de Potencia (801)
Ubicación:	Sede Laboratorios Ingenierías– Carrera 3 No. 2-60,	
Área de Formación:	Ingeniería de control	
Duración:	2 horas	
Nombre de la Práctica:	Control difuso en un quadricóptero	

CONTROL DIFUSO EN UN CUADRICOPTERO

INTRODUCCIÓN

Esta guía fue realizada en el marco del trabajo de investigación titulado “ANÁLISIS DEL USO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA TIPO DRON MULTI ROTOR COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN EL APRENDIZAJE DE TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO PARA EL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA”. El objetivo es servir como herramienta de apoyo para el aprendizaje de los estudiantes y/o docentes en las materias de control y afines, debido a que el diseño de un cuadricóptero implica una amplia gama de conocimientos sobre los sistemas de control y electrónica en general. Con el desarrollo de esta guía el estudiante podrá afianzar los conocimientos sobre control inteligente y robótica móvil.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

	LABORATORIOS INSTITUCIONALES Corporación Universitaria Autónoma del Cauca Dirección de Laboratorios	Corporación Universitaria Autónoma del Cauca GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO
		Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Electrónica

OBJETIVOS

- Diseñar un controlador difuso mediante el programa Xfuzzy
- Experimentar la implementación de un controlador difuso para cuadricóptero

CONSULTAS PRELIMINARES

Antes de desarrollar esta guía el estudiante deberá consultar lo siguiente:

1. Guía No. 1 pagina 3 a la 10
https://docs.google.com/document/d/1vjOpr_WNbufQIQDXLJcfsPwYt0sXoRmp/edit?usp=sharing&oid=113818962502621400741&rtpof=true&sd=true
 2. lógica difusa
- ✓ Listado de páginas sugeridas para realizar las consultas
1. <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=97>
 2. <https://www.youtube.com/watch?v=xLFNUo0mTZE>
 3. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-fuzzy-mamdani-simulink/>

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

HERRAMIENTAS DE SOFTWARE

Para el desarrollo de esta guía el estudiante debe tener instalado en su ordenador los siguientes programas

- ✓ Xfuzzy
- ✓ STM32cubeIDE
- ✓ arduinoIDE
- ✓ STM32 ST-LINK

- ✓ Enlace para descargar Xfuzzy

http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/Xfuzzy_3.0/download_sp.html

- ✓ enlace para descargar el complemento de java para Xuzzy

<https://www.oracle.com/java/technologies/downloads/#jdk17-windows>

- ✓ Algoritmo de Control

<https://drive.google.com/file/d/1eIbVe1IXdNQ7tr2igJyG4XYAGACU5KD9/view?usp=sharing>

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

PROCEDIMIENTO

Una vez revisada la información suministrada anteriormente se procederá realizar los siguientes pasos con el propósito de cumplir los objetivos establecidos para esta práctica.

Paso 1.

Instalación del programa Xfuzzy

Paso 2.

- Explicación del esquema de control difuso a utilizar en el cuadricóptero
- Definición del universo discurso para las variables de entrada del controlador

Paso 3.

Diseño del controlador difuso en Xfuzzy

- Crear un proyecto en Xfuzzy
- Importar el archivo. xfl al programa STM32cubeIDE

Paso 4.

Graficas de los ángulos pitch y roll

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

 Uniautónoma DEL CAUCA	LABORATORIOS INSTITUCIONALES Corporación Universitaria Autónoma del Cauca Dirección de Laboratorios	GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO	Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Electrónica
---	---	--	--

Paso 1.

En este apartado se da una breve introducción al programa Xfuzzy y posteriormente se indica la forma de instalarlo.

Xfuzzy

El software que se usara para diseñar e implementar el controlador difuso se denomina “Xfuzzy”, este programa es un proyecto colaborativo realizado por un gran número de estudiantes de pregrado, posgrado y doctorado de la Universidad de Sevilla que ha sido utilizado como base para actividades docentes y de investigación por parte usuarios de todo el mundo.

- ✓ Para descargar e instalar el programa Xfuzzy ingrese al siguiente enlace el cual lo llevara a un video tutorial realizado por los autores de esta guía donde se indica el paso a paso.

<https://www.youtube.com/watch?v=Q36isPg7q-0>

“Xfuzzy” se eligió debido a que su archivo final ocupa poco espacio en la memoria RAM del microcontrolador, existen otras alternativas como Matlab, pero este programa genera un archivo demasiado grande haciendo que el procesado de las tareas sea más lento.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Paso 2.

En este apartado se explicará el esquema de control difuso aplicado al cuadricóptero. Como se puede ver en la figura 96 las entradas que tiene el controlador son el error y el cambio del error, estas dos variables son utilizadas para definir la respuesta del controlador.

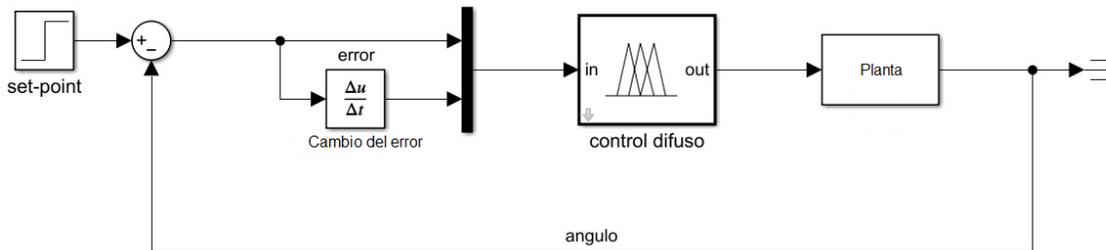


Figura 96 esquema de control difuso para el cuadricóptero, diseño propio.

Dentro del control difuso se reciben las dos variables mencionadas anteriormente y una variable adicional como parámetro de salida. ver figura 97.

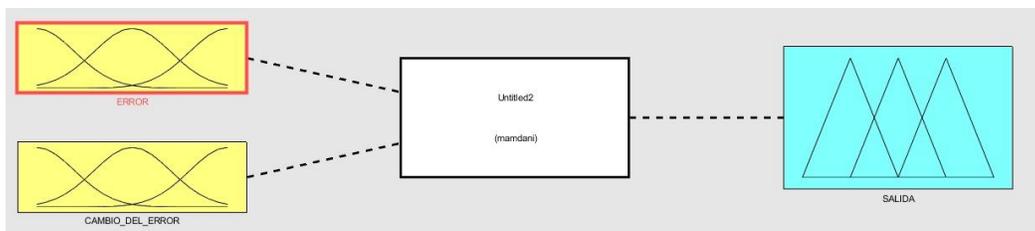


Figura 97 método de inferencia, diseño propio.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

**GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN
CUADRICOPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Para las variables “error, cambio del error y salida” se consideró dar 7 funciones de membresía para cada una, las cuales son representadas en la siguiente tabla.

	ERROR	CAMBIO DEL ERROR	SALIDA
1	N_error_3	N_Cerror_3	N_salida_3
2	N_error_2	N_Cerror_2	N_salida_2
3	N_error_1	N_Cerror_1	N_salida_1
4	Z_error_0	Z_Cerror_0	Z_salida_0
5	P_error_1	P_Cerror_1	P_salida_1
6	P_error_2	P_Cerror_2	P_salida_2
7	P_error_3	P_Cerror_3	P_salida_3

Tabla 1 funciones de membresía, diseño propio.

Definición del universo discurso para las variables de entrada del controlador

En este apartado encontrara dos enlaces, los cuales lo llevaran hacía unos videos realizados por los autores, donde se explica cómo se encontró el universo discurso de cada una de las variables de entrada “**error, cambio del error**”

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
**GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN
CUADRICOPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Variable cambio del error

<https://www.youtube.com/watch?v=QUFMIOScRF0>

<https://www.youtube.com/watch?v=bap9uvZvOuE>

Variable error

<https://www.youtube.com/watch?v=IW7FWmkV0os>

<https://www.youtube.com/watch?v=ENLD4Sx3eq8>

Para la variable de entrada “ERROR” se decidió utilizar funciones de membresía tipo triangulares y el universo de discurso de esta variable se define entre -300 y 300 como se ve en la figura 98.

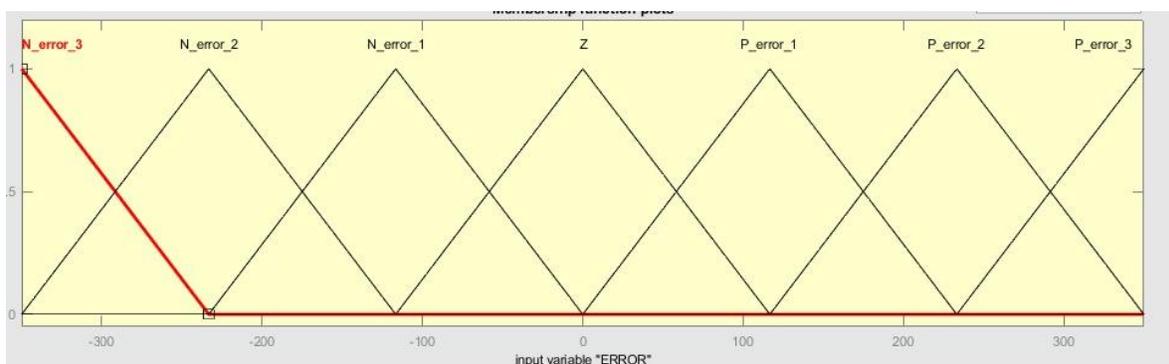


Figura 98. funciones de membresía para la variable de entrada “ERROR”, diseño propio.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
**GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN
CUADRICOPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Para la variable de entrada “CAMBIO_DEL_ERROR” se decidió utilizar funciones de membresía tipo triangulares y el universo de discurso de esta variable se define entre -16 y 16 como se ve en la figura 99.

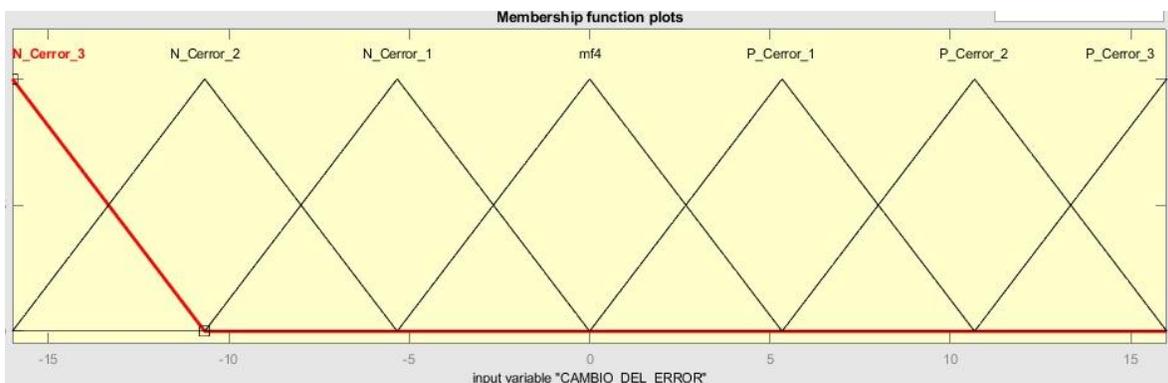


Figura 99 funciones de membresía para la variable de entrada “CAMBIO_DEL_ERROR”, diseño propio.

Para la variable de salida “SALIDA” se decidió utilizar funciones de membresía tipo triangulares y el universo de discurso de esta variable se define entre -400 y 400 como se ve en la figura 100.

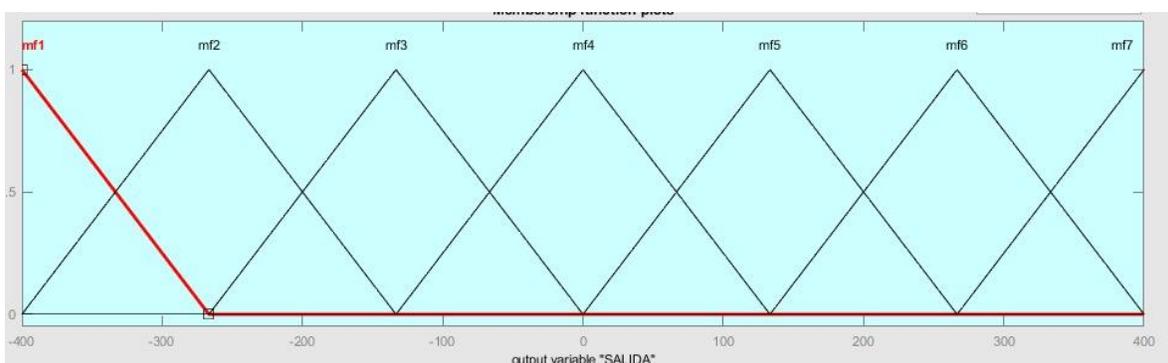


Figura 100 funciones de membresía para la variable de entrada “SALIDA”, diseño propio.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Una vez definidas las funciones de membresía para las variables” ERROR, CAMBIO_DEL_ERROR Y SALIDA” se procede a realizar las reglas de inferencia utilizando una matriz de 7x7, ver tabla 2.

R_cambio_error								
R_error		<i>N_Cerror_3</i>	<i>N_Cerror_2</i>	<i>N_Cerror_1</i>	<i>Z_Cerror_0</i>	<i>P_Cerror_1</i>	<i>P_Cerror_2</i>	<i>P_Cerror_3</i>
<i>N_error_3</i>		N_salida_3	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0
<i>N_error_2</i>		N_salida_3	N_salida_3	N_salida_3	N_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1
<i>N_error_1</i>		N_salida_3	N_salida_3	N_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2
<i>Z_error_0</i>		Z_salida_3	Z_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2	P_salida_3
<i>P_error_1</i>		N_salida_2	N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2	P_salida_3	P_salida_3
<i>P_error_2</i>		N_salida_1	Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2	P_salida_3	P_salida_3	P_salida_3
<i>P_error_3</i>		Z_salida_0	P_salida_1	P_salida_2	P_salida_3	P_salida_3	P_salida_3	P_salida_3

Tabla 2 reglas de inferencia, diseño propio.

La elaboración de las reglas se hizo siguiendo la metodología de la tabla **FAM** (Fuzzy Association Matrix), esta metodología involucra todas las combinaciones posibles que puedan presentarse durante el proceso. a través de los antecedentes de la primera fila y la primera columna, se da como resultado la intersección entre los antecedentes involucrados, por ejemplo, para las primeras tres reglas se constituyen de la siguiente manera.

4. IF (ERROR is N_ERROR_3) and (CAMBIO_DEL_ERROR is N_Cerror_3) then (SALIDA is N_salida_3)
5. IF (ERROR is N_ERROR_3) and (CAMBIO_DEL_ERROR is N_Cerror_2) then (SALIDA is N_salida_3)
6. IF (ERROR is N_ERROR_3) and (CAMBIO_DEL_ERROR is N_Cerror_1) then (SALIDA is N_salida_3)

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
**GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN
CUADRICOPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Paso 3.

Diseño del controlador difuso en Xfuzzy

En este apartado se explica cómo se diseñó el controlador difuso para el cuadricóptero en el programa Xfuzzy, para ello debe ingresar al siguiente enlace, el cual lo llevara hacia un video tutorial realizado por los autores donde se indica el paso a paso.

<https://www.youtube.com/watch?v=-R9Dg7H6XNo>

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

 <p>Uniautónoma DEL CAUCA</p>	<p>LABORATORIOS INSTITUCIONALES Corporación Universitaria Autónoma del Cauca Dirección de Laboratorios</p>	<p>Corporación Universitaria Autónoma del Cauca GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO</p>	<p>Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Electrónica</p>
--	--	--	--

Paso 4.

En este apartado se deben presentar las gráficas correspondientes para los ángulos de navegación pitch y roll.

Grafica pitch

Grafica roll

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

	LABORATORIOS INSTITUCIONALES Corporación Universitaria Autónoma del Cauca Dirección de Laboratorios	Corporación Universitaria Autónoma del Cauca GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO
		Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Electrónica

PREGUNTAS: (responder las siguientes preguntas basado en la experiencia de la práctica y las lecturas realizadas).

1. las reglas difusas se hicieron mediante _____ la cual compromete todas las combinaciones posibles que pueden presentarse en el proceso.

2. ¿Qué variables de entrada utiliza el controlador difuso para generar una señal correctiva en los ángulos pitch, roll del cuadricóptero?

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

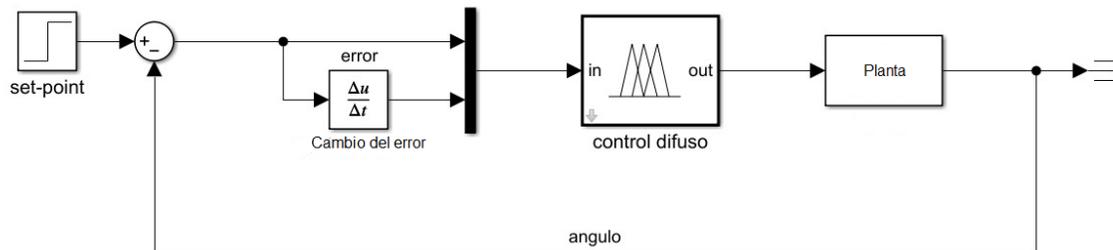


LABORATORIOS INSTITUCIONALES
 Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
 Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO

Facultad de Ingeniería
 Programa de Ingeniería Electrónica

3. Describa brevemente el esquema de control utilizado en el cuadricóptero.



4. ¿Como se encontró universo discurso para las variables de entrada “error y cambio del error”?

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

	LABORATORIOS INSTITUCIONALES Corporación Universitaria Autónoma del Cauca Dirección de Laboratorios	Corporación Universitaria Autónoma del Cauca GUIA PARA LA CONSTRUCCION DE UN CUADRICOPTERO
		Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Electrónica

RECOMENDACIONES

- Tener claros los conceptos vistos en el apartado de consultas previas ya que son necesarios para entender la practica
- Atender las recomendaciones del docente
- Realizar las pruebas con los motores en un lugar seguro
- No tocar las hélices mientras están en movimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. a. C. Giraldo, «control automatico educacion,» [En línea]. Available: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-fuzzy-mamdani-simulink/>.
- [2] V. M. C. D. Guzmán, «La lógica difusa en ingeniería:Principios, aplicaciones y futuro,» *Ciencia y Tecnología*, 24(2): 87-107, 2006, p. 22, 2006.
- [3] I. M. D. SEVILLA, «IMSE-CMN,» 2020. [En línea]. Available: http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/Xfuzzy_3.0/download_sp.html.

CONTROL DE EMISIÓN		
Elaboró	Revisó	Autorizó
Camilo López Calvache, Alexander Valencia Jiménez		
Firma	Firma	Firma
Fecha: 04-2022	Fecha:	Fecha:

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Nombre del Curso:	Guía No.	G-IE-SC-01
Semestre:	Laboratorio:	Electrónica básica y de Potencia (801)
Ubicación:	Sede Laboratorios Ingenierías– Carrera 3 No. 2-60,	
Área de Formación:	Ingeniería de control	
Duración:	2 horas	
Nombre de la Práctica:	Estructura y control en un cuadricóptero	

ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN UN CUADRICÓPTERO

INTRODUCCIÓN

Esta guía fue realizada en el marco del trabajo de investigación titulado “ANÁLISIS DEL USO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA TIPO DRON MULTI ROTOR COMO HERRAMIENTA DE APOYO EN EL APRENDIZAJE DE TÉCNICAS DE CONTROL DIFUSO PARA EL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA”. El objetivo es servir como herramienta de apoyo para el aprendizaje de los estudiantes y/o docentes en las materias de control y afines, debido a que el diseño de un cuadricóptero implica una amplia gama de conocimientos sobre los sistemas de control y electrónica en general. Con el desarrollo de esta guía el estudiante podrá afianzar los conocimientos sobre control digital y robótica móvil.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

OBJETIVOS

- Identificar el funcionamiento dinámico de un cuadricóptero
- Experimentar la implementación de un controlador PID para cuadricóptero

CONSULTAS PRELIMINARES

Antes de desarrollar esta guía el estudiante deberá consultar sobre los siguientes temas:

3. *Funcionamiento de un radiocontrol para aerodelismo*
4. *Estructura de drones multirotor tipo cuadricóptero*
5. *Ángulos de navegación de un cuadricóptero*
6. *Control PID en un cuadricóptero*
7. *Microcontrolador STM32f103c8t6*

✓ listado de páginas sugeridas para realizar las consultas

1. *Estructura de drones multirotor tipo cuadricóptero*
<https://www.hispadrones.com/principiantes/aprendizaje-consejos/partes-de-un-dron/>
2. *Ángulos de navegación de un cuadricóptero*
<https://www.recimundo.com/index.php/es/article/view/814/1323>
<https://www.youtube.com/watch?v=gabz6TaaMZA>
3. *radiocontrol*
<https://www.prometec.net/elegir-transmisor-receptor-radio/>

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

4. *Control PID en un cuadricóptero*

http://reaxion.utleon.edu.mx/Art_Calculo_de_variables_de_control_PID_para_Drones_Cuadcopter.ht

5. *Microcontrolador STM32f103c8t6*

<https://www.instructables.com/Setting-Up-Blue-Pill-Board-in-STM32CubeIDE/>

<https://www.youtube.com/watch?v=L2WSd9iZoSE>

HERRAMIENTAS DE SOFTWARE

Para el desarrollo de esta guía el estudiante debe tener instalado en su ordenador los siguientes programas

- ✓ Matlab
- ✓ STM32cubeIDE
- ✓ arduinoIDE
- ✓ STM32 ST-LINK

- ✓ Enlace para descargar el STM32cubeIDE:
<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>

- ✓ Enlace para descargar el STM32 ST-LINK:
<https://www.st.com/en/development-tools/stsw-link004.html>

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

➤ Para descargar el código fuente deberá seguir los siguientes pasos:

1. iniciar sesión con el correo institucional
2. Copiar el enlace en el buscador de Google
3. descargar y luego abrir el archivo desde el STMcubeIDE

<https://drive.google.com/file/d/1S11kooNd8bb2oTFXslr6EdDDh4PC7X9N/view?usp=sharing>

PROCEDIMIENTO

Una vez revisada la información suministrada anteriormente se procederá realizar los siguientes pasos con el propósito de cumplir los objetivos establecidos en esta práctica.

Paso 1

Teoría sobre la configuración de motores y tipo de chasis

Paso 2

Configuración de hélices sobre los motores

Paso 3

Teoría de Movimientos de un cuadricóptero.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Paso 4

Embeber código en el microcontrolador

Paso 5

Visualización de variables

Paso 6.

Encontrar las constantes de los controladores PID para los ángulos de navegación del cuadricóptero.

Paso 1.

En este apartado se explicará la teoría sobre el sentido de giro de los motores para un dron multi rotor tipo cuadricóptero y la configuración del chasis a utilizar.

CONFIGURACIÓN DEL CHASIS A UTILIZAR

Existen diferentes formas de configurar la estructura de un cuadricóptero entre ellas está la configuración en X, cruz y H. para este caso se utilizará el arreglo en X, ya que brinda un campo de vision amplio puesto que los motores no interfieren con la camara si se requiere [1].

En la *figura 101* se puede ver la estructura del dron en configuración X, Este chasis cuenta con dos plataformas perforadas las cuales sostienen de manera firme mediante tornillos las placas de circuitos necesarias para su funcionamiento. En los extremos de cada brazo va ubicado cada motor.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica



Figura 101 Estructura del cuadricóptero, tomado de[55].

Sentido de giro de motores para estructura en x

En la *figura 102* se puede apreciar la ubicación de cada motor enumerados del 1 al 4 y el sentido de giro para cada uno de ellos, se hace de esta manera para mantener la estabilidad del dron.

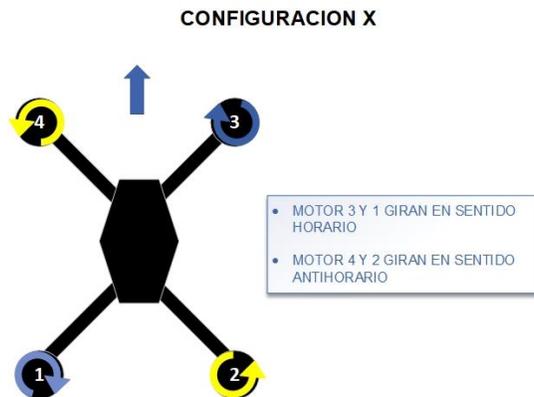


Figura 102 ubicación de los motores para este proyecto, diseño propio

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Paso 2

Una vez verificado el sentido de giro para los cuatro motores se procede a instalar las hélices, en la *figura 103* se indica como ubicarlas, es importante que cada hélice quede instalada en el motor correspondiente de lo contrario se empujaran viento hacia riba.



Figura 103 ubicación de las hélices, tomado de [24].

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

1. Al finalizar el montaje de las cuatro hélices la estructura debería quedar como se ve en la *figura 104*.



Figura 104 montaje completo de los motores y hélices, diseño propio.

- 1.1. Como el el motor gira en sentido antihorario se coloca la hélice que se muestra en la parte superior de la *figura 105*



Figura 105 ubicación de hélice con sentido antihorario, diseño propio.



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Paso 3

Ángulos de navegación en un cuadricóptero

Los cuadricópteros que tengan configuración en X le permiten tener múltiples movimientos; uno de ellos es la translación en el eje vertical, que se produce por la fuerza de empuje producida por los motores. También existen tres movimientos adicionales que se logran por el desequilibrio de fuerzas generadas por los cuatro motores del cuadricóptero, estos movimientos son conocidos como PITCH, ROLL, YAW. ver *figura 106*.

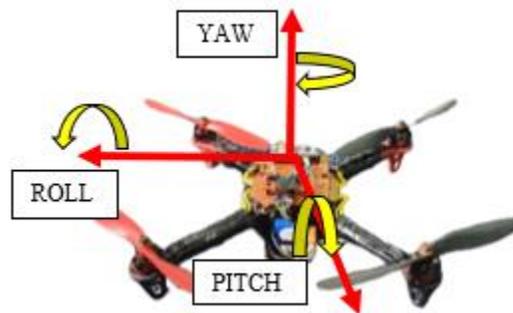


Figura 106 movimientos del cuadricóptero; pitch, roll, yaw, diseño propio.

Para lograr los movimientos de pitch, roll, yaw se deben manipular las revoluciones de los 4 motores del cuadricóptero para generar un desequilibrio de fuerzas en la aeronave. Por ejemplo, para realizar movimientos laterales se debe aumentar las revoluciones en dos de los 4 motores y disminuirlas en los 2 restantes. En la *figura 107 dibujo A* se observa que, para ir hacia atrás, los motores 1,2 deben aumentar revoluciones mientras que los motores 3,4 las disminuyen. De manera similar ocurre con los demás movimientos.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN UN CUADRICÓPTERO

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

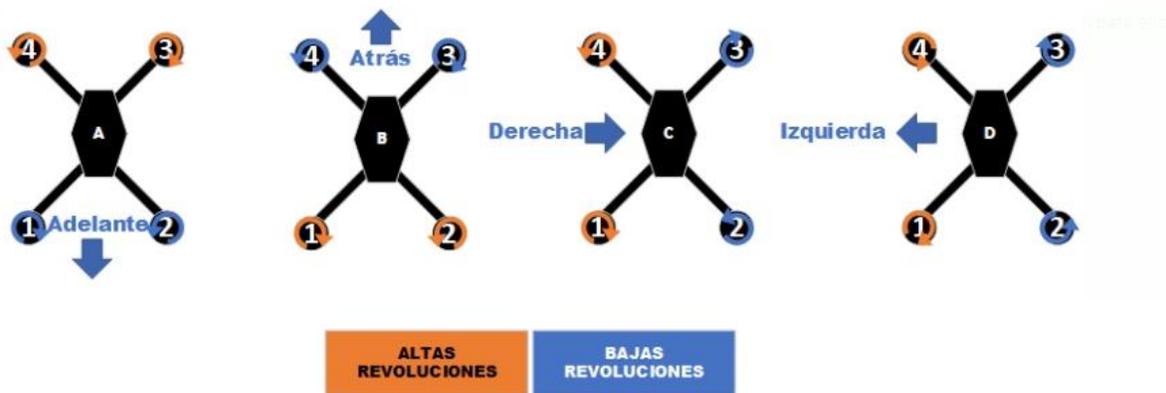


Figura 107. movimientos laterales en un cuadricóptero, diseño propio.

Ahora bien, para generar movimientos sobre el eje del cuadricóptero “YAW”, los motores que giran en la misma dirección deben juntamente aumentar o disminuir las revoluciones según el sentido de giro que desee el piloto, por ejemplo, en la *figura 108 dibujo E* se aprecia que para rotar en dirección horaria los motores 1,3 aumentan sus revoluciones mientras que los motores 2,4 las disminuyen.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia
 Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
 Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
 Dirección de Laboratorios

ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN UN CUADRICÓPTERO

Facultad de Ingeniería
 Programa de Ingeniería Electrónica

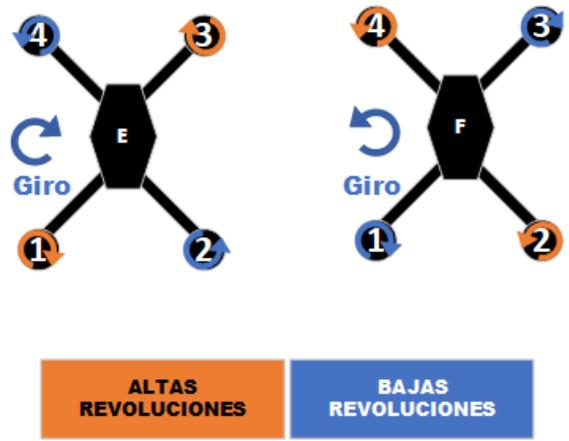


Figura 108. movimiento YAW en un cuadricóptero, diseño propio.

Finalmente, para elevar el dron los 4 motores deben ganar o perder revoluciones al mismo tiempo. En la *figura 109 dibujo G* se ilustra el movimiento de los motores.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

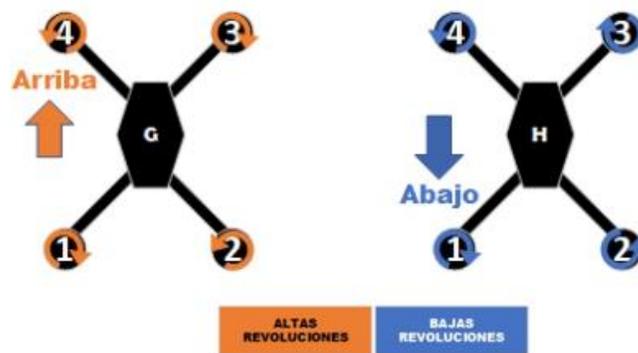


Figura 109. movimiento vertical en un cuadricóptero, diseño propio.

Paso 4

Compilar y embeber el código en el microcontrolador

Para realizar este paso consulte a los orientadores de la practica

Paso 5.

En este paso se comprobará la conexión entre el radiocontrol y el cuadricóptero, también se mostrará el valor de los ángulos de navegación imprimiéndolos mediante conexión serial.

Para llevar a cabo este paso los orientadores llevaran las herramientas necesarias

Paso 6.

Antes de dar inicio con este paso es necesario recordar rápidamente que es y cómo funciona el controlador PID.



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

Control PID

Es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor deseado para aplicar una acción correctora en la salida del proceso.

Los controladores PID poseen tres tipos de acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). La combinación de ellos reúne las ventajas de las tres acciones de control como se ve en la figura 110.

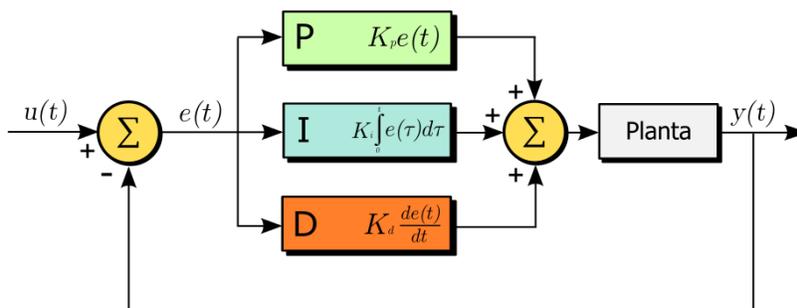


Figura 110 diagrama de bloques PID, tomado de.

La acción de control proporcional P multiplica el valor del error actual con una variable previamente establecida denominada ganancia proporcional, esta acción se utiliza para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero, pero en la mayoría de los casos siempre se tendrá un error al solo utilizar esta ganancia.

La acción de control integral I multiplica el error acumulado que haya tenido el sistema a lo largo del tiempo, causando así disminuir y eliminar el error en estado estacionario provocado por disturbios o perturbaciones que ingresan al lazo de control.



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

La acción de control derivativa D solo actúa cuando haya un cambio en el valor del error, si el error es cero, solo actúan las variables proporcional e integral.

La función de la parte derivativa es disminuir el error al mínimo evitando que haya un sobreimpulso en el sistema.

Cálculo de constantes para control PID en un cuadricóptero.

Ahora bien, se indicará como encontrar las constantes de los controladores PID para los ángulos de navegación del cuadricóptero “PITCH, ROLL, YAW”. Para ello se necesita que el estudiante tenga instalado en su ordenador los programas *Matlab* y *STM32cubeIDE*.

Cada uno de estos ángulos necesita un controlador PID, para el cual se hallarán los valores de las constantes mediante ensayo y error.

1. Se inicia con la acción de **control proporcional para el ángulo “PITCH”** en la cual se probarán valores de ganancia en el rango de 0.8 hasta 1.3, para realizar la prueba siga los siguientes pasos
 - I. Abra el software STM32cubeIDE
 - II. Abra el código fuente que se dejó en el apartado de herramientas de software en la página 3
 - III. Vaya a la línea de código 261, en la cual encontrara tres espacios vacíos
 - IV. Cada uno de estos espacios corresponde a un valor P, I, D del ángulo de navegación correspondiente como se ve en la *figura 111*, en este caso es el ángulo pitch.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

```

//P
> /*PITCH*/ gain_pid[0] = ; gain_pid[1] = 0.0009; gain_pid[2] = 0.0001;

```

Figura 111 línea de código correspondiente al ángulo pitch, ganancia proporcional, diseño propio

- V. En el espacio marcado por el recuadro rojo ingrese el valor para la constante P, se recomienda que se inicie con un valor de 0.8, para llegar al ajuste óptimo aumentar a pasos de 0.1.
2. en la acción de **control integral para el ángulo “PITCH”** pruebe valores de ganancia que inicien en 0 hasta 0.0009, para llegar al ajuste óptimo aumentar a pasos de 0.0001 (0, 0.0001, 0.0002, 0.003, etc....), para realizar la prueba siga los siguientes pasos:
 - I. vaya a la línea de código 261, en la cual encontrara tres espacios vacíos
 - II. Cada uno de estos espacios corresponde a un valor P, I, D del ángulo de navegación correspondiente, en este caso se hallará el valor de la parte integral del ángulo pitch.
 - III. En el espacio marcado por el recuadro azul de la *figura 112* ingrese el valor que crea correcto según las indicaciones.

```

//P
> /*PITCH*/ gain_pid[0] = 0.8; gain_pid[1] = ; gain_pid[2] = 0.0001;

```

Figura 112 línea de código correspondiente al ángulo pitch, ganancia integral, diseño propio.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN UN CUADRICÓPTERO

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

3. en la acción de **control derivativa para el ángulo “PITCH”** ingrese valores de ganancia que inicien en 10 y máximo hasta 20, para llegar al ajuste optimo aumentar a pasos de 1, para realizar la prueba siga los siguientes pasos:

- IV. vaya a la línea de código 261, en la cual encontrara tres espacios vacíos
- V. Cada uno de estos espacios corresponde a un valor P, I, D del ángulo de navegación correspondiente, en este caso se hallará el valor de la parte integral del ángulo pitch.
- VI. En el espacio marcado por el recuadro verde de la figura 113 ingrese el valor que crea correcto según las indicaciones.

```

//P           I           D
> /*PITCH*/ gain_pid[0] =   ; gain_pid[1] =   ; gain_pid[2] =   ;

```

Figura 113 línea de código correspondiente al ángulo pitch, ganancia derivativa, diseño propio.

4. Para ajustar las ganancias PID de los ángulos faltantes repita el proceso descrito en el paso 6.



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

- Una vez halladas las ganancias PID de cada ángulo se deben consignar en la siguiente tabla

	PITCH	ROLL	YAW
PROPORCIONAL			
INTEGRAL			
DERIVATIVO			

- En el siguiente apartado se debe asignar la gráfica correspondiente a los valores encontrados

GRAFICA PITCH

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

GRAFICA ROLL

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

PREGUNTAS: (responder las siguientes preguntas basado en la experiencia de la práctica y las lecturas realizadas)

1. El movimiento que hace un cuadricóptero cuando gira en su eje vertical se le conoce como _____
2. Dos de los motores del dron deben girar en sentido antihorario para garantizar su estabilidad: V o F
3. Describa brevemente que comportamiento tuvo el control PID para el ángulo “PITCH” cuando realizo la práctica en el prototipo.

4. Describa brevemente que comportamiento tuvo el control PID para el ángulo “ROLL” cuando realizo la practica en el prototipo.

5. Que ganancia del control PID actúa cuando existe un cambio en el valor del error.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

6. Que ganancia del control PID reduce el error en estado estacionario en un lazo de control.

7. ¿Qué tipo de filtro se implementó en el lazo de control del cuadricóptero?, ¿este ayudo a reducir el ruido generado por la vibración que producen los motores al girar?

8. En qué tiempo ejecuto el control PID el microcontrolador utilizado.

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



LABORATORIOS INSTITUCIONALES
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Dirección de Laboratorios

**ESTRUCTURA Y CONTROL PID EN
UN CUADRICÓPTERO**

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica

RECOMENDACIONES

- Tener claros los conceptos vistos en el apartado de consultas previas ya que son necesarios para entender a la perfección esta practica
- Realizar las pruebas con los motores en un lugar seguro
- no tocar las hélices mientras están en movimiento.

CONTROL DE EMISIÓN		
Elaboró	Revisó	Autorizó
Camilo López Calvache Brian alexander valencia		
Firma	Firma	Firma
Fecha: 04-2022	Fecha:	Fecha:

F-GLP-V2

Elaborado por: Camilo López & Brian Valencia

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

ANEXO B: DISEÑO ELECTRONICO

En este apartado se dará a conocer la manera como se hizo el diseño electrónico de la placa principal del cuadricóptero, este diseño se divide en cuatro partes fundamentales:

Parte 1, diseño del PCB en el software EAGLE

Parte 2, método de planchado para PCBs

Parte 3, perforación de la placa

Parte 4, montaje de los componentes electrónicos

A continuación, se detallarán cada una de las partes mencionadas.

Parte 1

El diseño de la PCB se hizo en el software EAGLE, este programa es usado para diseñar diagramas y enrutado automático, es famoso gracias a que es un software gratuito y se hayan gran variedad de bibliotecas en internet para complementarlo.

La figura 114 muestra el enrutamiento que se realizó en este programa, dejando espacios de forma simétrica para cada uno de los componentes, este diseño cuenta con una sola capa en la cual se diseñó el circuito.

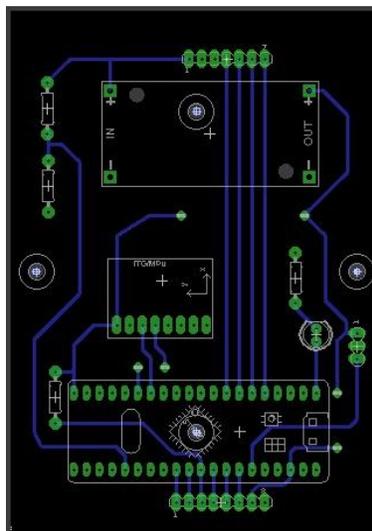


Figura 114 esquema de enrutamiento del PCB, diseño propio.

En la figura 115 se muestran todos los componentes que van inmersos en la placa PCB, entre los más importantes están: el regulador LM2597, la tarjeta STM32f103c8t6 y el MPU6050.

Dentro de la placa también van componentes básicos como resistencias y leds, los huecos de 3mm serán usados para sostener mediante tornillos la placa en la estructura del cuadricóptero.

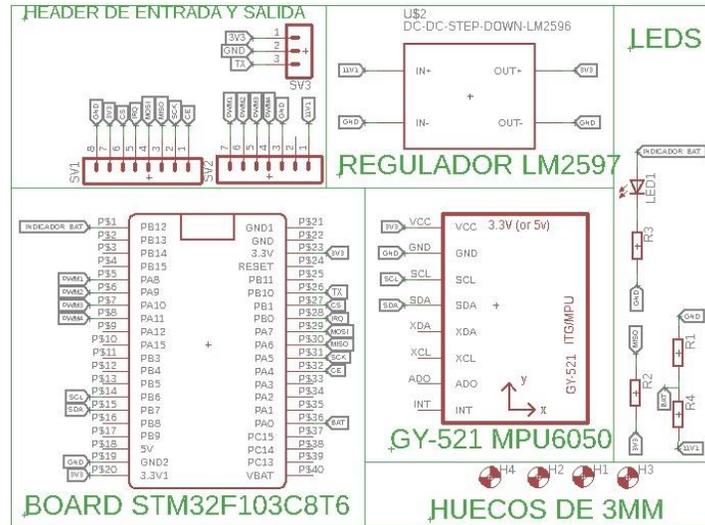


Figura 115 componentes que hacen parte del PCB, diseño propio.

Una vez definido el enrutamiento se procede a generar el archivo final que representa la PCB, en la figura 116 se muestra cómo debe quedar el circuito indicando la ubicación de cada componente.

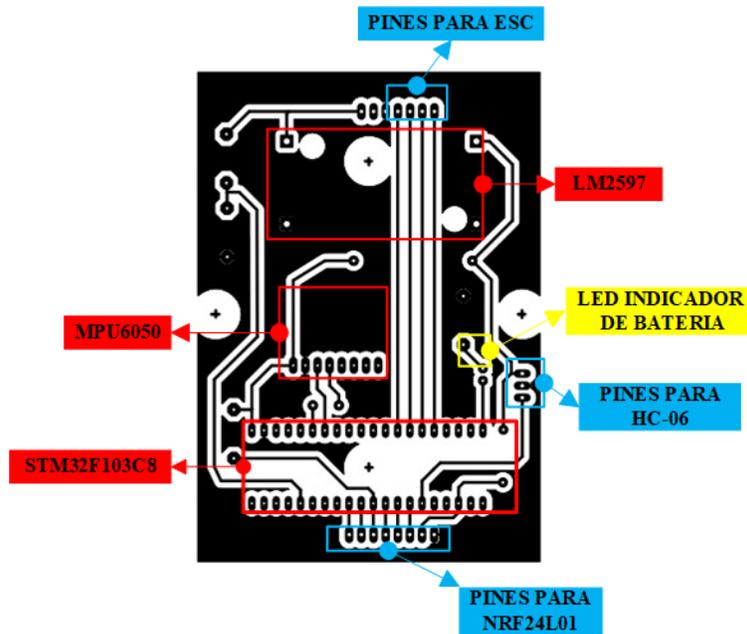


Figura 116 circuito definitivo, diseño propio.

Parte 2

Antes de dar inicio al método de planchado para PCBs se debe contar con los siguientes materiales:

1. Una placa de cobre sin perforar
2. Ácido férrico
3. Un recipiente para sumergir la placa en ácido

Teniendo los materiales mencionados anteriormente y el circuito generado por EAGLE (ver figura 113), se deben seguir los siguientes pasos para que el método de planchado sea exitoso.

Paso 1

imprimir el circuito en papel fotográfico usando impresora láser.

Paso 2

pegar el papel fotográfico con el circuito ya impreso en la placa de cobre mediante cinta de enmascarar.

Paso 3

planchar por 15 minutos aproximadamente, hasta que la tinta se adhiera a la placa de cobre

Paso 4

depositar la placa con el papel adherido en el ácido férrico por 1 hora aproximadamente o hasta ver que se desprende el cobre.

El circuito debe quedar como se muestra en la figura 117.

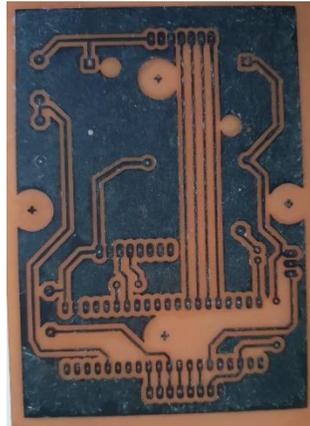


Figura 117 circuito impreso en la placa PCB, diseño propio.

Paso 5

Por último, se debe limpiar la placa cuidadosamente con una esponja metálica para retirar los restos de papel y tinta.

Parte 3

La perforación de la placa es un proceso de alta precisión, el cual debe llevarse a cabo con las herramientas adecuadas para así evitar accidentes, en este caso se utilizó un motortool con una broca milimétrica tipo aguja como se ve en la figura 118.



Figura 118 perforación de la PCB, diseño propio.

Parte 4

Después de tener el circuito impreso totalmente perforado se procede a instalar los componentes correspondientes, la figura 119 muestra cómo queda el circuito instalado en la estructura del cuadricóptero.



Figura 119 PCB instalada en la estructura del cuadricóptero, diseño propio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Rivera, “Los lenguajes de programación como medio para la enseñanza de las matemáticas Bradley Rivera Muñiz , Universidad de Puerto Rico en Río”, 2021, núm. February, p. 23, doi: 10.13140/RG.2.2.13996.18568.
- [2] P. Román Graván, C. Hervás Gómez, y J. L. Guisado Lizar, “Experiencia de innovación educativa con robótica en la Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad de Sevilla (España)”, Sevilla, España, 2017, pp. 1–16.
- [3] M. Jiménez y R. J. Cerdas, “La robótica educativa como agente promotor del estudio por la ciencia y la tecnología en la región atlántica de Costa Rica”, *Congr. Iberoam. Ciencia, Technol. Innovación y Educ.*, núm. November, pp. 1–18, 2014.
- [4] D. Vega Moreno, X. Cufi Sole, M. Rueda López, y D. Llinás Rueda, “Integración De Robótica Educativa De Bajo Coste En El Ámbito De La Educación Secundaria Para Fomentar El Aprendizaje Por Proyectos”, *IJERI Int. J. Educ. Res. Innov.*, núm. 6, pp. 162–175, 2016.
- [5] J. L. Sánchez Ramírez y C. Juárez Landín, “Modelo de Robótica Educativa con el Robot Darwin Mini para Desarrollar Competencias en Estudiantes de Licenciatura / An approach to educational robotics using the Darwin Mini Robot as a tool for undergraduate skill development”, *RIDE Rev. Iberoam. para la Investig. y el Desarro. Educ.*, vol. 8, núm. 15, pp. 877–897, ene. 2018, doi: 10.23913/ride.v8i15.325.
- [6] F. Acuña, M. Singaña, F. Oñate, V. Valdés, M. Bustillos, y A. G. Rumiñahui, “Torso de un intérprete humanoide para la enseñanza del lenguaje en señas básicas con interfaz gráfica”, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, 2015.
- [7] I. Yepes y D. Augusto Couto Barone, “Robótica Educativa: Drones e Novas Perspectivas”, *Rev. Renote*, vol. 16, núm. 2, pp. 210–219, dic. 2018, doi: 10.22456/1679-1916.89293.
- [8] W. G. Aguilar, C. Angulo, R. Costa, y L. Molina, “Control autónomo de cuadricopteros para seguimiento de trayectorias”, en *Memorias del IX Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2014*, 2014, pp. 144–149.
- [9] Ó. Bataller Sendra, “Diseño y Control de un Quadricóptero mediante tarjeta Discovery STM32F3 con microcontrolador ARM Cortex-M4”, Universitat Politècnica de València, 2016.
- [10] R. Galán, A. Jiménez, R. Sanz, y F. Martíá, “Control Inteligente”, *Intel. Artif. Rev. Iberoam. Intel. Artif.*, vol. 4, núm. 10, 2000, doi: 10.4114/ia.v4i10.661.
- [11] F. J. A. Echeverry, “CURSO DE CONTROL DIFUSO”, Universidad Autónoma de Occidente, 1999.
- [12] N. Barrera Lombana, “Uso de la robótica educativa como estrategia didáctica en el aula”, *Prax. Saber*, vol. 6, p. 21, 2015.

- [13] “¿Multi-rotor o Ala fija? ¡Aprende a elegir! | Rentadrone.cl”.
<https://rentadrone.cl/multi-rotor-o-ala-fija-aprende-a-elegir/> (consultado abr. 06, 2021).
- [14] J. M. Cañas Plaza, A. Martín Florido, E. Perdices García, F. Rivas Montero, y R. Calvo Palomino, “Entorno Docente Universitario para la Programación de los Robots”, *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 15, núm. 4, p. 12, 2018, doi: 10.4995/riai.2018.8962.
- [15] D. E. Las, *Jornadas Automática*. Oviedo, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, 2017.
- [16] L. Eller *et al.*, “Advanced autonomy on a low-cost educational drone platform”, en *International conference on intelligent robots and systems (IROS)*, 2019, pp. 1032–1039.
- [17] A. Hably, R. Tang, J. Dumon, y A. Carriquiry, “RobotMe: A drone platform for control education”, en *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2019, vol. 2019-October, pp. 5275–5280, doi: 10.1109/IECON.2019.8927551.
- [18] I. Brand, J. Roy, A. Ray, J. Oberlin, y S. Oberlix, “PiDrone: An Autonomous Educational Drone Using Raspberry Pi and Python”, en *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2018, pp. 5697–5703, doi: 10.1109/IROS.2018.8593943.
- [19] O. Yakimenko, “Using multirotor drones in engineering of systems curricula”, en *2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems, RED-UAS 2017*, 2017, pp. 114–119, doi: 10.1109/RED-UAS.2017.8101653.
- [20] EltraTrade, “¿CUÁL ES LA DIFERENCIA ENTRE MOTORES DE CC CON Y SIN ESCOBILLAS?”, 2020. <http://eltra-trade.sk/es/whats-difference-between-brushed-and-brushless-dc-motors>.
- [21] Xukyo, “Conducir un motor brushless con Arduino”, 2020. <https://www.aranacorp.com/es/conducir-un-motor-brushless-con-arduino/>.
- [22] Juguetecnic, “¿QUÉ ES UN DRONE? TIPOS, NOMBRES Y COMPONENTES”. https://juguetecnic.com/blog/107_que-es-un-drone--tipos-nombres-y-componentes.html.
- [23] Deltakit, “F450 Quadcopter Frame Drone Glass Fibre with Power Distribution Board”. <https://www.deltakit.net/product/f450-quadcopter-frame-drone-glass-fibre-with-power-distribution-board/>.
- [24] Prometec, “CONSTRUCCIÓN Y COMPONENTES DE UN CUADRACÓPTERO”. <https://www.prometec.net/componentes-de-un-cuadracoptero/>.
- [25] J. M. P. Herrera, *Microcontroladores STM32, programación y desarrollo*. Madrid: Ra-Ma, 2018.

- [26] DigiKey, “Por qué y cómo usar la interfaz periférica serial para simplificar las conexiones entre distintos dispositivos”, 2019.
[https://www.digikey.com/es/articles/why-how-to-use-serial-peripheral-interface-simplify-connections-between-multiple-devices#:~:text=Se trata de una interfaz,direccionamiento y comprobación de estado.](https://www.digikey.com/es/articles/why-how-to-use-serial-peripheral-interface-simplify-connections-between-multiple-devices#:~:text=Se%20trata%20de%20una%20interfaz,direccionamiento%20y%20comprobaci%C3%B3n%20de%20estado.)
- [27] E. Garcia Breijo, *Compilador C CCS y simulador Proteus para Microcontroladores PIC*, Primera ed. Barcelona. España: alfa omega grupo editor, 2008.
- [28] J. López Monfort, “Filtros FIR”, 2016. <https://riunet.upv.es/handle/10251/67288>.
- [29] D. Gaydou, J. Redolfi, y A. Henze, “Filtro complementario para estimacion de actitud aplicado al controlador embebido de un cuatrirrotor”, ... *Sist. Embebidos*, núm. March, 2011, [En línea]. Disponible en:
http://proyectos.ciii.frc.utn.edu.ar/cuadricoptero/export/9ed95816c90cc7d83e32fd2e13b032dc515c0d7a/documentacion/informe_final/paper_case.pdf.
- [30] Edwin Dimitri Nieto Guerrero; Fernando Alonso Vaca De La Torre, “Desarrollo de un modelo matemático, cinemático y dinámico con la aplicación de software, para modificar el funcionamiento de un dron, para que este realice monitoreo automático”, *Recimundo*, 2020, [En línea]. Disponible en:
<https://www.recimundo.com/index.php/es/article/view/814/1323>.
- [31] O. Enginieering, “Acelerometro”. <https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>.
- [32] Ikkaro, “Como construir un giroscopio mecánico rotatorio”.
<https://www.ikkaro.com/giroscopio-electrico/>.
- [33] Digi-Key, “Aplicar la fusión de sensores a acelerómetros y giroscopios”, 2018.
[https://www.digikey.com/es/articles/apply-sensor-fusion-to-accelerometers-and-gyroscopes#:~:text=Los acelerómetros y giroscopios son,aeroplanos y dispositivos IoT móviles.](https://www.digikey.com/es/articles/apply-sensor-fusion-to-accelerometers-and-gyroscopes#:~:text=Los%20aceler%C3%B3metros%20y%20giroscopios%20son,aeroplanos%20y%20dispositivos%20IoT%20m%C3%B3viles.)
- [34] B. Company, “El acelerómetro piezoeléctrico”.
<https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/vibration/piezoelectric-accelerometers>.
- [35] E. SMD, “Modulo RF 433MHz”.
<https://www.electronicasmd.com/productos/wireless/rf/>.
- [36] Xukyo, “Usando un módulo NRF24L01 con Arduino”.
<https://www.aranacorp.com/es/usando-un-modulo-nrf24l01-con-arduino/>.
- [37] WOKI.COM.MX, “CONTROL ELECTRONICO DE VELOCIDAD ESC 30”, [En línea]. Disponible en: <https://woki.com.mx/producto.php?cat=74&pag=0>.
- [38] D. . . castañ. D.Guzman, “La lógica difusa en ingeniería: Principios, aplicaciones y futuro”, *Cienc. y Tecnol. Rev. la Univ. Costa Rica*, vol. 24, núm. 2, pp. 87–107, 2006.
- [39] E. Z. Gomez, “Lógica Difusa - 1.4 Funciones de Membresía - Parte 1”, 2015.
<https://www.youtube.com/watch?v=VexUIkXzcQ>.

- [40] C. Guerra, “Lógica Difusa Y Sistemas De”. <https://cayetanoguerra.github.io/ia/>.
- [41] E. Z. Gomez, “Lógica Difusa - 1.4 Funciones de Membresía (Típicas) - Parte 2”, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=gicpjjHYgRY>.
- [42] E. Z. Gomez, “Control Difuso - 3.1.2 Controlador de Mamdani (interpretación gráfica)”, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=rZPFNGYN75s&t=229s>.
- [43] E. Z. Gomez, “Control Difuso - 2.4 Defusificación para un Controlador Difuso”, 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=G0KJA3JUrn&t=369s>.
- [44] S. A. C. Giraldo, “Control PID – Acción de Control Proporcional”. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-pid-accion-proporcional/>.
- [45] S. A. C. Giraldo, “Acción de Control Integral – Control PID”, [En línea]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/accion-de-control-integral-control-pid/>.
- [46] S. A. C. Giraldo, “Acción de Control Derivativo – Control PID”, [En línea]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/accion-de-control-derivativo-control-pid/>.
- [47] B. Ave, “MPU-6050 Datasheet”, *InvenSense*, vol. 1, núm. 408. Sunnyvale, p. 54, 2012, [En línea]. Disponible en: www.invensense.com.
- [48] P. By ALLDATASHEETCOM, “Preliminary Data STM32F103x6 STM32F103x8 STM32F103xB”, núm. July, pp. 1–67, 2007, [En línea]. Disponible en: www.st.com.
- [49] Ewall, “STM32 ARM STM32F103C8T6 Minimum System Microcontroller core board”. https://ewall.com.pk/product_view/STM32-ARM-STM32F103C8T6-Minimum-System-Microcontroller-core-board/1491.
- [50] RacerStar, “Racerstar Shot30A 4in esc manual”. .
- [51] I. Tezla, “MODULO ACELEROMETRO Y GIROSCOPIO (GY-521) MPU6050”. <https://tezla.com.pe/product/modulo-acelerometro-y-giroscopio-gy-521-mpu6050/>.
- [52] Mercado libre, “Modulo Regulador Lm2596 Conversor Dc-dc Arduino”. https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-452306380-modulo-regulador-lm2596-conversor-dc-dc-arduino-_JM?matt_tool=42035816&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14634237770&matt_ad_group_id=122266243170&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=.
- [53] P. By ALLDATASHEETCOM, “LM2596 SIMPLE SWITCHER ® Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator Check for Samples: LM2596 1FEATURES DESCRIPTION Typical Application”, núm. November 1999, 1999, [En línea]. Disponible en: www.ti.com.
- [54] Ardobot, “Batería Lipo Turnigy 7.4V 2200mAh”. <https://www.ardobot.co/bateria-lipo-turnigy-7-4v-2200mah.html>.

- [55] Banggood, “F330 4-Axis RC Quadcopter Frame Kit RC Drone Support KK MK MWC - red and black”. https://usa.banggood.com/F330-4-Axis-RC-Quadcopter-Frame-Kit-RC-Drone-Support-KK-MK-MWC-p-943370.html?cur_warehouse=CN&ID=48074.
- [56] P. P. J. Jose, “Desarrollo de sistema de aeronave pilotada a distancia y aplicacion para levantamiento topografico agricola”, Universidad autonoma chapingo, 2020.
- [57] O. E. N. Automatización, I. N. G. Pablo, y V. Bibian, “SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA DE UN CUADRICÓPTERO EMPLEANDO RETROALIMENTACION VISUAL”, BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA, 2016.
- [58] J. J. Pérez-Paredes, G. J. López-Canteñs, N. Velázquez-López, y I. L. López-Cruz, “Development of a Remote Piloted Aircraft System (RPAS) for Agricultural Use (Part I)”, *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 30, núm. 1, pp. 5–16, 2021.
- [59] A. Ramirez, A. Barriga, I. Baturone, y S. Sanchez Solano, “Capítulo 2 : Logica difusa Conceptos Fundamentales.”, *Libr. Electrónico sobre Lógica Difusa*, pp. 35–59, 2005, [En línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf.
- [60] P. Ponce, *Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería*. 2011.
- [61] R. Diego, “DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA EL PROCESO DE TUESTE DE CAFÉ EN LA EMPRESA MOMOTUS CAFÉ S.A.S.”, Corporacion Universitaria Autonoma del Cauca, 2021.
- [62] I. de M. de Sevilla, “Metodo defusificacion simplificado fuzzyMean”. [http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/FLEB/main/main213\(2d\).htm](http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/FLEB/main/main213(2d).htm).