

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MINIDRONES (MINI UAVS) CONTROL DE UNA CÁMARA EN MINIDRONES

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE ELECTRÓNICA Y
AUTOMATIZACIÓN**

CRISTOPHER ANDRES VITERI IZURIETA

christopher.viteri@epn.edu.ec

DIRECTOR: JORGE ANDRÉS ROSALES ACOSTA

andres.rosales@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Christopher Viteri declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Christopher Andrés Viteri Izurieta

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Christopher Viteri, bajo mi supervisión.



Ing. Jorge Andrés Rosales Acosta, PhD
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Cristopher Viteri

Jorge Andrés Rosales Acosta

DEDICATORIA

A todas las personas que unieron su voz de apoyo para conseguir esto.

AGRADECIMIENTO

A los excelentes profesores que me cruce en este camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	5
1.4.1 Visión Artificial	5
1.4.2 Tipos de cámaras en mini UAVs.....	5
1.4.3 Sistemas de Estabilización y Posicionamiento	6
1.4.4 Tipos de Sistemas de Estabilización y Posicionamiento	8
1.4.5 Motores Brushless	9
1.4.6 Controladores	10
1.4.7 Índices de Desempeño	16
1.4.7.1 ISE (Integral del Error Cuadrático).....	16
1.4.7.2 ISCO (Integral de la Salida del Controlador Cuadrático)	16
2 METODOLOGÍA.....	17
2.1 Micro Cámara RunCam.....	17
2.2 Sistema Gimbal.....	18
2.2.1 Validación de los motores sin escobillas (BLCD).....	18
2.2.2 Modelo Sistema Gimbal.....	20
2.3 Respuesta en Lazo Abierto del Sistema Gimbal	22
2.4 Controlador PI	23
2.5 Controlador PI Adaptativo	25
2.6 Controlador Fuzzy	27
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	33
3.1 Resultados	33
3.2 Conclusiones.....	38

3.3	Recomendaciones.....	38
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
5	ANEXOS.....	43

RESUMEN

El presente documento analiza las características que debe tener un sistema de control de movimiento de una cámara que va a ser integrada a mini UAV para cumplir con las características de seguimiento de un objeto o intruso en un sistema de vigilancia. Para conseguir el movimiento de la cámara se presenta el proceso de visión artificial que se necesita para lograr enfocar el objeto de interés, el sistema gimbal de dos grados de libertad (2GDL) que cumpla con las características de peso y movimientos adecuados para el sistema de seguridad, el tipo de cámara adecuada para el sistema.

Mediante el diseño de los controladores (PI, PI adaptativo y control Fuzzy) se presenta las pruebas de cambios de referencia de cada uno de los eslabones del sistema gimbal, así como también se presenta un análisis de rendimiento mediante los índices de desempeño escogidos de cada uno de los controladores para llegar a determinar el mejor controlador que debe integrarse a este sistema de seguridad.

PALABRAS CLAVE: UAV, controlador, eslabón, desempeño, PI, adaptativo, Fuzzy.

ABSTRACT

This document shows the characteristics that a camera movement control system that will be integrated into a mini UAV must have in order to comply with the characteristics of tracking an object or intruder in a surveillance system. To achieve the movement of the camera, the artificial vision process that is needed to focus on the object of interest is presented, the gimbal system with two degrees of freedom (2DOF) that meets the characteristics of weight and movements suitable for the system of security, the type of camera suitable for the system.

Through the design of the controllers (PI, adaptive PI and Fuzzy control) the tests of reference changes of each of the links of the gimbal system are presented, as well as a performance analysis through the performance indexes chosen for each one. of controllers to determine the best controller to be integrated into this security system.

KEYWORDS: UAV, controller, link, performance, PI, adaptive, Fuzzy.

1 INTRODUCCIÓN

Un mini UAV por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicles, o VANT en español por sus siglas de Vehículo Aéreo No Tripulado, como su nombre lo indica es un vehículo sin tripulación reutilizable que es capaz de mantener un vuelo controlado y sostenido, y es propulsado mediante uno o más motores de explosión o de reacción. Los UAV se clasifican dependiendo de las características más importantes, éstas van en función de la máxima altitud, alcance, duración de vuelo e incluso peso de despegue. Para que un UAV sea considerada como un mini UAV debe estar en el rango de peso de despegue de 2-20kg como lo determina la OTAN [1].

Los mini UAV actualmente se utilizan en varias aplicaciones industriales gracias a su reducido tamaño, su fácil movilidad en lugares de difícil acceso, acceso a lugares peligrosos, etc. Los mini UAVs pueden integrarse a aplicaciones como sistemas de vigilancia donde se puede aprovechar la ventaja de acceder a supervisar lugares de difícil acceso mediante trayectorias determinadas según la topología del lugar y con la integración de una adecuada cámara que permita visualizar el estado del lugar en tiempo real.[1]

La seguridad privada ha ido evolucionando con el paso del tiempo donde uno de los avances más significativos ha sido la integración de cámara sencillas a mini UAVs, lo que permite tener un sistema de transmisión de video, seguimiento de objetos e identificación de objetos. Los UAVs con cámara integrada que se utilizan para sistemas de seguridad aportan una mayor flexibilidad al momento de realizar sus actividades de monitoreo, ya que, ayudan a poder monitorear zonas de difícil acceso, reducen la exposición de peligro de los seres humanos, reducen el tiempo de llegada de un punto a otro, tiene una mayor cobertura [2].

La integración de las cámaras a las UAV permite poder realizar un análisis de imágenes en diferentes puntos de interés, por lo que se podría evaluar la zona deseada mediante diferentes parámetros como son: color, tamaño, textura, etc. La visión artificial mediante las etapas de adquisición, procesamiento, segmentación, medición e interpretación de imágenes puede ayudar a identificar objetos y hasta personas. Al poder interpretar una imagen y lograr diferenciar cada uno de los objetos de interés se puede conseguir las

coordenadas del movimiento que debe realizar la cámara para lograr enfocar de manera adecuada un intruso en un sistema de seguridad [3].

El movimiento en un sistema de coordenadas de una cámara integrada a un UAV se puede realizar mediante un sistema de ejes flotantes denominado Gimbal. Este sistema de ejes flotantes ayuda a mantener la estabilidad de la estructura. El Gimbal tiene características que ayudan a obtener los parámetros de estabilización de forma sencilla, tiene una respuesta rápida en comparación a sistemas más tradicionales de control. También cuentan con una mayor exactitud considerando la posición espacial en la que se necesita su control [4].

Actualmente, se han ido desarrollando diferentes tipos de controladores ayudando a mejorar la respuesta de las diferentes aplicaciones que se presentan en el sector industrial. Uno de los controladores más utilizados es el controlador PID cuyas características nos brinda un buen control adecuado en una estructura sencilla, una facilidad de sintonización y una efectividad de la mayoría de los sistemas industriales, ya sea trabajando de manera separada en sus componentes como en manera conjunta. Una variación sencilla pero muy importante de un controlador PID es el control adaptativo que ayuda a tener un comportamiento variable del controlador para diferentes condiciones en las que se encuentre un sistema, lo que ayuda a cambiar los parámetros del controlador consiguiendo un mejor control en todo momento.[5][6]

Entre los controladores que han brindado buenas respuestas se encuentra el controlador difuso o conocido como controlador Fuzzy. Este tipo de controlador se caracteriza por estar basado en palabras o expresiones comunes con un grado de pertenencia. La relación entre las expresiones se da mediante las funciones de pertenencia, las cuales son representaciones gráficas donde los conjuntos de valores son evaluados según el grado de pertenencia o con que certeza dicho valor se encuentra dentro de la expresión. El control Fuzzy cuenta con cuatro componentes que tiene la función secuencia de encontrar el valor con mayor grado de pertenencia que sería el valor de control que se necesita para llegar a una referencia [7].

1.1 Objetivo general

Controlar el movimiento de la cámara de un mini UAV para cumplir con el seguimiento de trayectorias y seguimiento de objetos sospechosos en un sistema de seguridad.

1.2 Objetivos específicos

- Investigar los diferentes tipos de cámaras usados en mini UAV, considerando la que sería más apta para cumplir con las funciones de un sistema de vigilancia de seguridad y el peso adecuado para que cumpla con las características de un mini UAV según la OTAN.
- Realizar el análisis de los movimientos que debe realizar una cámara de un mini UAV, para de esta manera poder detectar los objetos de interés que permitan mejorar el sistema de seguridad.
- Investigar el tipo de actuador más adecuado para brindar movimiento a la cámara en dos dimensiones para lograr enfocar el objeto de interés y considerar el peso del actuador que cumplan con las características de un mini UAV.
- Realizar tres tipos de controladores para el control de posición de la cámara para lograr un adecuado enfoque sobre el objeto de interés, considerando que la cámara debe tener un movimiento suave y continuo.
- Simular y comparar de cada uno de los controladores con la integración de la cámara del mini UAV.

1.3 Alcance

Se estudiará los tipos de cámaras de mini UAVs considerando su tipo de movimiento, el tipo de adquisición de imágenes y los pesos que deben cumplir para al integrarlo al UAV puede continuar en la clasificación de un mini UAVs.

Se estudiará los tipos de actuadores que se usan comúnmente en las cámaras de los mini UAVs con los que se puedan cumplir las características del sistema de seguridad que se desea aplicar.

Se estudiará los controladores más utilizados en el control de articulaciones robóticas para el movimiento de cámaras de los mini UAVs, considerando que la cámara debe tener un movimiento lento y fluido al momento de enfocar al objeto de interés.

Se investigará el mejor software de simulación para visualizar el funcionamiento del controlador del actuador y comprobar el correcto funcionamiento de la posición de la cámara respecto a la referencia deseada.

Se investigará los diferentes índices de desempeño que permitan evaluar el funcionamiento de los controladores y con esto escoger el controlador más adecuado, cumpliendo las características del sistema de seguridad.

Se definirá el mejor tipo de cámara para cumplir con el objetivo del mini UAV de seguridad (seguimiento de trayectorias, aterrizaje y seguimiento de objetos), considerando las características que debe cumplir para integrarse a un mini UAV.

Se definirá los tipos de movimientos que debe realizar la cámara de mini UAV para cumplir con las características de seguridad y enfocar el objeto de interés de forma adecuada.

Se definirá y estudiará el actuador que cumpla con las características del movimiento de la cámara, considerando su estructura mecánica, electrónica y el tipo de controlador que se debe diseñar para lograr el control de su movimiento.

Se definirá el software adecuado para simular el funcionamiento del actuador y diseñar los tipos de controladores que permitirán el movimiento de la cámara según su referencia.

Se definirá los 3 tipos de controladores que se pueden realizar para el control del actuador que permitirá el movimiento suave, fluido y siguiendo la referencia que se desea en la cámara del mini UAV.

Se diseñará un controlador PI, un controlador PI adaptativo y un controlador difuso para lograr dar un enfoque al objeto de interés.

Se realizará una interfaz gráfica para mostrar los resultados de los controladores y realizar las diferentes pruebas de seguimiento de la referencia.

Se realizará la simulación y comparación de cada uno de los controladores.

Se analizará mediante los índices de desempeño ISE e ISCO cada uno de los controladores, para definir el controlador más adecuado para esta aplicación de seguridad.

Se analizará la viabilidad para implementarlo en un sistema real de seguridad con mini UAVs.

1.4 Marco teórico

El control de una cámara en un mini UAV implica la intervención de varios componentes que al agrupar sus funciones permite tener un movimiento adecuado de la cámara, por lo que, es necesario considerar las características de cada uno de estos componentes para cumplir con el objetivo de control.

1.4.1 Visión Artificial

Los sistemas de visión artificial con sus siglas (SVA) se fue desarrollando con forme avanzada la investigación de la inteligencia artificial con el objetivo de estudiar las características de una imagen mediante un computador digital. La visión artificial tiene como función de entender toda la información que nos brinda una imagen tomada del mundo física mediante un dispositivo digital.[3]

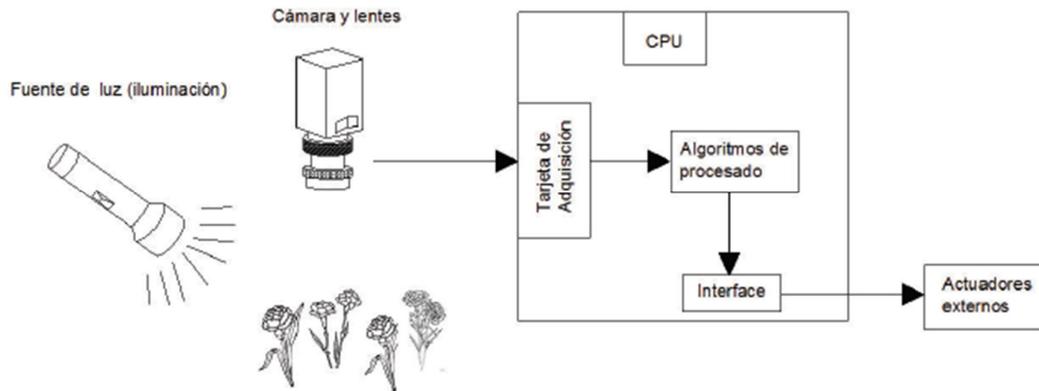


Figura 1.1. Componentes de visión artificial. [3]

En la Figura 1.1 se puede observar los componentes de visión artificial los cuales ayudan a enfocar el objeto de interés, con lo que se podrá generar las coordenadas de movimiento que se necesita en la cámara para dar tanto un seguimiento de trayectoria, un seguimiento de intrusos u objetos de interés, como también en el aterrizaje del mini UAV.

1.4.2 Tipos de cámaras en mini UAVs

Las cámaras que son integradas a drones se clasifican según su función o adquisición de imagen, ya que existen cámaras que sirven para realizar una transmisión en tiempo real (FVP) y cámaras que graban en tiempo real, pero para acceder al video es necesario conectarlas a un computador o un equipo de reproducción de video.

Con estas características de cámaras se va a ver los principales tipos de cámaras que se puede encontrar en el mercado.

Cámaras de acción: estas cámaras tienen la finalidad de hacer capturas de imagen o video para guardar toda esa información dentro de una unidad de almacenamiento (memorias SD) con una calidad entre 720 a 1080p, debido al alto consumo de almacenamiento ya que actualmente existen cámaras que pueden grabar a 4k, es necesario brindar más recursos para procesamiento del contenido, ya que entregan archivos demasiados grandes.

Cámaras FPV: este tipo de cámara por sus siglas FPV (First View Person) se puede concluir que su principal función es mostrar video en tiempo real, lo que ayuda directamente a realizar aplicación de seguridad o de vigilancia, también es importante mencionar que están diseñadas para tener una mínima latencia y una calidad buena en promedio para poder visualizar una imagen clara en tiempo real. Actualmente este tipo de cámaras vienen con conexión wifi que es de gran ayuda para poder procesar la imagen en largas distancias desde un computador [11].

Cámaras utilitarias: este tipo de cámara cuenta con funciones específicas para aplicaciones ya determinadas, pueden ser cámaras RGB que tiene una alta resolución que son designadas para las aplicaciones de monitoreo en cultivos agrícolas. También se puede encontrar cámaras con sensores térmicos que son utilizadas para aplicaciones de detección de rescate donde es importante detectar el calor en la imagen para encontrar seres vivos [11].

1.4.3 Sistemas de Estabilización y Posicionamiento

Los sistemas de estabilización y posicionamiento se caracterizan por tener sensores referenciados a tierra y actuadores integrados que ayudan a realizar los movimientos que se necesitan para cumplir una función específica.

Para lograr una estabilización y posicionamiento se utilizan sistemas de coordenadas u orientación para colocar en cualquier punto en un espacio dimensional. Para conseguir moverse en el espacio dimensional es necesario realizar cambios en las coordenadas y desarrollar un sistema de navegación inercial.

1.4.3.1 Sistemas de Coordenadas Inercial Verdadera

Este tipo de coordenadas son válidas para las leyes de Newton, esto se debe a que Newton tomaba las coordenadas inerciales como un sistema sin movimiento, donde asumía que el campo inercial se mantenía sin movimiento con respecto a las estrellas. Considerado estas características se puede decir que este sistema de coordenadas no es práctico para este sistema, ya que las leyes no van de acuerdo con el sistema de coordenadas para esta aplicación. En la Figura 1.2 se puede observar la diferencia entre un sistema de coordenadas inercial y un sistema de coordenadas no inercial.

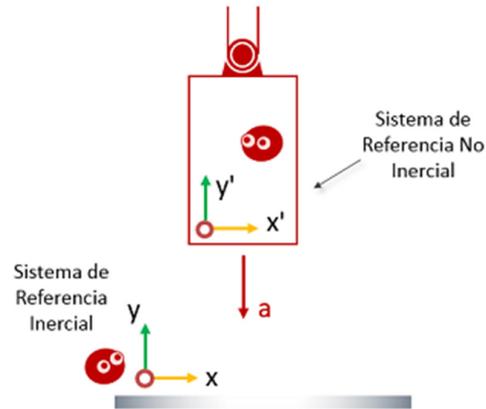


Figura 1.2. Sistema de referencia inercia y sistema de referencia no inercial.

1.4.3.2 Componentes de Actitud (Ángulos de Euler)

- Actitud y Orientación

Este sistema es conocido por las siglas AHRS (Attitude and Heading Reference System), el cual consiste en la orientación respecto al plano horizontal y al rumbo de un vehículo, con lo que permite conocer la orientación del vehículo respecto al norte magnético.

- Componentes de Actitud

Estas componentes permiten especificar la orientación de un objeto en movimiento en un eje de referencia en un sistema de ejes ortogonales fijo. Las componentes de actitud están compuestas por un conjunto de tres coordenadas angulares como se muestra en la Figura 1.3, las cuales están basadas en los ángulos de Euler, siendo estas:

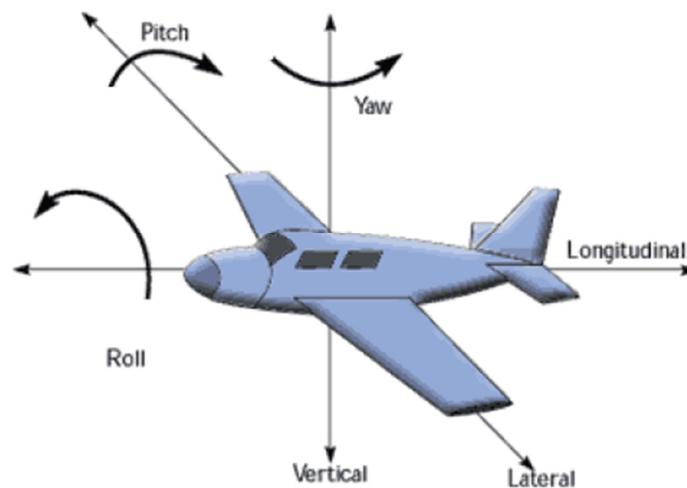


Figura 1.3. Componentes de pitch, roll y yaw. [4]

A este tipo de sistema se lo conoce como ejes flotantes debido a que, si el giroscopio que tiene integrado el dispositivo siente un cambio de giro, esto hará que inmediatamente se envíe a los motores a moverse para mantener estable el sistema en su respectivo eje de coordenadas.

1.4.5 Motores Brushless

Uno de los motores más utilizados en el campo de los sistemas gimbal son los motores de corriente directa sin escobillas o también conocidos como Brushless Direct Current Motor (BLDCM). Este tipo de motor gracias a sus características ayudará a tener un mejor control en el movimiento de la cámara y con ello es apto para integrar el sistema en este trabajo.

Las principales características y beneficios por lo que los motores sin escobillas brushless son escogidos para integrar los sistemas de estabilización son: la buena resolución en cada uno de los giros y su veloz respuesta ante los cambios de giro. Para lograr una grabación de calidad es necesario disminuir lo mejor posible las perturbaciones del sistema, por lo que, los motores brushless al contar con una buena resolución de giro y su veloz respuesta son los adecuados para este tipo de trabajos [13].

El uso de motores brushless también tiene sus desventajas a comparación de otros motores, sobre todo en el cambio de polaridad al realizar los cambios de giro. Los motores de CD que cuentan con escobillas las utilizan para realizar el cambio de polaridad de manera más sencilla a comparación de los motores sin escobillas, que necesitan de un componente electrónico externo (inversor trifásico) para lograr cambiar la polaridad del motor. Tomando en cuenta que un inversor para el control del motor brushless aumenta la dificultad en la integración al sistema y también aumenta la parte económica a comparación de los motores DC y los servomotores [13].

Uno de los motores brushless que son utilizados en los sistemas gimbal es el GBM5206-150T que se lo puede observar en la Figura 1.6. Este motor es fabricado por la empresa iPower, el cual está diseñado específicamente para los sistemas gimbal.



Figura 1.6. Motor Brushless para uso en sistemas gimbal.

Las características del motor brushless se muestran en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1. Características del motor Brushless GBM5206-150T. [13]

Tipo	Característica
Configuración	12N14P (12 bobinas y 14 polos)
Masa	0.144 kg
Conexión	Tipo estrella
Masa de cámara	0.6 – 1.5 kg
Corriente sin carga	0.05 A
Par	0.4 Nm
Velocidad máxima	475 rpm

1.4.6 Controladores

1.4.6.1 Control PID

Los controladores PID son uno de los controladores más utilizados en las industrias a nivel mundial, poniendo como referencia el caso específico del país de Japón donde el 90% de sus industrias utilizan este tipo de controlador. Esto se debe a que los controladores PID tiene una fácil implementación y cuentan con respuestas satisfactorias en los diferentes procesos industriales. También cuentan con una fácil integración en la sintonización en línea, por lo cual, los convierte en la principal opción de controladores para un proceso.

El controlador PID cuenta con tres componentes que cumplen funciones o acciones diferentes en el control de un proceso, el controlador cuenta con una acción proporcional (P), una acción integral (I) y una acción derivativa (D) [14].

Control Proporcional (P)

El controlador proporcional compensa la ganancia de un proceso, ya que la señal del controlador va a ser directamente proporcional al valor del error. El valor de la acción del del controlador proporcional va a estar expresado en porcentaje, ya que este valor va a ayudar a que la señal controlada pueda varia de 0 al 100%. En la ecuación 1.1 se puede describir la acción proporcional.

$$m(t) = M_o + K_e e(t) \quad (1.1)$$

Donde, $m(t)$ es la señal de salida del controlador proporcional, K_e es la ganancia proporcional que se aplica al proceso, M_o es la salida del controlador en el momento que el error tiene un valor de cero y $e(t)$ es el error del proceso. Al aplicar la transformada de Laplace se puede encontrar la función de transferencia de la acción proporcional, como se puede observar en la ecuación 1.2 [14]:

$$G_e(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_e \quad (1.2)$$

Control Proporcional + Integral (PI)

La acción proporcional tiene el problema de no poder eliminar el error en un proceso, por lo cual se le puede sumar la acción integral que mediante la integración del error puede eliminar el error, lo que nos ayuda a mejorar la salida del proceso cumpliendo con la referencia deseada. La acción proporcional más la acción integral puede describir mediante la ecuación 1.3.

$$m(t) = M_o + K_e e(t) + K_e \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \quad (1.3)$$

Donde, τ_i es el tiempo integral que se puede calcular para cada proceso, el coeficiente de la acción proporcional es inverso al tiempo integral, por lo que, si el tiempo integral tiende al infinito la acción integral va a tener un valor de cero. Al aplicar la transformada de Laplace se puede encontrar la función de transferencia de la acción proporcional más la acción integral, como se puede observar en la ecuación 1.4 [14]:

$$G_e(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_e \left[1 + \frac{1}{\tau_i s} \right] \quad (1.4)$$

Control Proporcional + Derivativo (PD)

Al igual que el caso anterior este tipo de controlador es la combinación entre la acción de control proporcional y la acción de control derivativa. Este tipo de controlador es muy sensible al ruido, debido a que, por su forma de trabajo que se ve en la ecuación 1.5, al tener la derivada de procesos que tienen mucho ruido se va a generar ganancias muy grandes a la salida del controlador que van a generar que se pierda el control del proceso.

$$m(t) = M_o + K_e e(t) + K_e \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.5)$$

Donde, τ_d es el tiempo derivativo que se puede calcular para cada proceso. Este parámetro va a ayudar al controlador a mantenerse en la referencia deseada en todo momento. Al aplicar la transformada de Laplace se puede encontrar la función de transferencia de la acción proporcional más la acción derivativa, como se puede observar en la ecuación 1.6:

$$G_e(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_e[1 + \tau_d s] \quad (1.6)$$

Control Proporcional + Integral + Derivativa (PID)

Este tipo de controlador en la unión entre las acciones del controlador PI y las acciones del controlador del PD, por lo que, se logró conseguir un proceso que mediante el controlador se pueda eliminar el error y el proceso se mantenga estable en todo momento. También se debe mencionar que este controlador también cuenta con la desventaja de la acción derivativa al ser sensible al ruido. En la ecuación 1.7 se presenta la forma de un controlador PID:

$$m(t) = M_o + K_e e(t) + K_e \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + K_e \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.7)$$

Al aplicar la transformada de Laplace se puede encontrar la función de transferencia de la acción proporcional más la acción derivativa más la acción integral, como se puede observar en la ecuación 1.8: [14]

$$G_e(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_e \left[\left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) + \tau_d s \right] \quad (1.8)$$

1.4.6.2 Control Adaptativo PI (Ajuste de Tabla)

Los sistemas industriales tienen un conjunto de variables propias que van cambiando con forme va funcionando el proceso, pero también cuentan con variables que están fuera de su entorno como son: perturbaciones, ajustes de componentes, cambio de referencias, ruido, vibración, etc. Las variables auxiliares al proceso pueden causar cambios en el comportamiento del sistema que pueden llegar a causar inestabilidad en la dinámica del sistema y en casos extremos hasta pérdidas económicas dependiendo del proceso. Considerando el efecto de este tipo de variables se puede se puede realizar el estudio de la respuesta del sistema ante el cambio y contrarrestar el efecto mediante el cambio de parámetros en el controlador integrado al proceso.

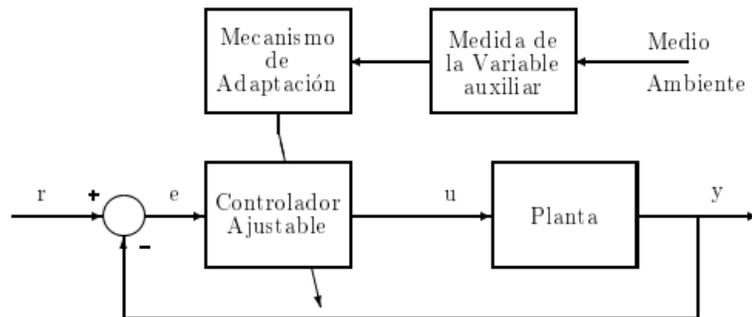


Figura 1.7. El esquema de control adaptativo ajustable por tabla.

Como se observa en la Figura 1.7, en el controlador adaptativo mediante el ajuste por tabla se tiene un sistema realimentado con un controlador ajustable, en el que las ganancias del controlador en la realimentación son ajustadas usando una compensación de prealimentación considerando la variable auxiliar al que el sistema está sometida. Como ejemplo actual, en los sistemas de vuelo se considera como una variable auxiliar al número de match y a la presión dinámica, que son integradas al sistema de control mediante sus respectivos sensores.

Uno de los problemas principales al realizar un controlador adaptativo es escoger la variable auxiliar adecuada que ayude a mejorar el rendimiento del sistema y no malgastar recursos en la integración de una variable que no ayude al sistema. Las variables auxiliares se escogen según el análisis físico del sistema. Una de las variables que se escogen en control de procesos como variable auxiliar es el caudal, ya que las constantes de tiempo y el tiempo de retardo son inversamente proporcional a esta variable auxiliar.

En algunos procesos se puede realizar un control adaptativo mediante transformaciones no lineales con el objetivo de que el controlador no dependa de las condiciones de la operación. Para este tipo de controlador las variables transformadas se calculan mediante las medidas de las variables auxiliares y las medidas del sistema a controlar. El resultado del controlador va a estar compuesto por dos transformaciones no lineales con un regulador lineal en el medio [15].

1.4.6.3 Control Fuzzy

Los controladores Fuzzy Logic tiene las características de ser controladores de tipo razonamiento los cuales permite representar de manera cuantitativa hechos que se los puede describir vagamente o de manera aproximada, tales como la temperatura de un recipiente que puede estar alrededor de los 150°C o decir que una válvula se encuentra media abierta o media cerrada. Cada uno de estos eventos pueden al ser susceptibles pueden asociarse a reglas de control, de esta manera pueden relacionarse como un controlador Fuzzy y con ello conseguir a la salida del controlador un valor numérico en la acción de control. Este controlador está compuesto por reglas de argumentos comunes, las cuales hacen que el control tenga mayor veracidad en cada uno de sus niveles. Gracias a las características del control Fuzzy puede ser aplicado a sistemas multivariables lineales y no lineales [16].

Los controladores difusos simples generalmente se representan como se muestra en la Figura 1.8.

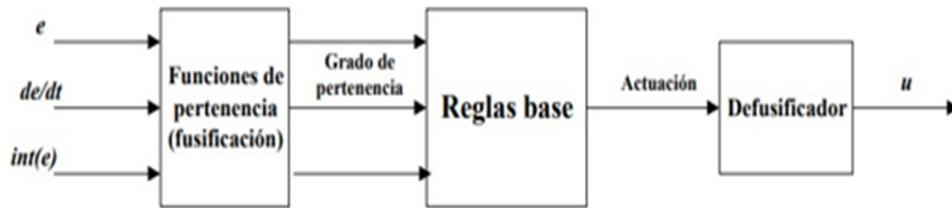


Figura 1.8. Diagrama de bloques del control Fuzzy

A continuación, se presentan las principales diferencias entre los conjuntos clásicos y los conjuntos difusos [16]:

La principal diferencia se da en que los conjuntos clásicos van a estar en los valores de 0 o 1, en cuanto a los conjuntos difusos pueden ser valores entre el conjunto de 0 a 1.

En el caso de un conjunto difuso se puede decir que un elemento puede ser parte del conjunto difuso y también puede ser parte del complemento de dicho conjunto, por otro lado, en un conjunto clásico esta característica no se puede dar, ya que sería una violación al tercer principio excluido.

El control difuso consta de 4 etapas:

- Etapa de fusificación.
- Etapa de base de conocimientos.
- Etapa de máquina de inferencia.
- Etapa de defusificación.

Etapa de fusificación

Esta primera etapa se encarga de transformar todas las variables físicas del proceso que se desea controlar a variables difusas y se le determina un grado de pertenencia para cada uno de los conjuntos difusos que se diseñan, esto se realiza a través de las diferentes funciones de pertenencia que están asociadas a dichos conjuntos difusos [16].

Etapa de base de conocimientos

Esta etapa cuenta con dos componentes: una base de datos que comprende las definiciones lingüísticas tanto de la entrada como de la salida del proceso y una base de reglas que influye en las acciones del controlador.

La base de reglas se encarga de mezclar un conjunto de entrada difusas, que se los determina como premisas y las mezclan con un conjunto de salida difusas, que se los determina como consecuencias.

Para derivar las reglas del controlador se consideran con mayor prioridad a las basadas en:

- Se determinan según la experiencia del operador y el conocimiento que este tenga del proceso como de las técnicas de control.
- Se debe considerar con prioridad los datos de entrada y salida para tener una mejor caracterización del proceso [16].

Etapa de dispositivo de inferencia

La función del motor de inferencia se basa en dos aspectos importantes que son analizar las reglas, si es necesario incrementar nuevas y decidir el orden de ejecución de la inferencia difusa, la secuencia de cálculos realizados por el motor se indica como inferencia.

Esta etapa se encarga de analizar cada una de las reglas y si es necesario crear nuevas reglas según correspondan. También se encarga de decidir el orden de ejecución de la inferencia difusa. En la Figura 1.9 se observan cada una de las etapas de un dispositivo de inferencia del control Fuzzy [16].

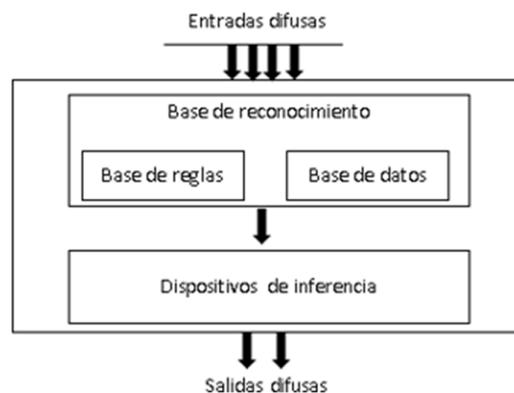


Figura 1.9. Dispositivo de inferencia del control Fuzzy

Etapa de defusificación

En esta etapa se hace el proceso inverso de la fusificación, con esto se va a transformar los conjuntos difusos que fueron creadas por variables lingüísticas cada uno con su grado de pertenencia, en un valor numérico que pertenece a las salidas del controlador hacia el proceso.

Para poder realizar esta etapa se tienen varias opciones como son:

- Defusificación por el método del máximo (CoM): para este caso se tiene que el conjunto difuso se le determina un valor máximo, el que será la salida del controlador.
- Defusificación por el método centroide (CoG): para este caso se considera a la función de membresía y se calcula su centro de gravedad.
- Promedio de máximos (MoM): para este caso es necesario calcular el valor medio mediante la ecuación 1.9, donde se considera los puntos con mayor grado de pertenencia en la función de membresía.[16]

$$y^* = \frac{\sum_t^n \bar{y}_t}{n} \quad (1.9)$$

1.4.7 Índices de Desempeño

La función de los índices de desempeño en un sistema controlado es permitir saber cuál de los diferentes controladores tienen un mejor rendimiento ante cambios de referencia, perturbaciones o cambios de parámetros en el proceso. Estos índices se utilizan como una comparación cuantitativa de cada uno de los controladores, los índices más utilizados en los sistemas de control son los siguientes:

1.4.7.1 ISE (Integral del Error Cuadrático)

Este índice tiene mayor peso para los errores grandes que se presentan al inicio de la respuesta y para tiene un menor peso para los errores pequeños que se presentan en el final de las respuestas. La función está definida por la ecuación 1.10.

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (1.10)$$

1.4.7.2 ISCO (Integral de la Salida del Controlador Cuadrático)

Con el concepto del índice de desempeño ISE, este índice tiene el mismo comportamiento, pero con respecto a la salida del controlador, por lo que, se puede observar el rendimiento del controlador ante los cambios que se presentan en el sistema de control. La función está definida por la ecuación 1.11 [17].

$$ISCO = \int_0^{\infty} x_c(t)^2 dt \quad (1.11)$$

2 METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se determinará cada uno de los componentes que formarán parte del sistema de control de una cámara en mini UAVs, considerando cada uno de las características que debe cumplir el sistema tanto para ser considerado un mini UAV, como para cumplir con el enfoque de los objetos de interés.

2.1 Micro Cámara RunCam

En la Figura 2.1 podemos observar la micro cámara de acción RunCam 5 4k FPV que permite obtener videos en tiempo real de buena calidad y bajos recursos. Una de las características más importantes está en el peso del equipo es de 56 gramos, que es relativamente bajo, por lo que, se puede integrar a un sistema de mini UAVs.



Figura 2.1. RunCam 5 4k FPV

Las características de la RunCam 5 se presentan en la Tabla 2.1.[18]

Tabla 2.1. Características RunCam 5

Tipo	Característica
Marca	RunCam
Tipo de lente	Estándar
Resolución de la captura de video	1080p
Tipo de video cámara	Cámara deportiva
Peso del artículo	56 gramos
Tiene estabilización de imagen	Si
Velocidad de captura de imagen	1.120s

2.2 Sistema Gimbal

Para cumplir características del enfoque a los objetos de interés mediante un mini UAV con una cámara integrada es necesario que el control de la cámara se realice mediante dos o tres grados de libertad en su movimiento, por lo que se ha escogido es sistema Gimbal de dos grados de libertad (2DOF), el modelo de Gimbal a utilizar se ha obtenido del trabajo de titulación de Desarrollo de Técnicas avanzadas de control para la estabilización de un Gimbal (2DOF) desarrollado por Julián Andrés Gómez Gómez de la Universidad Autónoma de Bucaramanga [13].



Figura 2.2. Sistema Gimbal [13].

En la Figura 2.2 se puede observar el sistema Gimbal cuenta con la integración de dos motores sin escobillas (BLDC) trifásicos, los cuales son los encargados de realizar el movimiento de los dos eslabones para lograr el movimiento de la cámara en los dos grados de libertad y también cuenta con un acople para lograr la integrar la cámara al sistema.

2.2.1 Validación de los motores sin escobillas

El modelo no lineal es espacios de estado del sistema de los motores sin escobillas brushless obtenido [13], se representa por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ w_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ w_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{dw_m}{dt} \\ \frac{d\theta_m}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & 0 & \frac{-k_e \sin(h)}{2L} & \frac{-k_e P x_3 \cos(h)}{4L} \\ 0 & \frac{-R}{L} & \frac{k_e \sin\left(h + \frac{\pi}{3}\right)}{2L} & \frac{x_3 k_e P \cos\left(h + \frac{\pi}{3}\right)}{4L} \\ \frac{-\sqrt{3}k_t \cos\left(h + \frac{\pi}{3}\right)}{2J} & \frac{-\sqrt{3}k_t \cos(h)}{2J} & \frac{-k_f}{J} & a_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$h = \frac{x_4 P}{2} \quad (2.6)$$

$$a_{34} = \frac{k_t P (3x_1 \cos(h) + \sqrt{3}x_1 \sin(h) + 2\sqrt{3}x_2 \sin(h))}{8J} \quad (2.7)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{-1}{3L} & \frac{-1}{3L} & 0 \\ \frac{-1}{3L} & \frac{2}{3L} & \frac{-1}{3L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Para conseguir el valor del torque eléctrico se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_e = \frac{-k_t \left(\frac{y_1 \sqrt{3} \cos(h)}{2} + \frac{3y_1 \sin(h)}{2} + y_2 \sqrt{3} \cos(h) \right)}{2} \quad (2.11)$$

$$h = \frac{y_5 P}{2} \quad (2.12)$$

Los parámetros del fabricante de los motores para la simulación en Matlab/Simulink se ven en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros de los motores brushless.

Parámetro	Valor	Unidad
k_f	0.0001	$Nm/(\frac{rad}{s})$
J	0.000001	kgm^2
k_t	0.0001	Nm/A
k_e	0.08	$V/(\frac{rad}{s})$
P	14	–
R	15.445	
L	0.003665	H
T_l	0	Nm

2.2.2 Modelo Sistema Gimbal

El sistema Gimbal que se desarrolla en [13], se representa con pocas ecuaciones debido a que la fuerza electromotriz se la considera nula, ya que para este tipo de sistema no se necesita de altas revoluciones en los motores al momento de realizar el movimiento de la cámara. Considerando el comportamiento lineal de las señales PWM de control y la relación de voltaje del motor, se estable la relación de voltaje de los dos motores y sus variables de control u_1 y u_2 , como se muestra en las siguientes ecuaciones [13]:

$$V_{a1} = 0.5V_m \left[k_{v1} \sin\left(\frac{2\pi}{256}u_1\right) + 1 \right] \quad (2.13)$$

$$V_{b1} = 0.5V_m \left[k_{v1} \sin\left(\frac{2\pi}{256}u_1 + \frac{2\pi}{3}\right) + 1 \right] \quad (2.14)$$

$$V_{c1} = 0.5V_m \left[k_{v1} \sin\left(\frac{2\pi}{256}u_1 + \frac{4\pi}{3}\right) + 1 \right] \quad (2.15)$$

$$V_{a2} = 0.5V_m \left[k_{v2} \sin\left(\frac{2\pi}{256}u_2\right) + 1 \right] \quad (2.16)$$

$$V_{b2} = 0.5V_m \left[k_{v2} \sin\left(\frac{2\pi}{256}u_2 + \frac{2\pi}{3}\right) + 1 \right] \quad (2.17)$$

$$V_{c2} = 0.5V_m \left[k_{v2} \sin\left(\frac{2\pi}{256}u_2 + \frac{4\pi}{3}\right) + 1 \right] \quad (2.18)$$

En las ecuaciones se puede observar los valores $kv1$ y $kv2$ que corresponden a las constantes del escalado del voltaje RMS de cada uno de los motores, el Vm corresponde a el voltaje de alimentación al cual trabajan los motores brushless. Este sistema de ecuaciones se desarrolló asumiendo un muestreo del ángulo eléctrico de 256 muestras y asumiendo señales senoidales puras. El sistema Gimbal cuenta con dos entradas $u1$ y $u2$, y con dos salidas respectivamente $\theta1$ y $\theta2$, como se puede observar en la Figura 2.3.

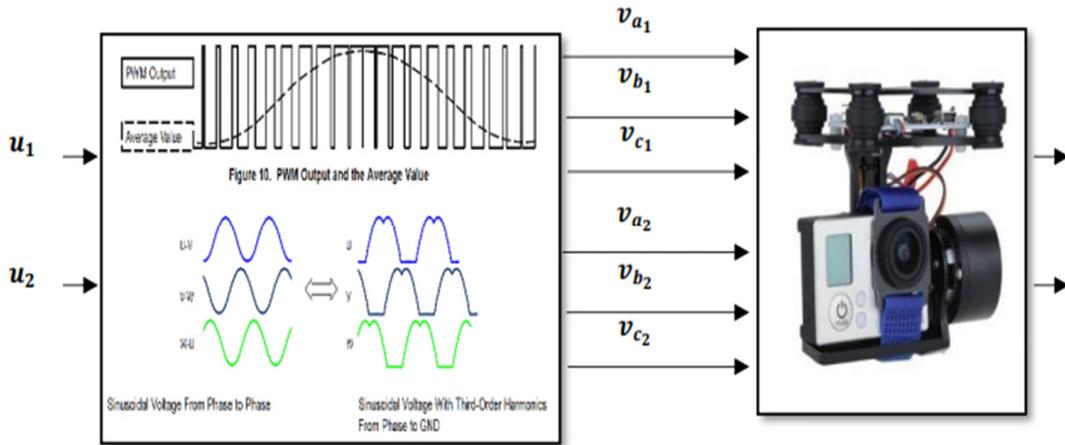


Figura 2.3. Sistema Gimbal de dos entradas $u1$ y $u2$, y dos salidas $\theta1$ y $\theta2$ [13].

En donde $kv1$ y $kv2$ son las constantes de escalado del voltaje RMS en los motores 1 y 2, respectivamente y, Vm es el Voltaje de alimentación DC en los motores. Las ecuaciones se obtienen asumiendo señales senoidales puras y considerando el ángulo eléctrico a 256 muestras, sin embargo, debido a que en la práctica se implemente una señal senoidal, se realiza el cálculo que relaciona el voltaje senoidal puro y saddle, a través de la ecuación general del valor eficaz para un ciclo de la señal, respectivamente. De esta manera se obtiene que la relación entre el voltaje RMS senoidal y saddle es de 1.3288. Para finalizar, se iguala el torque Te de la ecuación, respectivamente, con los torques $\tau1$ y $\tau2$ de las ecuaciones, obteniendo así la relación entre la dinámica de los eslabones y las corrientes en los motores. Con esta igualdad, finalmente, se logra establecer el modelo del sistema Gimbal con dos entradas $u1$ y $u2$, y dos salidas $\theta1$ y $\theta2$, tal y como se muestra en la Figura 2.3.

En la Figura 2.4 se observa la implementación del modelo del Sistema Gimbal en el programa de simulación Matlab/Simulink.

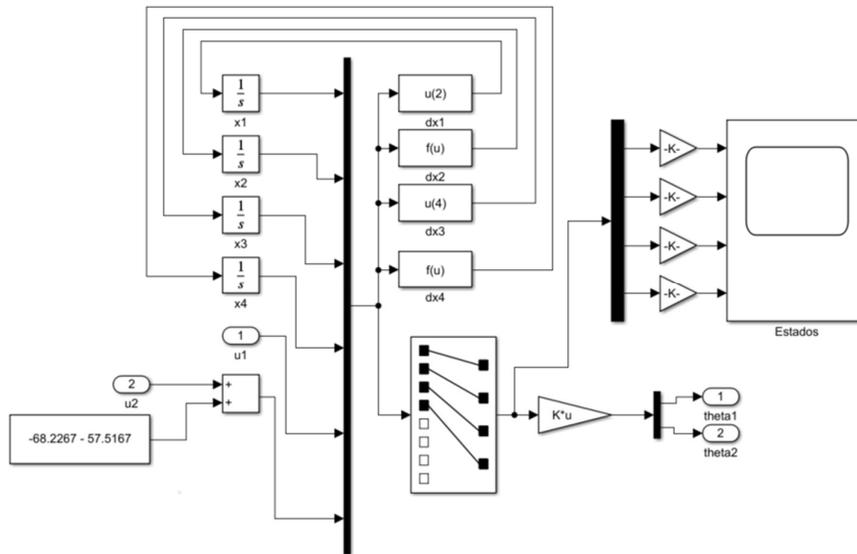


Figura 2.4. Implementación del Sistema Gimbal en Matlab/Simulink.

2.3 Respuesta en Lazo Abierto del Sistema Gimbal

El sistema Gimbal al estar compuesto por motores sin escobillas y al ser un sistema de respuesta lenta ante los cambios de referencia, se ha considerado realizar cambios de referencia mediante una rampa de subida de 1 segundo para alcanzar la referencia deseada, lo que, ayuda a tener un mejor control de la posición de los motores, como una respuesta adecuada en todo momento de los motores. En las Figuras 2.5 y 2.6 se va a observar el comportamiento del sistema Gimbal en cada uno de los eslabones cuando el sistema trabaja en lazo abierto sin ningún tipo de control.

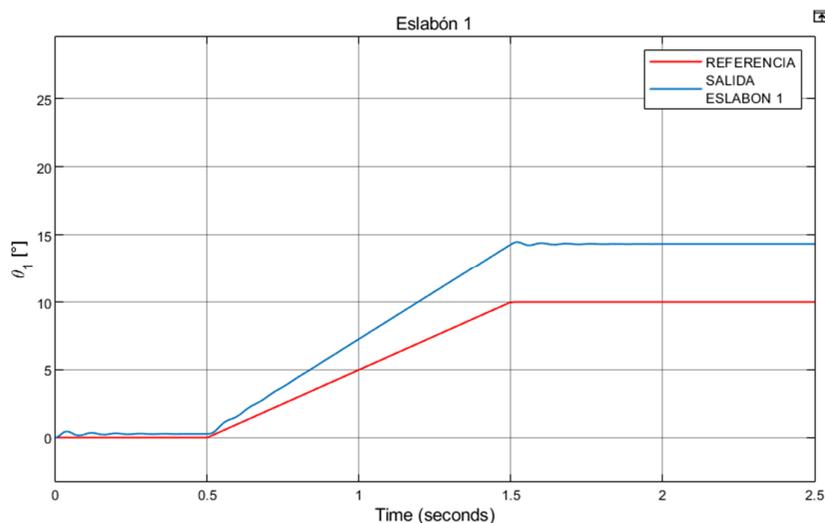


Figura 2.5. Comportamiento del eslabón 1 ante un cambio de referencia de 10 grados.

Como se observa en la Figura 2.5 y 2.6 el sistema no llega a seguir la referencia en la que se necesita trabajar, ya que se puede observar que hay una diferencia de casi 5 grados entre la señal de referencia y el ángulo de salida de los motores. El comportamiento de los motores en lazo abierto puede causar que la cámara no se ubique en la posición adecuada y no se pueda observar el objeto de interés, por lo que es necesario realizar una técnica de control para llegar a tener un comportamiento adecuado de seguimiento de la referencia y con ello poder cumplir con las características de un sistema de seguridad.

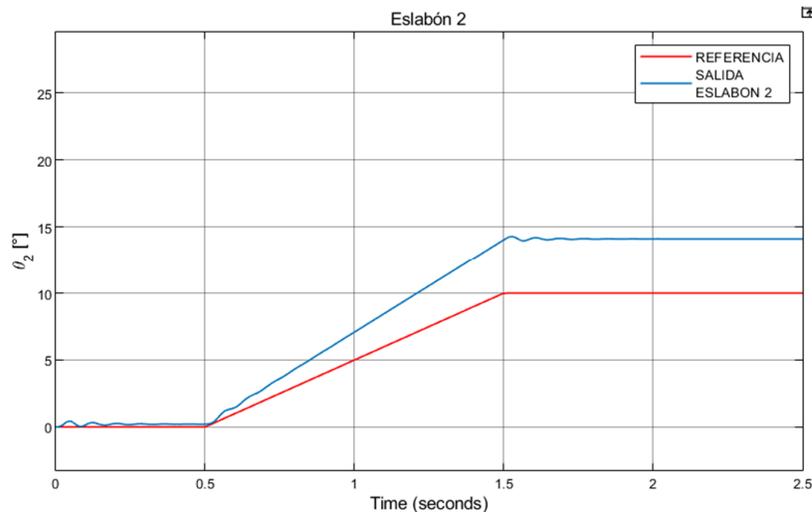


Figura 2.6. Comportamiento del eslabón 2 ante un cambio de referencia de 10 grados.

2.4 Controlador PI

Al tener un sistema bastante complejo como un sistema Gimbal, donde se tiene partes móviles mecánicas, motores sin escobillas, una minicámara y considerando el peso de cada una de las partes del sistema, se hace muy complejo realizar un modelo matemático adecuado para realizar un control específico de este tipo de sistema. Tomando en cuenta las características del sistema Gimbal se ha optado por realizar un ajuste empírico de ganancias PI (Kevin Lynch), donde se irá realizando pruebas de cada una de las ganancias de un controlador PI para alcanzar un control adecuado del sistema para cada uno de los eslabones.

Para el caso del eslabón 1 se realiza cambios en la ganancia proporcional del controlador con el objetivo de llegar lo más cercano a la referencia deseada, ya que los cambios de ganancia proporcional ayuda al sistema a tener mayor fuerza para llegar a la referencia deseada. Una vez se alcanza una buena respuesta con la ganancia proporcional se procede a variar la ganancia integral, con esto vamos a lograr eliminar el error en estado

estable en el sistema. En la Figura 2.7 se puede observar el resultado del ajuste empírico de ganancia del controlador PI.

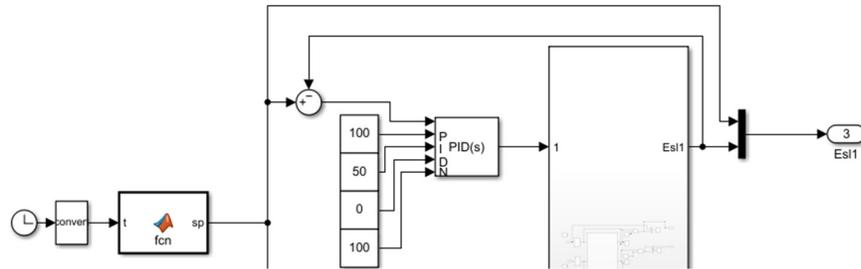


Figura 2.7. Parámetros de ganancias del controlador PI mediante ajuste empírico de Lynch para el eslabón 1.

Para el caso del eslabón 2 se realiza el mismo procedimiento, consiguiendo los parámetros del controlador PI como se muestra en la Figura 2.8.

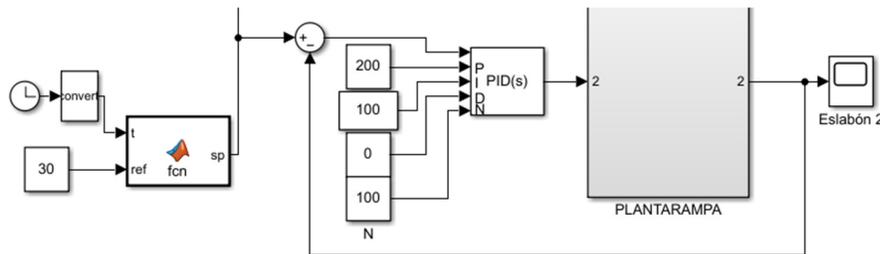


Figura 2.8. Parámetros de ganancias del controlador PI mediante ajuste empírico de Lynch para el eslabón 2.

En la Tabla 2.3 se muestra los resultados de las constantes del controlador PI para cada uno de los eslabones del sistema.

Tabla 2.3. Constantes de los controladores para los respectivos eslabones.

Constantes del controlador PI	Sistema Gimbal	
	Eslabón 1	Eslabón 2
Kp	100	200
Ki	50	100
Kd	0	0

En las Figuras 2.9 y 2.10 se puede observar las repuestas de los eslabones 1 y 2 ante un cambio de referencia de 30 grados, con lo que podemos comprobar el correcto

comportamiento del sistema al mantenerse siguiendo a la referencia en todo momento, con lo que, los parámetros del controlador cumplen con su objetivo.

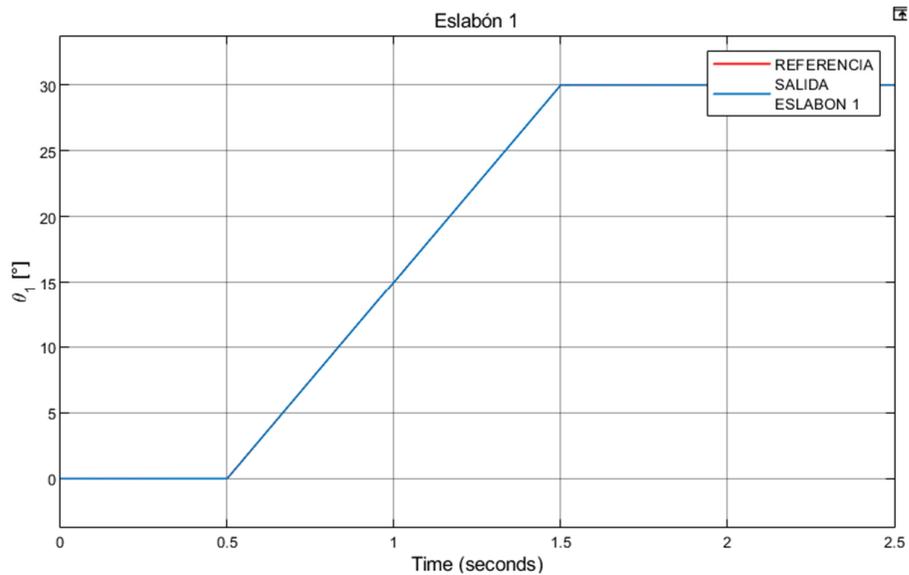


Figura 2.9. Respuesta del eslabón 1 ante un cambio de referencia de 30 grados.

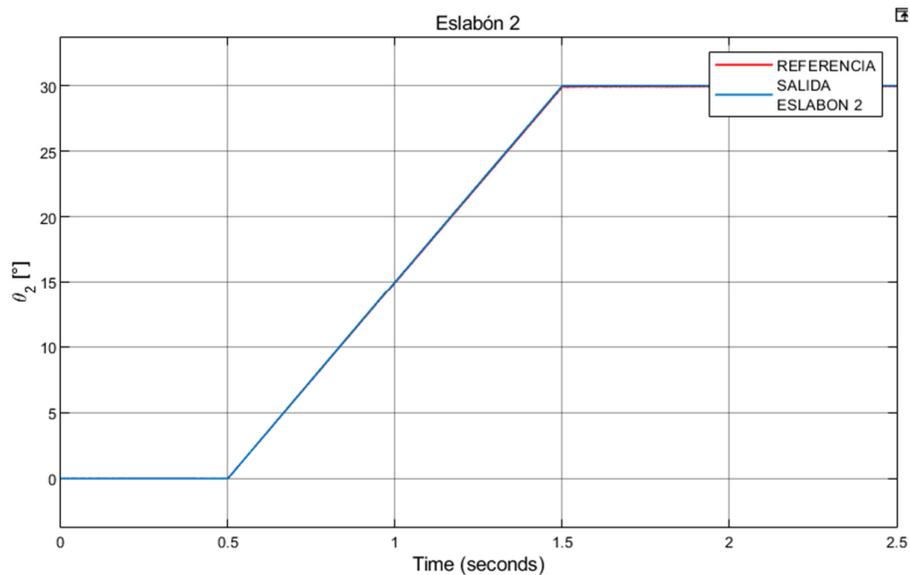


Figura 2.10. Respuesta del eslabón 1 ante un cambio de referencia de 30 grados.

2.5 Controlador PI Adaptativo

El sistema Gimbal al tener el movimiento de los eslabones tanto de ángulos positivos como de ángulos negativos, se ha considerado realizar un controlador adaptativo mediante el cambio de sentido de giro de los motores sin escobillas. El controlador adaptativo está compuesto por dos controladores de tipo PI para cada uno de los eslabones, por lo que, a

cada cambio de giro de los motores vamos a tener un controlador para el sentido horario y para el sentido antihorario. Cada uno de los controladores PI se realiza mediante el método de ajuste empírico de ganancias de un controlador PID.

En la Tabla 2.4 se observa las constantes de los diferentes controladores PI que se aplican al sistema para cada tipo de movimiento y para cada eslabón respectivamente.

Tabla 2.4. Constantes de los controladores para cada sentido de giro de los eslabones.

Constantes del controlador Adaptativo PI	Giro Positivo		Giro Negativo	
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 1	Eslabón 2
Kp	80	100	70	25
Ki	50	200	20	5
Kd	0	0	0	0

En la Figura 2.11 puede observar el sistema que se ha desarrollado para tener un control adaptativo PI, que tendrá un cambio de parámetros en el controlador dependiendo de la referencia que ingrese al sistema.

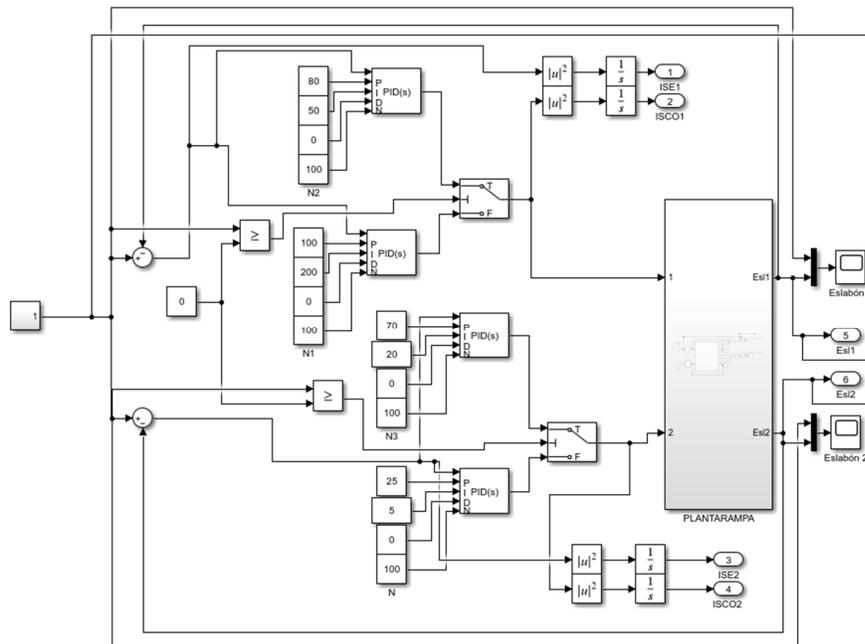


Figura 2.11. Controlador adaptativo para un sistema Gimbal mediante el tipo de referencia.

En la Figura 2.12 y 2.13 se puede observar el resultado del control adaptativo para el eslabón 1 y 2 considerando su sentido de giro. Se observa un buen comportamiento de los controladores al seguir a la referencia en todo momento, teniendo un error casi despreciable entre la referencia y la señal de salida de cada uno de los eslabones.

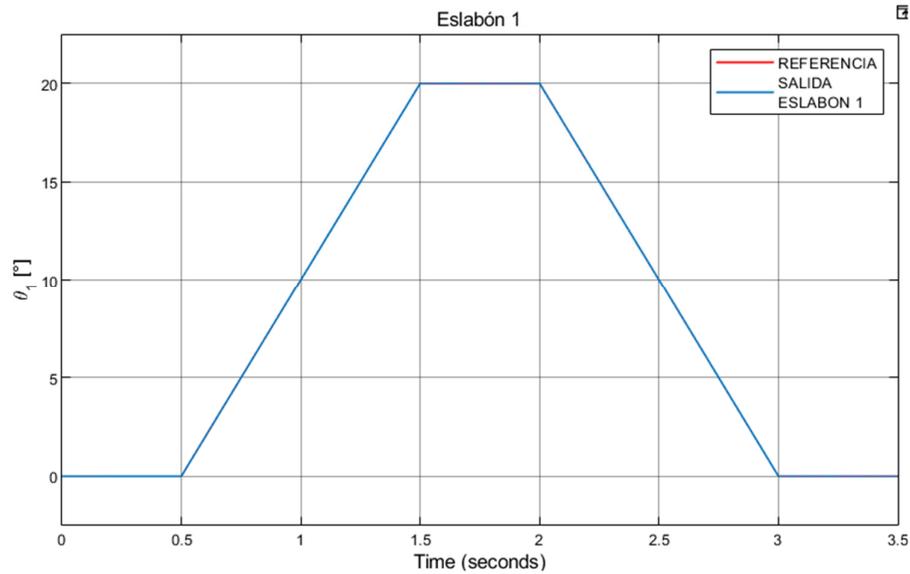


Figura 2.12. Respuesta del eslabón 1 ante un cambio de referencia positivo y negativo.

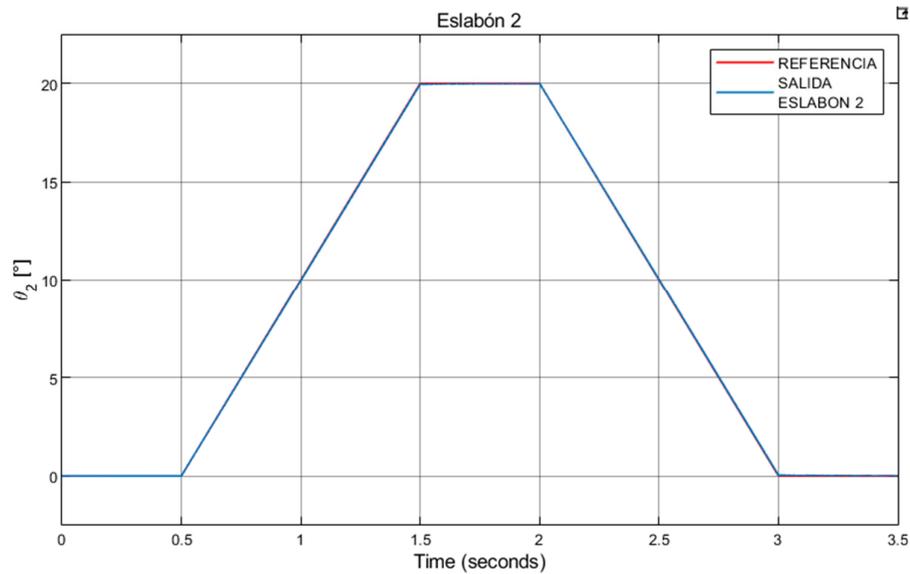


Figura 2.13. Respuesta del eslabón 1 ante un cambio de referencia positivo y negativo.

2.6 Controlador Fuzzy

El primer paso para empezar con el diseño del controlador se escoge el método difuso, para este trabajo se ha escogido el método de Mandami por medio del centroide, también

se lo ha asociado a un controlador proporcional derivativo (PD) y a la salida del controlador difuso una acción integral.

El segundo paso es determinar las entradas y salidas del proceso. Este sistema se determina como un sistema multivariable (MISO) ya que cuenta con dos variables de entrada y una de salida. En la Figura 2.14 se puede observar que las variables de entrada es el error y la derivada del error, por otro lado, se tiene la salida del sistema que será el ángulo del eslabón.

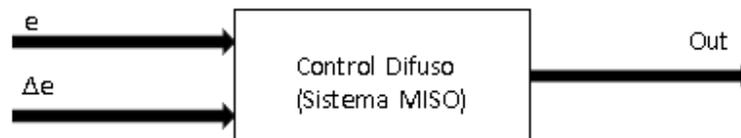


Figura 2.14. Diagrama de bloques del Control Fuzzy de la planta de temperatura

En el tercer paso se debe determinar los conjuntos difusos y cada una de las funciones de pertenencia para los espacios de entrada y salida del proceso. Para el diseño de este controlador como se observa en la Figura 2.14 se utilizarán los conjuntos difusos de forma triangular y trapezoidal. Mediante la teoría de Mandami se realizó el respectivo traslape en cada uno de los conjuntos difusos.

Para dimensionar las funciones de pertenencia se toma en cuenta las variaciones de las entradas y salidas del proceso. Para el caso del error se ha dimensionado la función de pertenencia en el intervalo de 3 a -3 grados en el primer eslabón. En la Figura 2.15 se muestra gráficamente como quedan los conjuntos difusos para la variable del error.

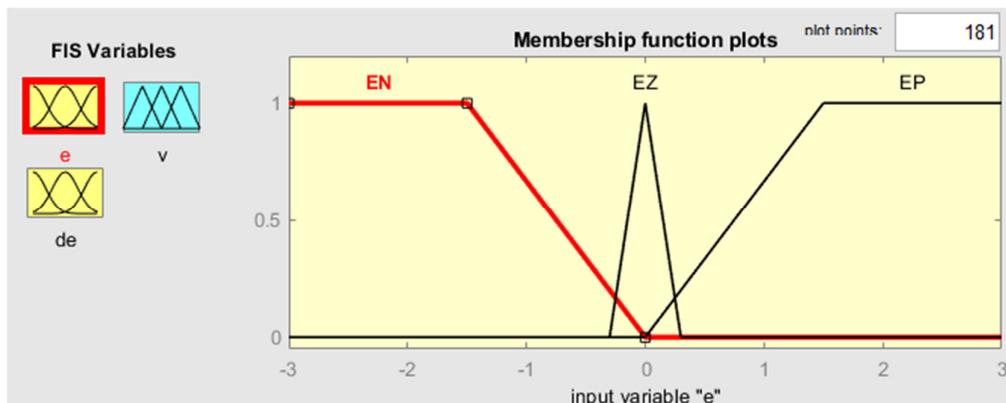


Figura 2.15. Funciones de pertenencia del error.

Dónde se tiene:

EN: error negativo

EZ: error cero

EP: error positivo

En el caso de la variable de la derivada del error se ha considerado una función de pertenencia similar a la del error, con la diferencia que se ha considerado un intervalo de 5 a -5 grados.

Las variables "error" y "derivado de error" utilizan funciones de pertenencia similares, ya que varían dentro del mismo rango. En la Figura 2.16 se muestra gráficamente como quedan los conjuntos difusos para la variable del error.

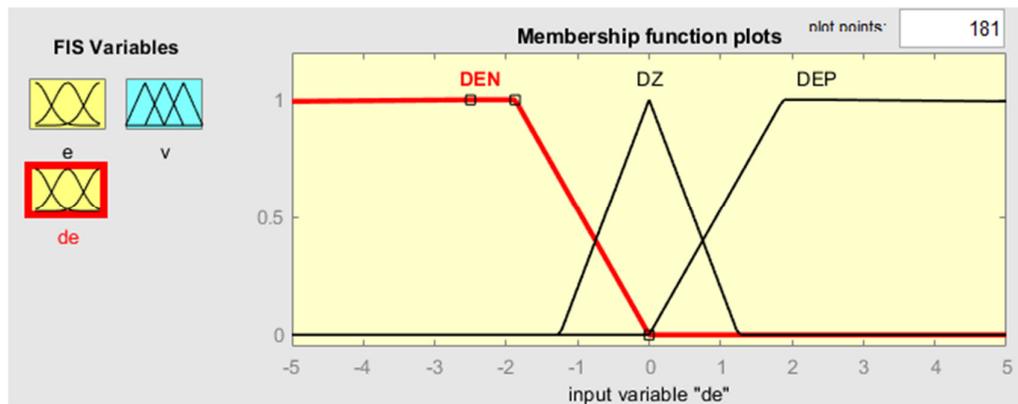


Figura 2.16. Funciones de pertenencia de la derivada del error.

Dónde:

DEN: derivada del error negativo

DZ: derivada de error cero

DEP: derivada del error positivo

Las funciones de pertenencia tanto para el eslabón 1 y el eslabón 2 al tener comportamientos similares se ha considerar tener los mismos conjuntos difusos.

Para el caso de la salida del controlador Fuzzy se va a tener un comportamiento de aumento y disminución directamente proporcional a las variables del proceso al llegar a sus puntos de ajuste. Para el diseño de las funciones de pertenencia se consideró definir pocos conjuntos difusos debido a los pequeños cambios que presenta el error y la derivada del error al realizar un cambio de referencia. Por lo tanto, para el caso del intervalo del

conjunto difuso de la salida se ha considerado ir de -30 a 30 grados y se ha realizado un total de 5 funciones de pertenencia como se puede observar en la Figura 2.17.

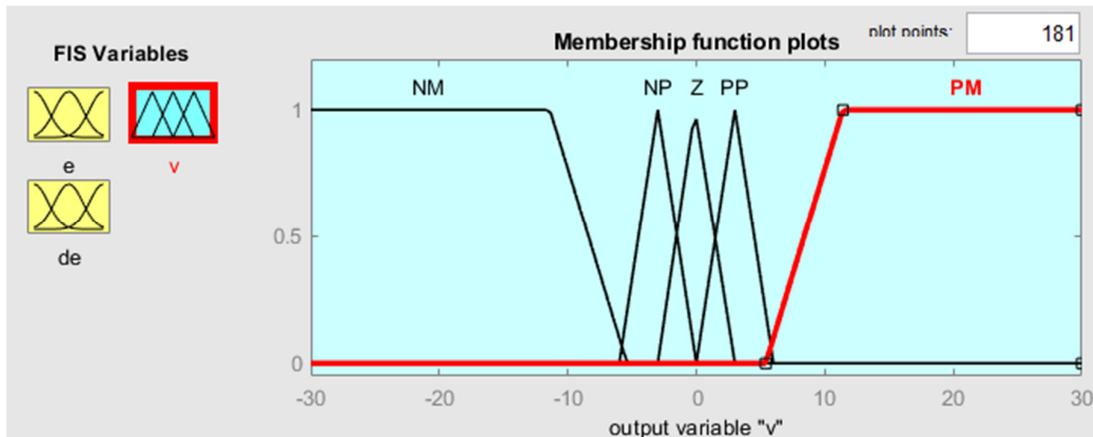


Figura 2.17. Funciones de pertenencia para la salida del sistema difuso de la planta.

Dónde:

NM: negativo mediano

NP: medio negativo

Z: cero

PP: pequeño positivo

PM: positivo mediano

Igualmente, que en el caso de las entradas se va a tener un mismo comportamiento de las salidas del sistema por lo que se aplica las funciones de pertenencia iguales para los dos eslabones.

Para continuar, se debe determinar las reglas teniendo en cuenta el comportamiento de la salida del control difuso ante los cambios que se presenten en las entradas del controlador.

Las reglas parten del comportamiento básico del proceso:

- Si tenemos EN y tenemos DEN vamos a realizar un cambio de NM.
- Si tenemos EN y tenemos DZ vamos a realizar un cambio de NM.
- Si tenemos EN y tenemos DEP vamos a realizar un cambio de NP.
- Si tenemos EZ y tenemos DEN vamos a realizar un cambio de NP.
- Si tenemos EZ y tenemos DZ vamos a realizar un cambio de Z.
- Si tenemos EZ y tenemos DEP vamos a realizar un cambio de PP.

- Si tenemos EP y tenemos DEN vamos a realizar un cambio de PP.
- Si tenemos EP y tenemos DZ vamos a realizar un cambio de PM.
- Si tenemos EP y tenemos DEP vamos a realizar un cambio de PM.

Para cada una de las relaciones entre el error y la derivada del error vamos a tener un comportamiento proporcional a la salida del controlador.

En la Tabla 2.5 tenemos el FAM (matriz de reglas difusas) para el proceso. Esta matriz representa la obtención de cada una de las reglas del controlador difuso entre la relación de cambio del error y la derivada del error con su respectivo cambio a la salida.

Tabla 2.5. Contralor de Planta FAM.

de/e	NG	NP	Z	PP	PG
NG	NG	NP	NP	PP	PP
NP	NP	NP	NP	PP	PP
Z	NP	NP	Z	PP	PP
PP	NP	NP	PP	PP	PP
PG	NP	NP	PP	PP	PG

Para conseguir esta matriz se debe realizar el proceso inverso a la fusificación. Se puede elegir varios métodos para conseguirlo, para este caso se ha elegido ir por el camino del centro de gravedad gracias a sus buenos resultados y ser unos de los métodos más utilizados en los controladores difusos.

En la Figura 2.18 se observa la integración del controlador Fuzzy al Sistema Gimbal.

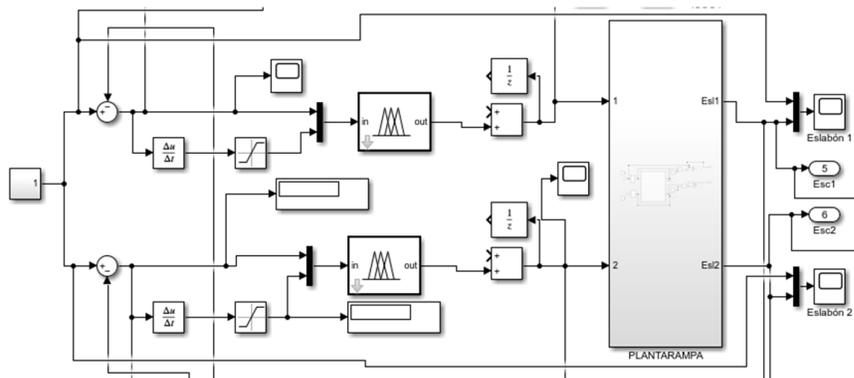


Figura 2.18. Integración del controlador Fuzzy al Sistema Gimbal en Matlab/Simulink.

En la Figura 2.19 y 2.20 se puede observar el resultado del control Fuzzy del eslabón 1 y eslabón 2 respectivamente. En cada uno de los eslabones del sistema Gimbal se puede observar un seguimiento a la referencia adecuado manteniendo un error casi despreciable.

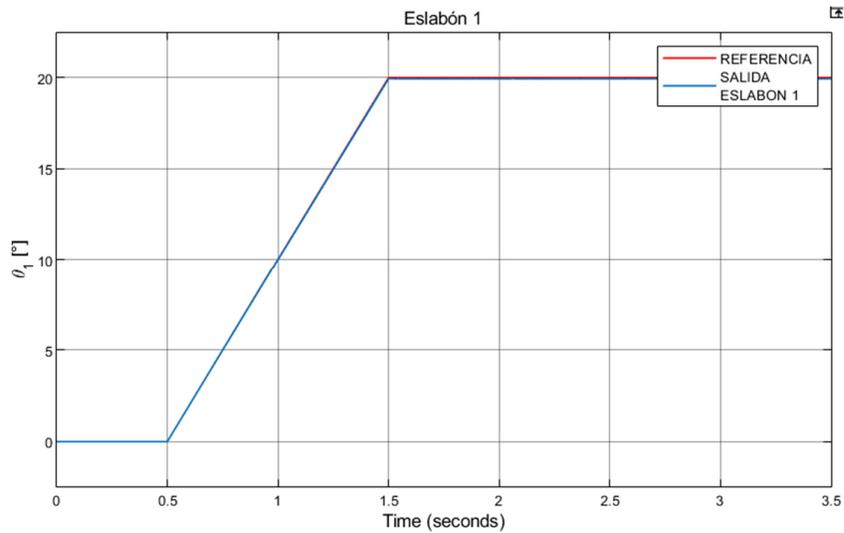


Figura 2.19. Respuesta del eslabón 1 ante un cambio de referencia de 20 grados.

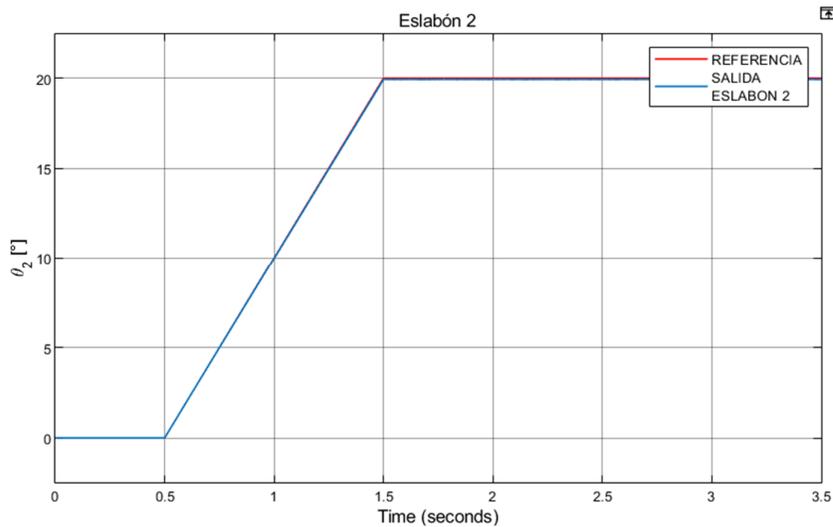


Figura 2.20. Respuesta del eslabón 2 ante un cambio de referencia de 20 grados.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Para evaluar el funcionamiento de cada uno de los controladores, se ha realizado cambios en la referencia como se observa en la Figura 3.1, que representan los movimientos de cada uno de los eslabones que dará el movimiento a la cámara. La señal de referencia cuenta con cambios de ángulos positivos y negativos, con el objetivo de ver el comportamiento de los eslabones ante los cambios de giro que se puedan presentar en la aplicación en un sistema de seguridad.

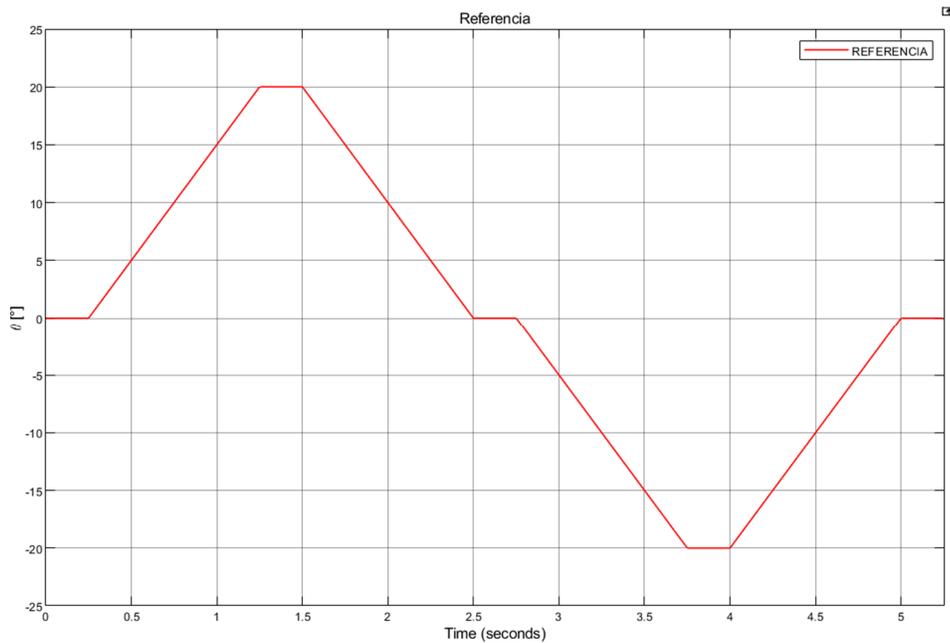
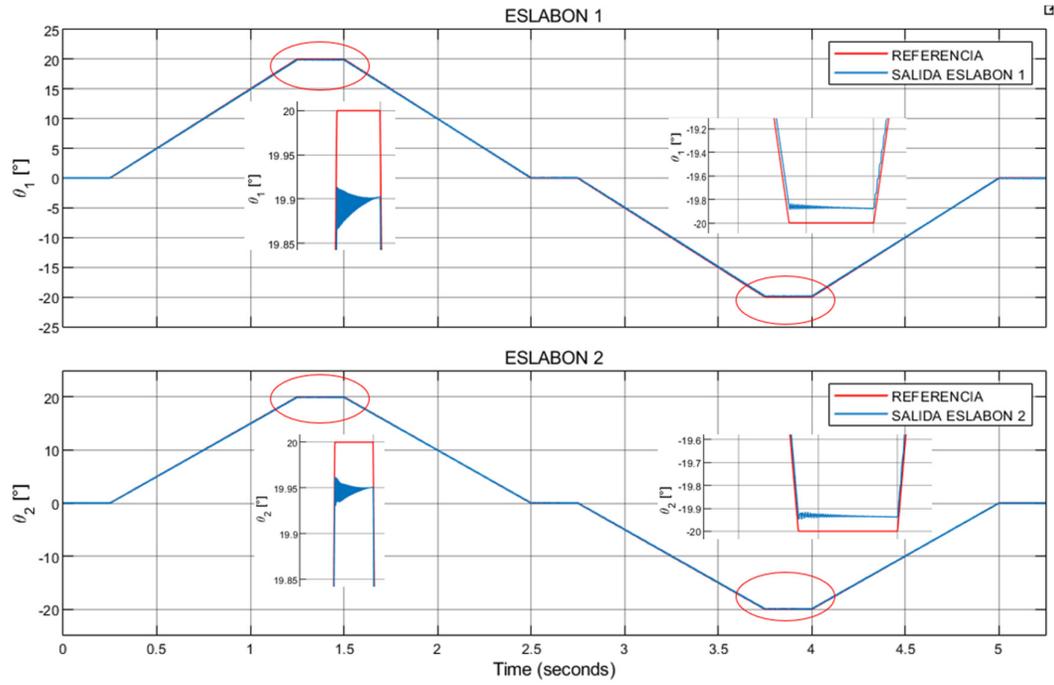
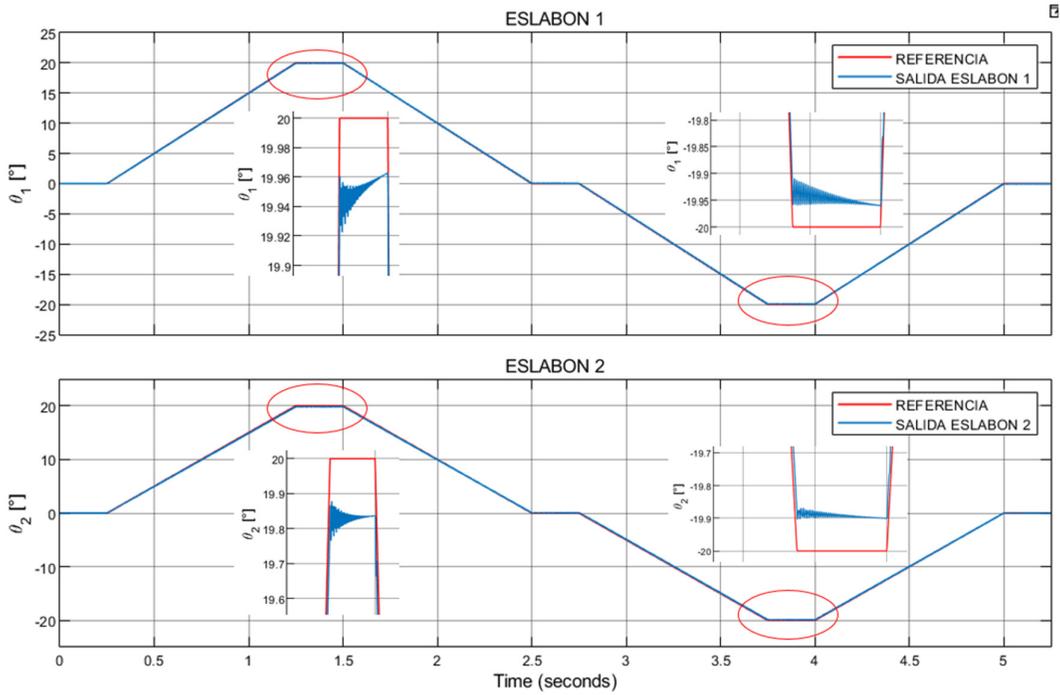


Figura 3.1. Señal de referencia para el movimiento de los eslabones.

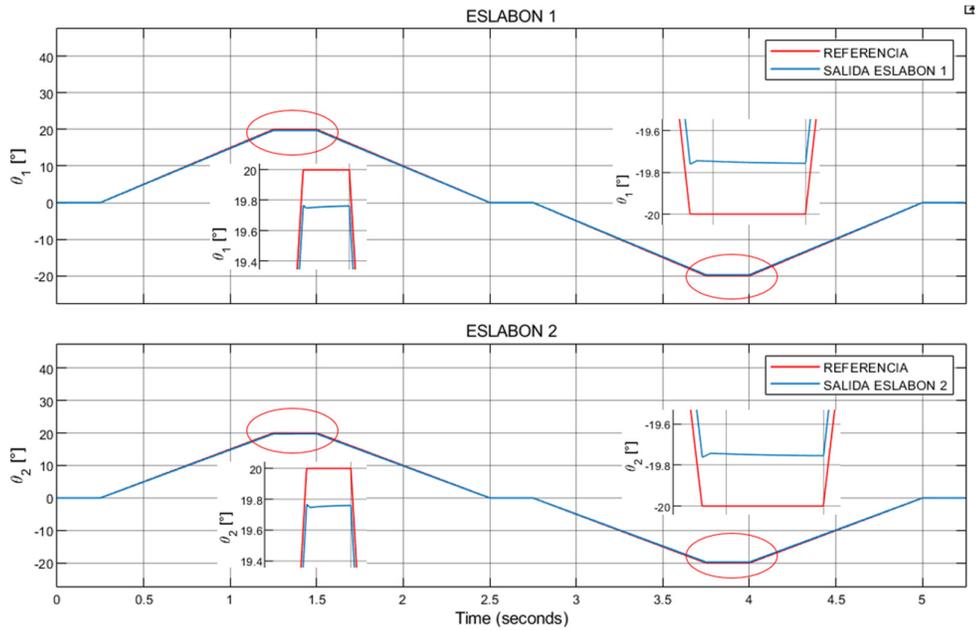
En la Figura 3.2 se puede observar las respuestas de cada uno de los controladores en cada uno de los eslabones del sistema, donde a simple vista se puede ver que cada uno de los controladores consiguen dar un buen seguimiento a la señal de referencia, y mantienen un error bastante bajo. Para poder evaluar el rendimiento de los controladores y poder comparar cada uno de los ellos es necesario utilizar los índices de desempeño.



a)

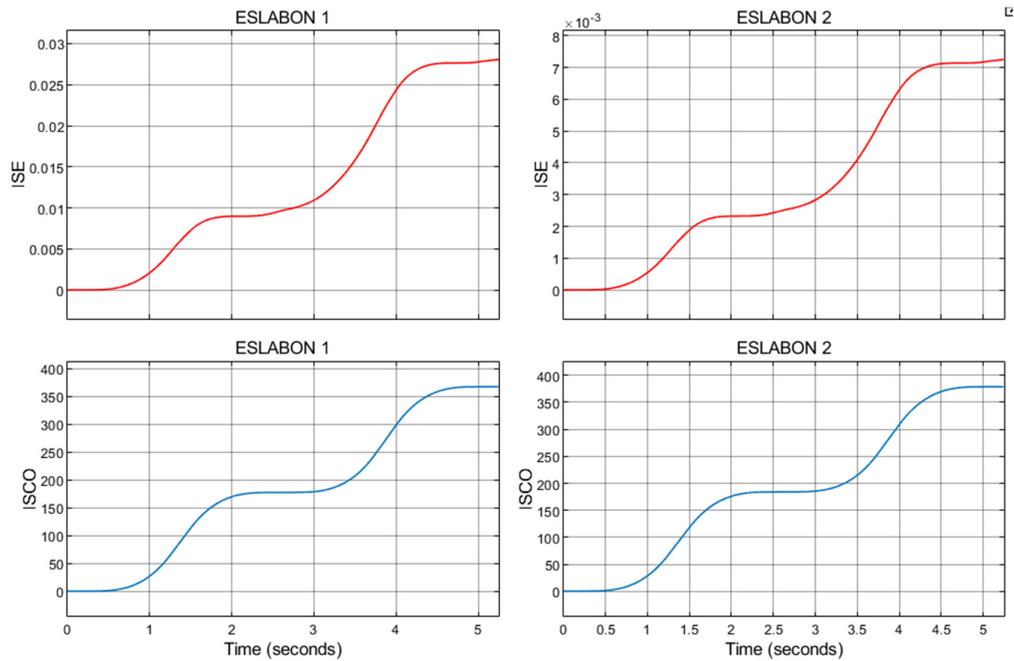


b)

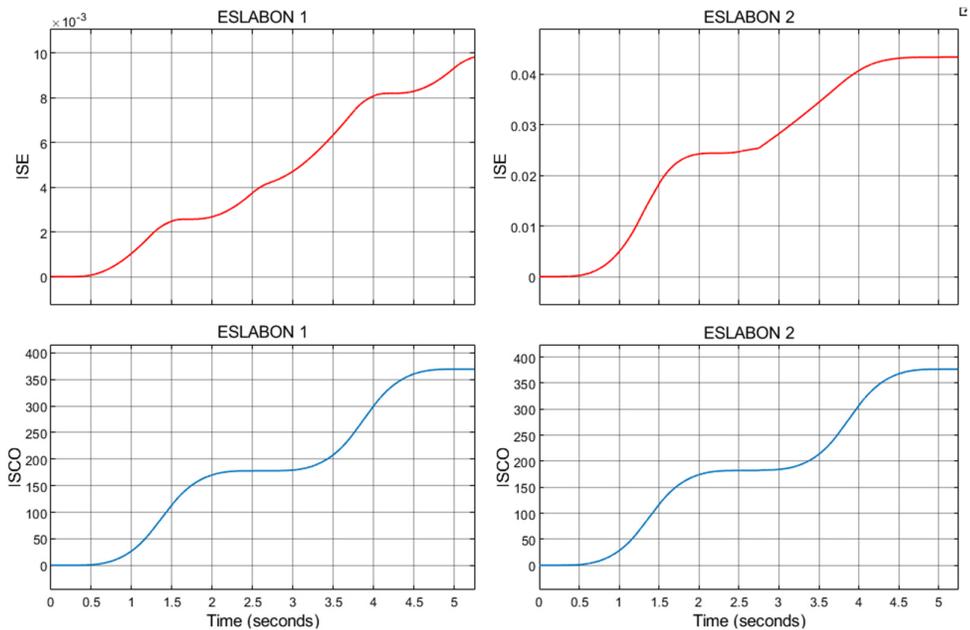


c)

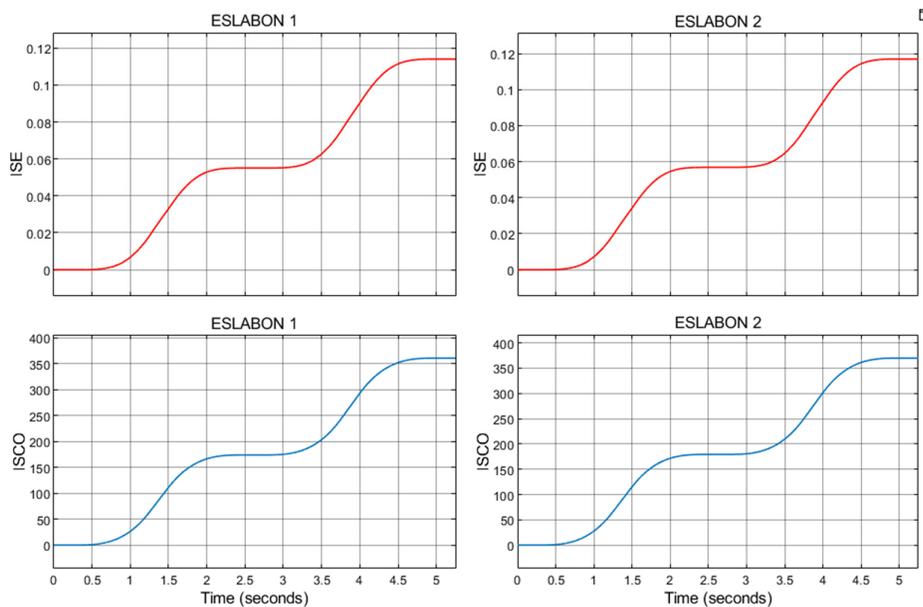
Figura 3.2. Respuesta del sistema ante una señal de referencia: a) Respuesta del sistema con el controlador PI, b) Respuesta del sistema con el controlador adaptativo PI y c) Respuesta del sistema con el controlador Fuzzy.



a)



b)



c)

Figura 3.3. Índice de desempeño ISE e ISCO: a) Respuesta del sistema con el controlador PI, b) Respuesta del sistema con el controlador adaptativo PI y c) Respuesta del sistema con el controlador Fuzzy.

Los índices de desempeño ISE e ISCO son los que se utilizan para evaluar los controladores como se puede observar en la Figura 3.3. Mediante los índices de

desempeño se evalúa el error y la respuesta del controlador ante los cambios de referencia que se presenta en el transcurso del tiempo.

El índice de desempeño ISE nos muestra el comportamiento del error en el tiempo como se muestra en la Figura 3.3, donde se puede observar que para el controlador PI se tiene cambios más bruscos en el error en el eslabón 1, lo que nos muestra que el controlador presenta un funcionamiento agresivo ante los cambios de referencia. Para el caso del controlador adaptativo PI se observa que mejora la respuesta del error en el tiempo, pero aún tiene una respuesta brusca ante los cambios de referencia como en el caso del controlador PI, por otro lado, el controlador Fuzzy tiene cambios suaves del error en el tiempo consiguiendo una mejor respuesta.

Para el caso del índice de desempeño ISCO se va a evaluar la respuesta del controlador ante los cambios de referencia al sistema en el tiempo, donde en la Figura 3.3 podemos ver la respuesta del índice ISCO de cada uno de los controladores. Se puede observar que las respuestas de cada uno de los controladores son similares en cada uno de los eslabones, con lo que podemos decir que los controladores tienen una acción de control adecuada en el tiempo sin cambios brusco y un comportamiento suave en cada uno de los cambios de referencia.

Tabla 3.1. Valores de los índices de desempeño al final de la referencia de cada uno de los controladores y eslabones.

Índices de Desempeño	Controlador PI		Controlador Adaptativo PI		Controlador FUZZY	
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 1	Eslabón 2
ISE	0.02807	0.007249	0.009829	0.04334	0,114	0,117
ISCO	367.3	379	369.5	376.7	360.9	370

En la Tabla 3.1 se puede ver los valores de los índices de desempeño al finalizar el trayecto de la referencia a la que se les ha sometido, donde se puede observar que con lo que respecta al índice ISE el controlador PI y el controlador adaptativo PI tienen ligeramente una menor respuesta ante el error a comparación del controlador Fuzzy. Para el caso del índice ISCO se puede observar que el controlador Fuzzy tiene un menor esfuerzo del controlador para llegar a referencia en el tiempo a comparación de los otros controladores.

3.2 Conclusiones

En este trabajo, se muestra que, para el uso de mini UAVs en sistemas de seguridad, la fusión entre la visión artificial, los actuadores que se presentan al integrar un gimbal a mini UAVs y las estrategias de control que se presentaron en este trabajo, permiten llegar a modernizar este tipo de sistemas, aumentando más características de seguridad y disminuyendo la intervención del ser humano en este tipo de aplicaciones.

Los controladores utilizados para lograr el control de los motores del sistema gimbal cumplieron con los requerimientos del sistema, cumpliendo con cada uno de los cambios de referencia que se presentaron. Al utilizar controladores PI mediante el ajuste empírico de constantes de Lynch, se puede observar que no es necesario recurrir a controladores complicados para llegar a controlar un sistema. Tanto para el diseño del controlador como para el funcionamiento de un sistema se busca la eficiencia, con lo que, mediante varios estudios, se ha determinado que uno de los controladores más utilizados en la industria es el controlador PI, esto se debe a su facilidad de implementación y a su buena respuesta en cada sistema, tal como se pudo comprobar en este trabajo.

El diseño del controlador Fuzzy ayuda a comprender de mejor manera el comportamiento del sistema al que deseamos controlar, por lo cual, su diseño e implementación presenta una mayor dificultad. La respuesta de los eslabones del sistema gimbal mediante el controlador Fuzzy se presentó mínimamente mejor que los controladores PI, con lo que, se considera como un controlador adecuado para este tipo de sistema.

Los índices de desempeño ayudan a evaluar el rendimiento de cada uno de los controladores según la variable de interés que se tenga en un sistema, para este trabajo se aplicó tanto para el error como la respuesta de la salida del controlador como nuestras variables de interés. Las respuestas de los índices pudieron mostrar que tanto en la respuesta del error y la respuesta del controlador, los algoritmos tienen una respuesta ligeramente diferente ante los cambios de referencia que se realizó, llegando a concluir que el controlador con mejor rendimiento y mejor respuesta es el controlador Fuzzy. También se pudo observar, mediante el índice ISE, como se presentan los cambios en el error ante los cambios de referencia y, el trabajo que hace el algoritmo para controlar el sistema y tener una respuesta suave.

3.3 Recomendaciones

Existe una variedad de controladores en la actualidad que permiten el control de sistemas industriales como de aplicaciones pequeñas, y hay que considerar la complejidad del sistema para realizar un controlador y considerar la dificultad de la implementación de un

algoritmo al sistema. Para el caso de los controladores PI, que permiten tener un buen rendimiento de la acción de control y su integración al sistema es sencilla, con lo que podemos decir que muchas veces un controlador PI nos dará un mejor o parecido resultado a utilizar un controlador con mayor complejidad de diseño.

Para el caso de los mini UAVs se debe considerar el peso del actuador, en este caso del sistema gimbal para el movimiento de la cámara al objeto de interés, ya que, el peso puede hacer que el movimiento tanto del mini UAV como del sistema gimbal no funcionen correctamente. También se debe considerar las características necesarias para cumplir con las especificaciones del sistema que se desea realizar, puesto que, se debe ser eficiente tanto en la parte mecánica del sistema como la parte electrónica necesaria para cumplir con el sistema.

Los índices de desempeño ayudan a saber cuál de los controladores tiene un mejor rendimiento, por lo que es recomendable utilizarlos en cada uno de los diseños de controladores que se deseen evaluar al integrarse en un sistema.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Baldeón Osorio Jafet R., «Automatización de un hexacóptero para despegue, aterrizaje y vuelo en un camino cerrado» Escuela Politécnica Nacional, 2015. [En Línea]. Available: Repositorio Institucional - Escuela Politécnica Nacional. [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [2] José Alejandro Quintero E., «Implementación de un dron de apoyo al centro de vigilancia de Unicentro Bogotá» Universidad Piloto de Colombia, 2018. [En Línea]. Available: 00004614.pdf (unipiloto.edu.co) [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [3] Carlos Luis Álvarez C., «Diseño y simulación de un robot móvil para monitorear plantaciones de claveles en la provincia de Cotopaxi», Escuela Politécnica Nacional, 2016. [En Línea]. Available: Repositorio Institucional - Escuela Politécnica Nacional. [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [4] José A. Barreiros F., Nicolás J. Magne T., «Diseño e implementación de un sistema controlable de imagen NDVI adaptable a una plataforma aérea remota» Escuela Politécnica Nacional, 2011. [En Línea]. Available: Repositorio Institucional - Escuela Politécnica Nacional. [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [5] Janeth Carolina Godoy O., «Control adaptativo en tiempo real» Escuela Politécnica Nacional, 2011. [En Línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3780/1/CD-3515.pdf> [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [6] Katherine Y. Quiñonez I., «Diseño y simulación de controladores PID no lineales aplicados a un biorreactor» Escuela Politécnica Nacional, 2019. [En Línea]. Available: Repositorio Institucional - Escuela Politécnica Nacional. [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [7] Sebastián Xavier Arroyo G., «Diseño, implementación y comparación de los algoritmos de control SMC, FUZZY y FSMC, de un sistema de balance Ball & Plate (Esfera y Plato) para el control de posición y seguimiento de camino de una esfera» Escuela Politécnica Nacional, 2019. [En Línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3780/1/CD-209796.pdf> [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [8] J. Martos, «Control automático con simulink de un mini dron. Aplicación al seguimiento de trayectorias mediante realimentación visual» Universidad Politécnica de Valencia, 2020. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174861/Martos%20-> -

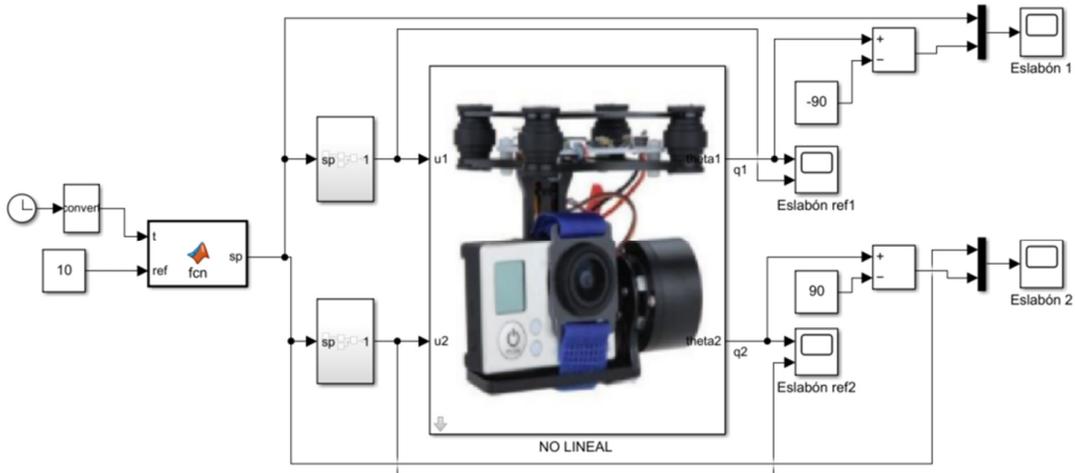
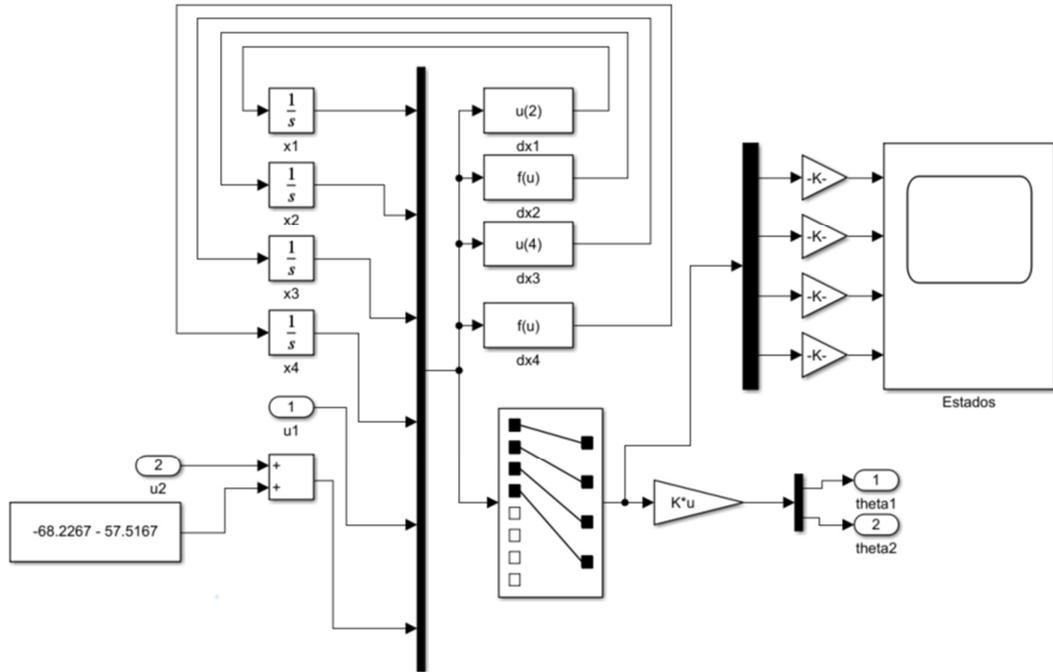
- %20Control%20automatico%20con%20Simulink%20de%20un%20mini%20dron%200Aplicacion%20al%20seguimiento%20de%20trayectoria....pdf?sequence=1. [Último acceso: 13 noviembre 2021].
- [9] Rita P. León P., «Diseño, programación e implementación de un sistema de control difuso para el proceso de producción de hidrogeno a partir del vapor sobrecalentado de agua» Escuela Politécnica Nacional, 2014. [En Línea]. Available: Repositorio Institucional - Escuela Politécnica Nacional. [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [10] Edwin M. Anchitipan N., «Diseño, simulación y comparación de esquemas de control adaptativo aplicados a plantas no lineales de parámetros variables y retardo de tiempo dominante» Escuela Politécnica Nacional, 2020. [En Línea]. Available: Repositorio Institucional - Escuela Politécnica Nacional. [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]
- [11] Novodrone. "Tipos de cámara para drones". Novodrone. [En Línea]. Available: <https://novodrone.com/tipos-de-camaras-para-drones/> (accedido el 10 de agosto de 2022). [Último acceso: 10 de agosto del 2022]
- [12] Amazon. "Amazon.com: RunCam 5 4K FPV Cámara 1080P HD Micro acción Cámara EIS compatible 145 grados FOV para FPV Racing Drone y grabación de video deportivo, naranja: Electrónica". Amazon.com. [En Línea]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/RunCam-compatible-grabación-deportivo-naranja/dp/B07SMNRLBG> [Último acceso: 10 de agosto del 2022]
- [13] Julian A. Gomez G., «Desarrollo de técnicas avanzadas de control para la estabilización de un Gimbal (2DOF)» Universidad Autonoma de Bucaramanga 2020.
- [14] O. Camacho, A. Rosales y F. Rivas. «Control de Procesos» Primera edición. Publicado bajo el sello de EPN Editorial. 2020.
- [15] Francisco Rodríguez R. y Manuel J. Lopez S., «Control Adaptativo y Robusto» Novena edición. Imprenta A. Pinelo. Camas-Sevilla. 1996.
- [16] Alomoto L. Quimbita E., «Diseño e Implementación de Controladores Difusos Aplicado a los Procesos de Presión y Flujo del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas - Espe Extensión Latacunga, Integrados por una Red Ethernet Industrial.» Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, Ecuador, 2018. [En Línea]. Available: Repositorio Institucional – Universidad de las Fuerzas Armadas. [Último acceso: 21 de agosto del 2022]
- [17] Vanessa Del Cisne Orosco O., «Desarrollo de una herramienta computacional para la sintonización de parámetros para controladores PID y SMC para el seguimiento de trayectoria de un cuadricóptero basado en algoritmos genéticos» Escuela Politécnica

Nacional, 2018. [En Línea]. Available: Repositorio Institucional - Escuela Politécnica Nacional. [Último acceso: 1 de diciembre del 2021]

5 ANEXOS

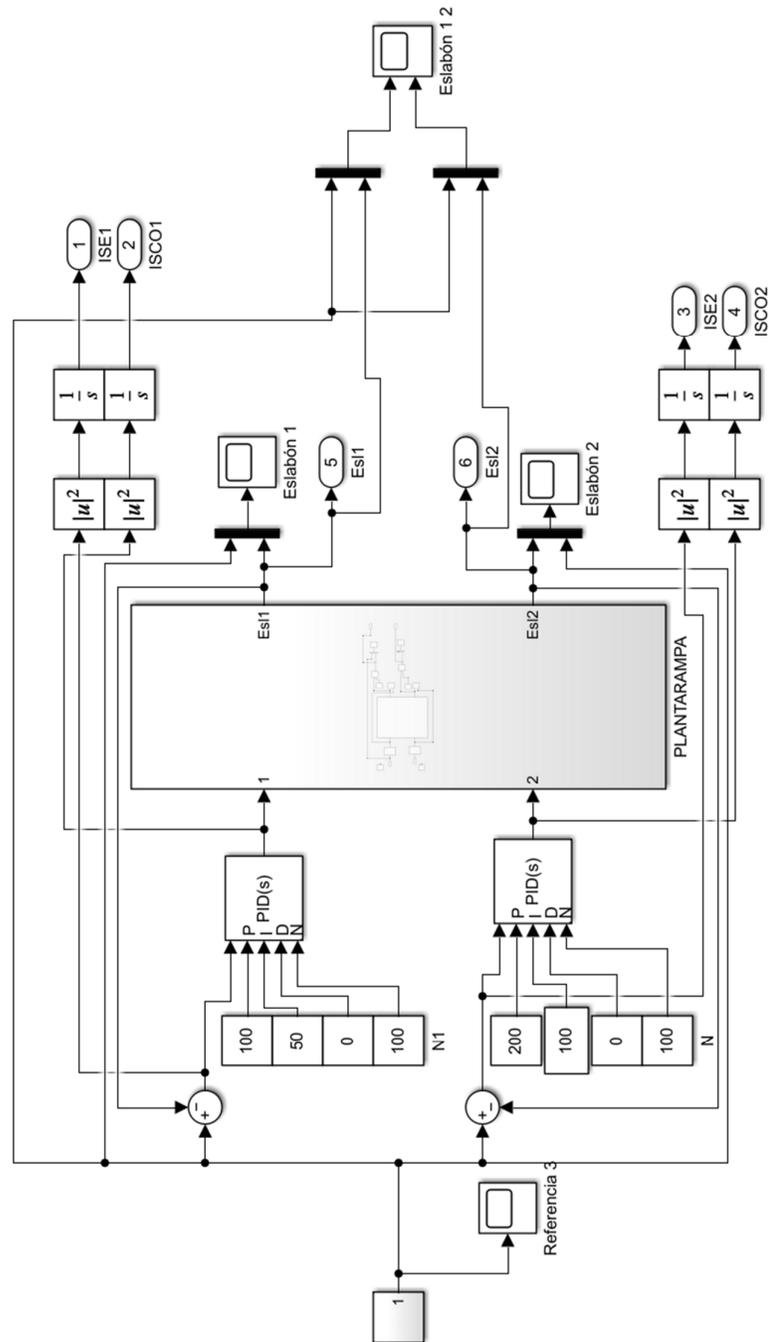
ANEXO I

Implementación del sistema Gimbal en Simulink



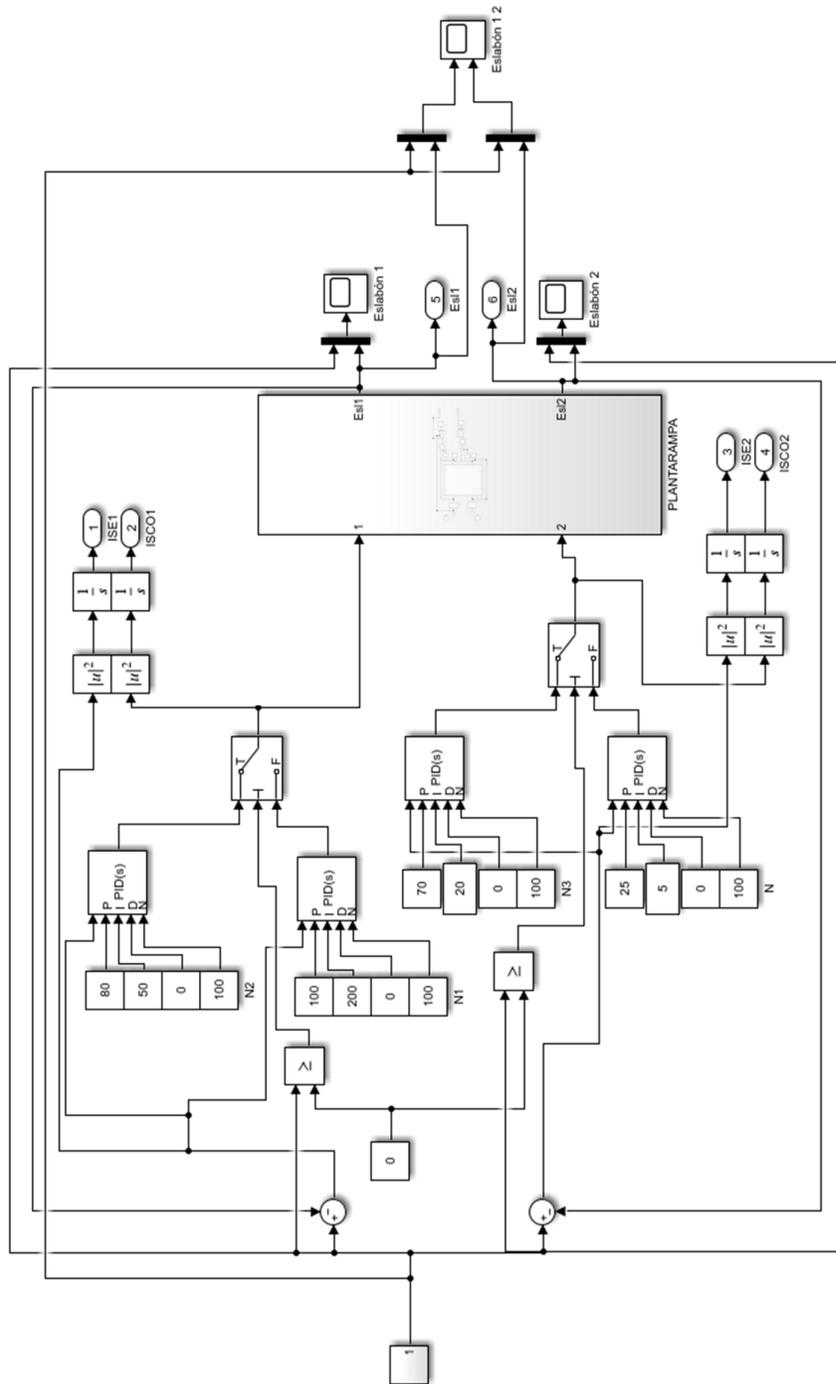
ANEXO II

Implementación del controlador PI al sistema Gimbal



ANEXO III

Implementación del controlador adaptativo PI al sistema Gimbal



ANEXO IV

Implementación del controlador Fuzzy al sistema Gimbal

