



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**T E S I S**

**CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS  
DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA EL  
MONITOREO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS**

Para obtener el grado de  
Doctor en Ciencias en Automatización y Control

PRESENTA

M. en C. Alejandro Benitez Morales

Directora

Dra. Liliam Rodríguez Guerrero

Codirector

Dr. Sergio Salazar Cruz

Comité tutorial

Dr. Hugo Romero Trejo

Dr. Omar Jacobo Santos Sánchez

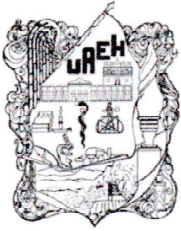
Dra. Liliam Rodríguez Guerrero

Dr. Filiberto Muñoz Palacios

Dr. Sergio Salazar Cruz

Dr. Jesús Patricio Ordaz Oliver

Pachuca de Soto, Hgo., México., diciembre, 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Área Académica de Computación y Electrónica

Department of Electronics and Computer Science

Mineral de la Reforma Hidalgo, a 26 de octubre de 2022

Número de control: ICBI-AACyE/1458/2022

Asunto: Autorización de impresión de tema de tesis.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO  
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

El Comité Tutorial del nombre del producto que indique el documento curricular del programa educativo de posgrado titulado **“Control para el seguimiento de trayectorias de vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo de cultivos agrícolas”**, realizado por el sustentante **Benítez Morales Alejandro** con número de cuenta 208214, perteneciente al programa del Doctorado en Ciencias en Automatización y Control, una vez que se ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente.

**AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

Por lo que el sustentante deberá cumplir con los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente  
“Amor. Orden y Progreso”

**Dra. Liliam Rodríguez Guerrero**  
Directora de Tesis

**Dr. Sergio Salazar Cruz**  
Codirector de Tesis

**Comité Tutorial**

Dr. Hugo Romero Trejo	Presidente
Dr. Omar Jacobo Santos Sánchez	Secretario
Dra. Liliam Rodríguez Guerrero	Vocal 1
Dr. Filiberto Muñoz Palacios	Vocal 2
Dr. Sergio Salazar Cruz	Vocal 3
Dr. Jesús Patricio Ordaz Oliver	Suplente

UAEH	
UAEH	
UAEH	
CINVESTAV	
CINVESTAV	
UAEH	

ECV/APL

Ciudad del Conocimiento  
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia  
Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,  
México. C.P. 42184  
Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 2250, 2251  
Fax 2109  
aacye\_icbi@uaeh.edu.mx





M. en C. Alejandro Benítez Morales

**Control para el seguimiento de  
trayectorias de vehículos aéreos  
no tripulados para el monitoreo  
de cultivos agrícolas**



# Agradecimientos

Esta es la parte más difícil de escribir en la tesis, porque es donde se involucran los sentimientos y la gratitud hacia las personas que forman parte de mi vida. Agradezco en primer lugar a Dios por darme el don de la vida, ya que de no tenerla no estaría aquí. A mi madre Emelia y mi padre Primitivo por quererme tal y como soy, educarme y darme todo su apoyo; a mis hermanos Daniel y José por quererme, aconsejarme y alentarme a seguir adelante a pesar de las dificultades de la vida; a mi sobrina Sofia, a todos mis tíos y primos por estar siempre al pendiente de mi.

A mis directores y asesores de tesis, a la Dr. Liliam Rodríguez Guerrero, al Dr. Sergio Salazar Cruz, al Dr. Omar Jacobo Santos Sánchez y al Dr. Jesús Patricio Ordaz Oliver por compartirme sus conocimientos, la paciencia y el apoyo que me brindaron a lo largo de los estudios de doctorado. Al Dr. Orlando García Pérez por el apoyo que me brindo para operar el cuadricóptero, el curso para programar el Pixhawk y sus consejos.

A mis amigos y mis compañeros de trabajo, por su amistad, por hacerme reír y el apoyo que me brindaron durante estos cuatro años. A mis alumnos por alentarme a realizar los estudios de doctorado.

Finalmente quiero agradecer a todas aquellas personas que he tenido el privilegio de conocer.



# Resumen

En la presente tesis se controla un vehículo aéreo no tripulado para el seguimiento de trayectorias en espacios abiertos y así poder vigilar cultivos agrícolas; con el fin de identificar indicios de las enfermedades en los cultivos; en este caso, se reconocerá a la enfermedad de mancha de asfalto en el maíz. Por ello, se realizan vuelos sobre los sembradíos para tomar videos de los cultivos y posteriormente se determina si los cultivos están enfermos.

Con la finalidad de seguir una trayectoria se desarrolla una técnica de control robusta logrando la estabilización de un cuadricóptero frente a dinámicas no modeladas desvanecientes. La síntesis del control robusto propuesto se basa en el enfoque de Lyapunov y el método backstepping, el cual permite construir un algoritmo de control iterativo. Con el propósito de comparar el desempeño del controlador propuesto contra un controlador Derivativo Proporcional (PD) obteniéndose resultados experimentales en un ambiente al aire libre. Para comparar las respuestas de ambos controladores en el sistema, se calcula el error absoluto integral y la desviación estándar del error.



# Abstract

In this thesis an unmanned aerial vehicle is controlled to track trajectories in outdoor environment to monitor crops, in order to identify diseases in crops; in this case, tar spot disease will be recognized. To do this, flights are carried out over fields to take videos of the crops and later it will be determined if the crop is ill.

A robust control technique is developed to achieve the stabilization of the quadcopter stabilization against unmodeled vanishing dynamics. The synthesis of the proposed robust control is based on the Lyapunov approach and the backstepping method allowing to construct an iterative control algorithm. To compare the performance of the proposed controller, a Proportional Derivative (PD) controller is used to obtain experimental results in an outdoor environment. To compare the closed-loop system responses with both controllers, the integral absolute error is computed and calculated the error standard deviation.



# Índice general

Agradecimientos . . . . .	III
Resumen . . . . .	V
Abstract . . . . .	VII
Índice general . . . . .	IX
Índice de figuras . . . . .	XII
Índice de tablas . . . . .	XIV
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	6
1.3. Justificación . . . . .	6
1.4. Hipótesis . . . . .	7
1.5. Objetivos . . . . .	7
1.5.1. Objetivo general . . . . .	7
1.5.2. Objetivos específicos . . . . .	7
1.6. Metodología . . . . .	8
1.7. Publicación . . . . .	8
1.8. Organización del trabajo . . . . .	8
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Modelo dinámico del quadricóptero . . . . .	11
2.2. Preliminares de control . . . . .	17
2.2.1. Control backstepping clásico . . . . .	17
2.2.2. Control backstepping con entrada virtual senoidal [1] . . . . .	18
2.3. Antecedentes del procesamiento de imágenes . . . . .	19
2.3.1. Espectro visible . . . . .	19
2.3.2. Propiedades de color . . . . .	20
2.4. Modelos básicos de color . . . . .	21
2.4.1. Modelo de color RGB . . . . .	21
2.5. Espacios de colores perceptivos . . . . .	22
2.5.1. Modelo de color HSV . . . . .	22

2.6.	Espacios de color ortogonales . . . . .	23
2.6.1.	Modelo del color YCbCr . . . . .	23
2.7.	Espacio de color perceptiblemente uniforme . . . . .	23
2.7.1.	Modelo del color CIE-Lab . . . . .	24
2.7.2.	Antecedentes del procesamiento de imágenes . . . . .	24
2.8.	Descripción de la plataforma . . . . .	26
2.9.	Comentarios del capítulo . . . . .	28
<b>3.</b>	<b>Backstepping robusto ante perturbaciones</b>	<b>31</b>
3.1.	Backstepping robusto ante la perturbación acoplada en la entrada . . . . .	31
3.2.	Síntesis de los controladores para el cuadricóptero . . . . .	34
3.2.1.	Controlador del subsistema de altitud . . . . .	35
3.2.2.	Controlador del subsistema del ángulo de guiñada . . . . .	36
3.2.3.	Controlador del subsistema $x - \theta$ . . . . .	37
3.2.4.	Controlador del subsistema $y - \varphi$ . . . . .	41
3.3.	Conclusiones del capítulo . . . . .	44
<b>4.</b>	<b>Sistema de visión y procesamiento de las imágenes</b>	<b>47</b>
4.1.	Introducción . . . . .	47
4.2.	Sistema de visión . . . . .	47
4.3.	Procesamiento de la imagen . . . . .	50
4.3.1.	Método de segmentación RGB . . . . .	51
4.3.2.	Método de segmentación HSV . . . . .	53
4.3.3.	Método de segmentación YCbCr . . . . .	54
4.3.4.	Método de segmentación CIE-Lab . . . . .	55
4.4.	Implementación de los métodos de segmentación . . . . .	55
4.5.	Comentarios del capítulo . . . . .	59
<b>5.</b>	<b>Resultados experimentales del vuelo del cuadricóptero en exteriores</b>	<b>61</b>
5.1.	Resultados experimentales al aplicar el control backstepping propuesto . . . . .	61
5.2.	Comentarios del capítulo . . . . .	69
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>71</b>
6.1.	Conclusiones . . . . .	71
6.2.	Trabajo a futuro . . . . .	72
	<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
<b>A.</b>	<b>Simulación de los controladores</b>	<b>80</b>
A.1.	Resultados de simulación . . . . .	81

**B. Artículo publicado.**

**93**

**C. Análisis de similitud**

**115**

# Índice de figuras

2.1. Modelo en 3D del cuadricóptero; donde se aprecian las variables del sistema.	12
2.2. Espectro visible [2]. . . . .	19
2.3. Modelo del color RGB [3]. . . . .	21
2.4. Modelo del color HSV [4]. . . . .	23
2.5. Modelo del color CIE-Lab [5]. . . . .	24
2.6. Plataforma experimental. . . . .	27
2.7. Esquema del cuadricóptero en configuración "X" [6]. . . . .	27
4.1. Cámara GoPro Hero 8 Black. . . . .	48
4.2. Plataforma experimental. . . . .	49
4.3. Esquema para la aplicación de la metodología de segmentación. . . . .	51
4.4. Imagen Capturada. . . . .	52
4.5. Imagen procesada mediante segmentación RGB. . . . .	52
4.6. Imagen procesada mediante segmentación HSV. . . . .	53
4.7. Imagen procesada mediante segmentación YCbCr. . . . .	54
4.8. Imagen procesada mediante segmentación CIE-Lab. . . . .	55
4.9. Fotografía obtenida al sobre volar un cultivo de maíz. . . . .	56
4.10. Imagen aplicando los umbrales de la segmentación RGB. . . . .	57
4.11. Imagen aplicando los umbrales de la segmentación HSV. . . . .	57
4.12. Imagen aplicando los umbrales de la segmentación YCbCr. . . . .	57
4.13. Imagen aplicando los umbrales de la segmentación CIE-Lab. . . . .	58
4.14. Imagen con alto grado de mancha de asfalto . . . . .	58
4.15. Imagen aplicando los métodos de segmentación. . . . .	59
5.1. Posiciones traslacionales al aplicar los controles del backstepping propuesto.	63
5.2. Seguimiento de la trayectoria al aplicar los controles del backstepping propuesto; vista en 3D . . . . .	63
5.3. Seguimiento de la trayectoria al aplicar los controles del backstepping propuesto; vista en 2D. . . . .	64
5.4. Señales del error al aplicar los controles del backstepping propuesto. . . . .	64

---

5.5. Señales de control al aplicar los controles del backstepping propuesto. . . . .	65
5.6. Posiciones traslacionales al aplicar los controles del PD. . . . .	65
5.7. Seguimiento de la trayectoria al aplicar los controles del PD; vista en 3D. . .	66
5.8. Seguimiento de la trayectoria al aplicar los controles del PD; vista en 2D. . .	66
5.9. Señales del error al aplicar los controles del PD. . . . .	67
5.10. Señales de control al aplicar los controles del PD. . . . .	67
A.1. Diagrama de simulación del sistema en lazo cerrado . . . . .	80
A.2. Posiciones traslacionales al aplicar los controladores; circunferencia . . . . .	82
A.3. Seguimiento de trayectoria de la circunferencia . . . . .	83
A.4. Señales de error; circunferencia . . . . .	83
A.5. Señales de control, control backstepping propuesto vs PD; circunferencia . .	84
A.6. Posiciones traslacionales al aplicar los controladores; lemniscata . . . . .	85
A.7. Seguimiento de trayectoria de la curva lemniscata . . . . .	85
A.8. Señales de error; lemniscata . . . . .	86
A.9. Señales de control, control backstepping propuesto vs PD; lemniscata . . .	86
A.10. Posiciones traslacionales al aplicar los controladores; lissajous . . . . .	87
A.11. Seguimiento de trayectoria de la curva Lissajous . . . . .	88
A.12. Señales de error; lissajous . . . . .	88
A.13. Señales de control, control backstepping propuesto vs PD; lissajous . . . .	89
A.14. Posiciones traslacionales al aplicar los controladores; deltoide . . . . .	90
A.15. Seguimiento de trayectoria de la curva Deltoide . . . . .	90
A.16. Señales de error; deltoide . . . . .	91
A.17. Señales de control, control backstepping propuesto vs PD; deltoide . . . . .	91

# Índice de tablas

2.1. Lista de precios de los componentes del cuadricóptero . . . . .	28
5.1. Parámetros de los controladores de cada subsistema . . . . .	62
5.2. Comparación del IAE durante el seguimiento de la trayectoria . . . . .	68
5.3. Comparativa de los valores de control absoluto . . . . .	68
A.1. Parámetros del controlador para las curvas de la circunferencia y la lemniscata	81
A.2. Parámetros del controlador para las curvas Lissajous y Deltoide . . . . .	82
A.3. Comparación de IAE durante el seguimiento de trayectorias . . . . .	92

# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se investigan los antecedentes sobre la producción de maíz en nuestro país, cómo se detectan las enfermedades en los cultivos y se obtiene información sobre la enfermedad de la mancha de asfalto; además, se explora cómo la tecnología ha ayudado a detectar las enfermedades en los sembradíos utilizando vehículos aéreos; posteriormente, con base en esta investigación se plantea el problema y se justifica la realización de este proyecto doctoral; por último, se plantean los objetivos y la metodología para su realización.

### 1.1. Antecedentes

El maíz es uno de los cereales que más se produce y consume a nivel mundial. Se utiliza principalmente con fines alimentarios, además de la producción de biocarburantes, para extraer almidón, aceite y otras sustancias destinadas a usos industriales [7].

De acuerdo con cifras del Departamento de Agricultura Norteamericano (USDA), en el ciclo 2019-2020 México ocupó el segundo lugar como importador de maíz en el mundo, superando, por tercer año consecutivo, a Japón. En el último quinquenio la demanda de maíz importado en México presenta una tendencia alcista, con una tasa media de crecimiento anual de 5.8 %, en este periodo, debido al crecimiento de la actividad pecuaria. Para el ciclo 2019-2020 las importaciones de México se incrementaron en 1 % respecto del año previo, llegando a las 17.5 millones de toneladas, cifra histórica. La producción en México en el año 2019 fue de 25,600,000 de toneladas y el consumo de 43,688,000 de toneladas [7], ésto genera un déficit en el país del 58.59 %, por lo que, se aprecia que México no es autosuficiente.

El principal ciclo productivo en México es el de primavera-verano, en él se produce más del 83 % del total. El 86 % de la superficie utilizada corresponde al cultivo de temporal, lo que implica que la producción dependa mayormente de las lluvias. Por otro lado, el ciclo que

presenta una producción más estable es el de otoño-invierno, ya que el 62 % de la superficie corresponde a la modalidad de riego. Cabe mencionar que en nuestro país el 60 % de la producción del maíz proviene de los pequeños productores [8].

Los principales problemas del cultivo de maíz en México están asociados con la baja productividad por hectárea, los problemas fitosanitarios, los altos costos de producción y la competencia ejercida por el maíz subsidiado proveniente de Estados Unidos. Los principales problemas fitosanitarios son malezas, enfermedades y plagas, estas últimas destacan debido al daño que ocasionan y se estima que provocan pérdidas en el rendimiento de 30 %, presentándose desde el establecimiento del cultivo hasta el almacenamiento del grano [8].

El maíz es susceptible a varias enfermedades, las cuales afectan el desarrollo normal de la planta. Estas son favorecidas por las condiciones ambientales, el tipo de suelo y por situaciones como la migración, establecimiento y supervivencia de los insectos. Las enfermedades virales, espiroplásmicas y fitoplásmicas se presentan en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, y su importancia está relacionada con el grado de severidad, la incidencia y la época de infección. Las enfermedades foliares causadas por hongos se presentan con mayor frecuencia en las etapas finales del cultivo, y solamente son importantes cuando su aparición ocurre antes de floración o muy cercana a ella, o cuando son de carácter epidémico, como es el caso de la mancha de asfalto [9].

La mancha de asfalto, desde la década de los 90's, se ha convertido en el principal factor limitante de la producción de maíz en zonas del trópico húmedo, subhúmedo, diversas regiones de México y Centroamérica, principalmente en áreas con alta humedad relativa y altitudes de 1300 a 2300 metros sobre el nivel del mar. La incidencia de la mancha de asfalto del maíz provoca severas pérdidas en rendimiento y deteriora la calidad del forraje [9].

La mancha de asfalto se debe a tres microorganismos fungosos (hongos) “*Coniothyrium phyllachorae*”, “*Monographella maydis*” y “*Phyllachora maydis*” [10]. Es una enfermedad que ocurre con mayor frecuencia en zonas frescas y húmedas, especialmente en lotes cercanos a los ríos, o en suelos con nivel freático alto, pesados o con tendencia al encharcamiento. Es favorecida por temperaturas entre los 17 y 22 grados centígrados, con una humedad relativa superior al 75 %. La humedad sobre las hojas durante la noche y en la mañana facilita la infección y el establecimiento de los patógenos, los cuales pueden sobrevivir en los residuos de cosecha por algún tiempo. Los síntomas iniciales son pequeños puntos negros ligeramente elevados, que se distribuyen por toda la lámina foliar. Es importante estar atentos a la aparición de estos puntos alquitranados porque es la fase inicial de la enfermedad y la infección puede diseminarse rápidamente a las hojas superiores y a otras plantas. Si la enfermedad aparece en etapas muy tempranas antes de la floración, las mazorcas pierden peso y los granos se observan deshidratados, de consistencia flácida y débilmente sujetos

a esta. Casi siempre la enfermedad se presenta después de floración, sin embargo, bajo condiciones de siembras continuas se presenta en prefloración. La severidad y facilidad de diseminación la ubican como una enfermedad muy agresiva y si los factores climatológicos la favorecen puede ocasionar muerte prematura de la hoja y quemar el cultivo en corto tiempo [10].

Los métodos estándar de detección de enfermedades en la práctica dependen principalmente de inspecciones visuales por parte de los fitopatólogos y los agricultores [11]. Los síntomas visibles de la enfermedad en las plantas, se observan e identifican a simple vista, pero requiere mucho tiempo, es costoso y, a menudo, provoca un retraso en la protección de las plantas contra una etapa temprana de la enfermedad [12, 13]. Se vuelve muy difícil detectar oportunamente la enfermedad en un campo extenso. Más aún, la precisión de la identificación de la enfermedad se ve afectada por la experiencia y los niveles de conocimiento de cada fitopatólogo [12]. Por tanto, es fundamental desarrollar sistemas más objetivos y automatizados para la detección rápida y fiable de enfermedades. Además, estos nuevos enfoques deben ser efectivos para la detección temprana de infecciones, con el fin de garantizar una prevención eficaz y una intervención temprana antes de que la enfermedad se propague a niveles incontrolables que requieran un alto uso de pesticidas y herbicidas [13].

Actualmente, existe una gran variedad de métodos basados en la adquisición y análisis de imágenes, las cuales han demostrado gran potencial para la detección de enfermedades en los cultivos; tales como cámaras RGB (rojo, verde y azul), cámaras térmicas, sensores basados en la fluorescencia de la clorofila, cámaras multiespectrales e hiperespectrales [14, 15, 16]. Por ejemplo, la imagen fotográfica digital RGB se utiliza para detectar el estrés biótico en el cultivo a través de diferentes espacios de color e información espacial [17, 18]. Para detectar enfermedades de los cultivos se utiliza un sensor infrarrojo térmico midiendo la temperatura, la cual ha demostrado estar relacionada con el estado hídrico del cultivo y el microclima [18, 19].

Sin embargo, las imágenes RGB solo llevan la información de los tres colores y las imágenes infrarrojas térmicas solo perciben la radiación en función de la temperatura de los cuerpos; además, su calidad depende del ángulo y la distancia de la cámara, lo que afecta la precisión en la detección de enfermedades de las plantas [20]. El sensor de fluorescencia de clorofila es una nueva tecnología que se ha utilizado para controlar la fotosíntesis de las plantas e identificar algunas enfermedades de los cultivos, como la roya y otras infecciones fúngicas [21]. Sin embargo, la técnica de fluorescencia de clorofila para la detección de enfermedades de las plantas requiere que el sensor tenga una resolución espectral muy alta (siempre  $<1$  nm) y las plantas necesitan estar en un entorno de observación confinado. Por lo tanto, este método es difícil de implementar a nivel de campo o a mayor escala [22]. Más allá de las imágenes digitales RGB habituales, los sensores multiespectrales (5-12 bandas) e

hiperespectrales (cientos de bandas) proporcionan información desde el rango visible hasta el infrarrojo cercano invisible [23]; estos sensores utilizan información de reflectancia de color de alta fidelidad y pueden adquirir una amplia gama de espectro de luz, convirtiéndose en una fuente potencial para identificar enfermedades de los cultivos.

Específicamente, se han utilizado imágenes multiespectrales para monitorear con éxito el ciclo de crecimiento del cultivo, que incluye información sobre la eficiencia del uso de la luz fotosintética de los cultivos, el contenido de clorofila de las hojas y el estrés hídrico [21, 24, 25]. Con un número de banda más alto y un ancho de banda más estrecho, los datos hiperespectrales podrían proporcionar información más detallada y podrían discriminar objetos que pueden ser agrupados involuntariamente por estos sensores [14].

Los sensores hiperespectrales se pueden acoplar a los VANT (vehículo aéreo no tripulado) para monitorear cultivos a una determinada altura [23, 26]. Estos sensores pueden adquirir datos continuos tanto espacial como espectralmente representados con tres dimensiones mediante la adición de información espacial. Centrándose en la clasificación de datos hiperespectrales para diferentes aplicaciones, varios estudios han demostrado una mejora significativa en el rendimiento de los algoritmos de clasificación utilizando información tanto espectral como espacial. Entre ellos, los enfoques basados en redes neuronales convolucionales, que utilizan capas para tratar la información conjunta espacial-espectral, lograron un alto rendimiento [27].

En la agricultura de precisión, hay empresas que se dedican a ayudar a los agricultores a inspeccionar cultivos, plantar semillas y controlar plagas mediante los sistemas aéreos no tripulados [28]. Los drones agrícolas de Wingtra [29] brindan a los productores servicios de vigilancia de los cultivos, para identificar el estrés de la siembra, crear planes de tratamiento, rastrear el crecimiento de las plantas y mucho más. Con cámaras RGB de alta resolución y sensores multiespectrales profesionales, los drones como WingtraOne pueden detectar y cuantificar los problemas de salud de los cultivos desde el principio. Estos valiosos conocimientos pueden reducir los costos de insumos y aumentar el rendimiento. La compañía DJI tiene un drone DJI P4 Multiespectral [30] el cual tiene una cámara de 5 bandas más una cámara RGB, con estas se podrían medir diferentes indicadores útiles en la agricultura de precisión, por ejemplo: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación verde rojo (GRVI), el índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI), el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), el índice de vegetación perpendicular (PVI); entre otros. El costo del dron esta entre 6500 y 9100 dólares [30]; el precio en una tienda, en México, es de \$199,999 MXN [16]. También se pueden conseguir las cámaras multiespectrales con un precio que oscila desde los 4900 a los 6300 dólares [15, 31]. Como se puede apreciar hay bastantes herramientas para la agricultura de precisión, pero lamentablemente resulta costosa para la mayoría de los agricultores mexicanos; por

lo que, no es viable utilizarla en sus sembradíos, por tal motivo se plantea desarrollar un sistema de monitoreo de los cultivos para detectar enfermedades en el maíz, en particular la mancha de asfalto.

Hoy en día, el uso de VANT está creciendo y se espera que los sistemas multirrotores reemplacen a los aviones tripulados en una variedad de actividades [32]. Ejemplos de tales actividades incluyen misiones de búsqueda y rescate, recopilación de datos, agricultura de precisión y entrega de carga útil [33, 34, 35, 36]. Los cuadricópteros pueden cambiar rápidamente de dirección y realizar despegues y aterrizajes verticales, lo que los hace cada vez más populares.

Los vehículos aéreos no tripulados a pequeña escala suelen sufrir los efectos de las ráfagas de viento exterior y la dinámica no modelada, estos implican cambios en los momentos de inercia que provocan incertidumbres paramétricas. Esta situación proviene del acoplamiento entre las fuerzas y los momentos producidos por sus actuadores, que comúnmente se pasan por alto en los diseños prácticos [37]. Dado que un sistema de control se basa en el modelo nominal, los parámetros inciertos y la dinámica no modelada afectan su rendimiento. En los VANT se necesita regular el seguimiento de una trayectoria y esto se logra mediante el diseño de diferentes controladores, por ejemplo, en [38] se aplica un controlador robusto backstepping para el seguimiento de trayectoria y un control de modos deslizantes para mantener la altitud, ambos consideran perturbaciones acotadas y no desvanecientes obteniéndose resultados en simulación. En [39], se realiza el control de altitud de un VANT de ocho rotores en presencia de incertidumbres del modelo y perturbaciones externas; por lo que se desarrolla un controlador backstepping acoplado a modos deslizantes y una red neuronal adaptativa, reportando los resultados de la simulación.

En [40], se empleó una estrategia de control backstepping para disminuir las perturbaciones del viento, efectos que pueden repercutir en la precisión para la adquisición de imágenes durante el vuelo del dron, en un entorno al aire libre; en particular, la tarea específica consistió en estimar la cantidad de nitrógeno presente en el cultivo de arroz utilizando imágenes aéreas.

Para controlar a los cuadricópteros, en presencia de perturbaciones constantes y variantes en el tiempo, se diseñó un controlador no lineal basado en backstepping y los resultados de la simulación se presentaron en [41]; las perturbaciones no desvanecientes fueron estimadas por un observador no lineal. En [42] se propuso una estrategia de control de backstepping robusto adaptable no lineal, para resolver el problema de seguimiento de la trayectoria de los hexacópteros, donde el enfoque de control de backstepping clásico se empleó como controlador principal y se realizaron simulaciones considerando perturbaciones acotadas no desvanecientes.

En [43], se presentó un algoritmo de aterrizaje en una plataforma elevadora, utilizando un cuadricóptero autónomo DJI-F450, este algoritmo considera el despegue bajo el efecto suelo y las perturbaciones externas. En [44], se diseñó un controlador de modos deslizantes robusto no lineal para controlar y estabilizar un VANT reconfigurable en presencia de incertidumbres paramétricas y variantes en el tiempo; presentando resultados experimentales. En [45], se presentó una arquitectura de control híbrida que combina el aprendizaje profundo por refuerzo y el regulador cuadrático lineal robusto para el control basado en visión de un vehículo autónomo, la propuesta fue validada a través de los resultados de la simulación.

Por lo que, las razones para utilizar el algoritmo de control backstepping robusto es que sea lo suficientemente simple para poder implementarlo en un controlador de vuelo para pruebas en un entorno más realista (al aire libre y siguiendo una trayectoria para la agricultura de precisión); es decir, que el controlador de vuelo pueda realizar el procesamiento y cálculo de la ley de control sin consumir demasiados recursos. En este sentido, los recursos de cómputo embebidos que requieren los sistemas autónomos de aeronaves no tripuladas representaron un desafío [46]. El algoritmo de backstepping permite sintetizar controladores estabilizadores recursivos para sistemas no lineales y puede modificarse para obtener controladores robustos. Así mismo, las dinámicas no modeladas, las perturbaciones externas, los actuadores y las no linealidades del acondicionamiento de señal están latentes en el tiempo real dentro del bucle de control. Bajo todas estas condiciones, es esencial analizar el rendimiento del controlador [47] mediante la evaluación experimental de los algoritmos de control en entornos significativos; es decir en exteriores, para validar su robustez en un sistema de lazo cerrado en una planta real.

## 1.2. Planteamiento del problema

El problema que se plantea es, ¿cómo regular robustamente el seguimiento de la trayectoria de un cuadricóptero que vuela sobre cultivos de maíz para detectar visualmente indicios de la enfermedad mancha de asfalto?

## 1.3. Justificación

La pérdida de cosechas es algo que afecta en gran medida, a los agricultores, ya que para detectar una enfermedad en los sembradíos en nuestro país, estos tienen que recorrer la parcela todos los días, y si la parcela es grande implica una pérdida de tiempo para los campesinos; además, puede ser que no detecten la enfermedad en una etapa temprana, ocasionando la propagación de la misma a más plantas del cultivo generando pérdidas de siembra. Si bien existen drones que se dedican a la vigilancia de cultivos agrícolas, con

los cuales se analizan varios aspectos, tales como el índice de normalizado de vegetación diferencial [48], estos sistemas son desarrollados en otros países y hasta la fecha no hay un sistema de monitoreo de cultivos realizado 100 % por mexicanos. Por lo que, se plantea diseñar una plataforma económica que monitoree los cultivos y ayude a los campesinos a identificar la enfermedad en una etapa temprana; considerando la selección de los elementos para construir el dron hasta su puesta en funcionamiento para detectar la mancha de asfalto.

## **1.4. Hipótesis**

1. La identificación visual de indicios de la enfermedad mancha de asfalto en las hojas de maíz se realiza mediante el vuelo autónomo de un cuadricóptero equipado con un sistema de visión RGB y el control backstepping robusto programado sobre el autopiloto.
2. Mediante la síntesis de una ley de control backstepping robusto se realizan vuelos sobre los sembradíos de maíz con un cuadricóptero, se detectan cambios en la pigmentación en las hojas de la planta, para reconocer la enfermedad mancha de asfalto, mediante un algoritmo de segmentación de imágenes basado en visión artificial, que permita alertar a los agricultores y se tomen decisiones puntuales para reducir la propagación de la enfermedad.

## **1.5. Objetivos**

Los objetivos de este trabajo de investigación son los siguientes:

### **1.5.1. Objetivo general**

Controlar robustamente el vuelo autónomo de un cuadricóptero equipado con un sistema de visión (RGB), mediante un algoritmo backstepping robusto y la captura de imágenes nítidas de las hojas de maíz, para identificar indicios de la presencia de mancha de asfalto.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Construir la plataforma experimental seleccionando los componentes (motores, esc, frame, etc.) para que pueda volar en exteriores.
- Manipular al cuadricóptero para garantizar la estabilidad mediante técnicas de control clásico con base a una la trayectoria pre-establecida para obtener imágenes de los campos.
- Diseñar una ley de control robusta mediante el enfoque backstepping para el seguimiento de trayectorias.

- Seleccionar correctamente los algoritmos para el procesamiento de imágenes con base en las fotografías tomadas del cultivo para identificar la enfermedad mancha de asfalto.
- Implementar los algoritmos de procesamiento de imágenes para detectar la enfermedad en el sembradío.

## 1.6. Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados, se propone la siguiente metodología que consiste en realizar satisfactoriamente las siguientes etapas:

- Estudiar la dinámica de los cuadricópteros y las enfermedades del cultivo del maíz, con el fin de conocer la problemática que estas causan sobre el sembradío y saber como poder detectarlas en etapas tempranas del contagio.
- Construir la plataforma experimental (cuadricóptero), que cuente con una cámara para tomar imágenes del cultivo.
- Diseñar una ley de control robusta que ante incertidumbres acopladas y dinámicas no modeladas garantice el seguimiento de trayectorias.
- Realizar simulaciones de la ley de control propuesta con base a una trayectoria pre-establecida.
- Efectuar vuelos con el cuadricóptero sobre los cultivos de maíz para adquirir imágenes.
- Analizar las imágenes capturadas en el vuelo, en una computadora para detectar la enfermedad.

## 1.7. Publicación

### Revista Internacional

- Liliam Rodríguez Guerrero, Alejandro Benitez Morales, Omar Jacobo Santos Sánchez, Orlando García Pérez, Hugo Romero Trejo, Mario Oscar Ordaz Oliver y Jesús Patricio Ordaz Oliver. “*Robust Backstepping Control Applied to UAVs for Pest Recognition in Maize Crops*” Applied Sciences, 2022, 12, 9075.

## 1.8. Organización del trabajo

El trabajo de tesis está organizado en seis capítulos y tres apéndices. En el Capítulo 2, corresponde al *Marco Teórico*, se obtiene el modelo matemático reducido del cuadricóptero, se enuncian los teoremas utilizados en esta tesis y se describe a la plataforma

---

experimental. En el Capítulo 3, *Backstepping robusto ante perturbaciones*, se propone el teorema de backstepping robusto, realizándose la demostración de él; además, se sintetizan los controladores para los subsistemas de altitud, guiñada,  $x - \theta$  y  $y - \varphi$ . En el Capítulo 4, *Sistema de visión y procesamiento de las imágenes*, se proporciona una breve introducción a el sistema de visión, del procesamiento de la imagen y la implementación de los métodos de segmentación utilizados. En el Capítulo 5, *Resultados experimentales del vuelo del cuadricóptero en exteriores*, se obtienen los resultados experimentales al sobrevolar cultivos de maíz. Finalmente, en el Capítulo 6, *Conclusiones y trabajo a futuro*, se puntualizan los principales resultados del trabajo realizado; así como el que se puede realizar en un futuro próximo.



# Capítulo 2

## Marco Teórico

En este capítulo se presenta el modelo matemático del cuadricóptero; además, se recapitulan las herramientas matemáticas necesarias para desarrollar la ley de control basada en la metodología backstepping que permita la estabilización del sistema durante el seguimiento, las bases necesarias para el procesamiento de imágenes y por último, se describe la plataforma experimental y su costo.

### 2.1. Modelo dinámico del cuadricóptero

Con el objetivo de sintetizar las leyes de control, es necesario obtener el modelo dinámico de cuadricóptero [49], para ello, las coordenadas generalizadas son  $q = (x, y, z, \varphi, \theta, \psi)$ , donde  $(x, y, z)$  representan la posición relativa del centro de masa del cuadricóptero con respecto a una referencia inercial, y  $(\varphi, \theta, \psi)$  son los tres ángulos de Euler representando la orientación, conocidos como alabeo-cabeceo-guiñada (Figura 2.1). Una de las características del cuadricóptero es que los motores 1 y 2 giran en sentido anti-horario, mientras que los motores 3 y 4 giran en sentido horario; con esto los efectos giroscópicos y los momentos aerodinámicos tienden a anularse en vuelo estacionario. La fuerza principal es la suma de las fuerzas producidas por cada motor

$$u_s = \sum_{i=1}^4 f_i.$$

El momento de cabeceo ( $\theta$ ) del cuadricóptero es producido por la diferencia de  $(f_2 + f_4) - (f_1 + f_3)$ , el momento de alabeo ( $\phi$ ) es debido a  $(f_2 + f_3) - (f_1 + f_4)$  y el momento de la guiñada ( $\psi$ ) es la suma de  $\tau_{M_1} + \tau_{M_2} + \tau_{M_3} + \tau_{M_4}$  donde  $\tau_{M_i}$  es el par del motor  $i$ , con  $i = 1, 2, 3, 4$ . Con las anteriores características se puede concluir que para que el cuadricóptero avance los motores 2 y 4 deben incrementar la velocidad, mientras que los motores 1 y 3 deben disminuirla. De manera análoga, el movimiento lateral hacia la

derecha se obtiene incrementando la velocidad de los motores 2 y 3; y los motores 1 y 4 disminuyéndola. Por último para el giro en su propio eje, los motores 1 y 2 deben incrementar el par y los motores 3 y 4 reducirlo; Estos movimientos se deben realizar manteniendo a  $u_s$  constante. Sabiendo las características antes mencionadas se procede a obtener el modelo matemático, donde se considera al vehículo como un cuerpo sólido tridimensional sujeto a una fuerza principal y tres momentos o pares, según se considere.

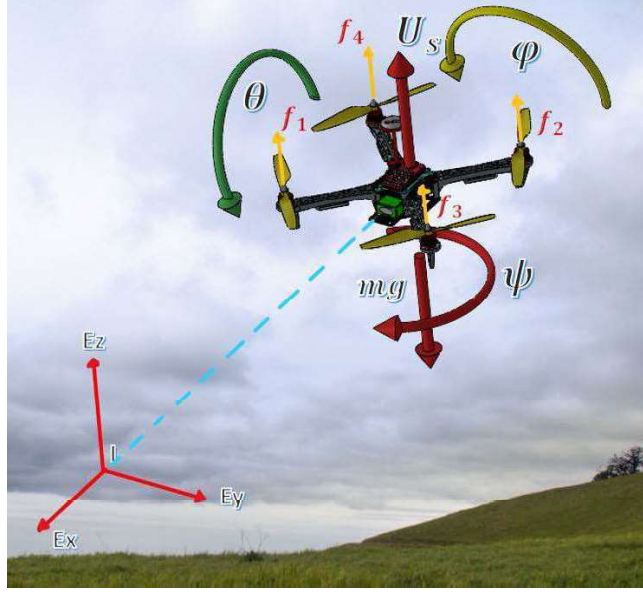


Figura 2.1: Modelo en 3D del cuadricóptero; donde se aprecian las variables del sistema.

Se definen las coordenadas traslacional y rotacional como  $\xi = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$  y  $\eta = (\varphi, \theta, \psi) \in \mathbb{R}^3$ , respectivamente. La dinámica traslacional se obtiene usando el método de Euler-Lagrange. La energía cinética del cuadricóptero es

$$T_{trans} = \frac{1}{2} m \dot{\xi}^T \dot{\xi},$$

donde  $m$  es la masa del cuadricóptero. Por otra parte, la energía potencial es  $U = mgz$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. Con la energía cinética y potencial se define el Lagrangiano  $L$  como

$$L = T - U = \frac{1}{2} m \dot{\xi}^T \dot{\xi} - mgz. \quad (2.1)$$

Ahora, se obtiene la dinámica del cuadricóptero como una función de fuerzas generalizadas traslacionales

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}} - \frac{\partial L}{\partial \xi} = F_{\xi}, \quad (2.2)$$

donde  $F_{\xi} = R F_R$ , se define en función de la matriz de rotación  $R$  y

$$F_R = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_s \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

recordando que  $u_s$  es la fuerza principal y esta conformada por las fuerzas de cada motor  $f_i$ , las cuales se describen como  $f_i = k_i \omega_i^2$ ,  $k_i$  son constantes positivas y  $\omega_i$  son las velocidades angulares de los motores para  $i = 1, 2, 3, 4$ . La matriz de rotación  $R$ , se define conforme a las matrices de rotación de cada eje; primero se define a la matriz de rotación con respecto al eje  $x$  ( $R_{x,\varphi}$ ), a continuación, la matriz de rotación del eje  $y$  ( $R_{y,\theta}$ ) y para finalizar la matriz la correspondiente al eje  $z$  ( $R_{z,\psi}$ )

$$\begin{aligned} R_{x,\varphi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\varphi & S\varphi \\ 0 & -S\varphi & C\varphi \end{bmatrix} \\ R_{y,\theta} &= \begin{bmatrix} C\theta & 0 & -S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix} \\ R_{z,\psi} &= \begin{bmatrix} C\psi & S\psi & 0 \\ -S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

donde  $C\varphi = \cos(\varphi)$ ,  $C\theta = \cos(\theta)$ ,  $C\psi = \cos(\psi)$ ,  $S\varphi = \sin(\varphi)$ ,  $S\theta = \sin(\theta)$ ,  $S\psi = \sin(\psi)$ . Entonces se define a  $R$  que representa la orientación del cuadricóptero como

$$\begin{aligned} R &= R_{x,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\psi}, \\ R &= \begin{bmatrix} C\theta C\psi & S\psi C\theta & -S\theta \\ S\theta C\psi S\varphi - S\psi C\varphi & S\theta S\psi S\varphi + C\psi C\varphi & C\theta S\varphi \\ S\theta C\psi C\varphi + S\psi S\varphi & S\theta C\psi S\varphi - C\psi S\varphi & C\theta C\varphi \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

sustituyendo (2.3) y (2.4) en  $F_\xi$  se obtiene

$$F_\xi = u_s \begin{bmatrix} -S\theta \\ C\theta S\varphi \\ C\theta C\varphi \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

y reemplazando (2.1) en (2.2) se obtiene el siguiente resultado

$$m\ddot{\xi} + mg = F_\xi, \quad (2.6)$$

sustituyendo  $\ddot{\xi} = (\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$  y (2.5) en (2.6) se obtiene el modelo reducido traslacional

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= -\frac{1}{m}S\theta u_s \\
\ddot{y} &= \frac{u_s}{m}C\theta S\varphi \\
\ddot{z} &= \frac{C\theta C\varphi}{m}u_s - g.
\end{aligned} \tag{2.7}$$

El sistema (2.7), describe la dinámica traslacional del cuadricóptero. La dinámica rotacional se obtiene usando el método de Newton-Euler [49]. Las ecuaciones dinámicas angulares para los rotores son

$$J\ddot{\eta} = -\dot{\eta} \times J\dot{\eta} + F_{ext}, \tag{2.8}$$

donde  $J$  es la matriz de inercia dada de la forma

$$J = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}, \tag{2.9}$$

las inercias del cuadricóptero  $I_x, I_y, I_z$  están con respecto a los ejes  $x, y, z$ ; se obtuvieron a partir del centro de masa y  $F_{ext}$  es la suma de fuerzas externas dada por

$$F_{ext} = \begin{bmatrix} \tau'_x \\ \tau'_y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix}, \tag{2.10}$$

donde  $\tau'_x = -J_p\Omega$ ,  $\tau'_y = J_p\Omega$ ,  $\tau_x = l\tau_\varphi$ ,  $\tau_y = l\tau_\theta$ ,  $\tau_z = l\tau_\psi$ ,  $J_p$  es la inercia del rotor,  $\Omega = \omega_2 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_3$ ,  $l$  es la longitud del centro de masa a cada motor,  $\omega_i$  son las velocidades angulares de los motores ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),  $\tau_\varphi$ ,  $\tau_\theta$  y  $\tau_\psi$  son los torques que permiten realizar los movimientos de alabeo-cabeceo-guiñada descritos a continuación

$$\begin{aligned}
\tau_\varphi &= (f_2 + f_3)l - (f_1 + f_4)l \\
\tau_\theta &= (f_2 + f_4)l - (f_1 + f_3)l \\
\tau_\psi &= \tau_{M_1} + \tau_{M_2} + \tau_{M_3} + \tau_{M_4},
\end{aligned} \tag{2.11}$$

donde las  $f_i$  se describen como  $f_i = k_i\omega_i^2$ ,  $k_i$  son constantes positivas. Sustituyendo (2.9), (2.10), (2.11) en (2.8) se obtienen la siguiente representación

$$\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{\theta}\dot{\psi}(I_z - I_y) \\ \dot{\varphi}\dot{\psi}(I_x - I_z) \\ \dot{\varphi}\dot{\theta}(I_y - I_x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau'_x \\ \tau'_y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix}, \tag{2.12}$$

se desprecia el efecto  $J_p$  ya que su valor es de 0.000022 kgm<sup>2</sup>. Despejando a  $\ddot{\varphi}$ ,  $\ddot{\theta}$ , y  $\ddot{\psi}$  de (2.12) se obtiene

$$\begin{aligned}\ddot{\varphi} &= \dot{\theta}\dot{\psi}\frac{(I_y - I_z)}{I_x} + \frac{l}{I_x}\tau_\varphi \\ \ddot{\theta} &= \dot{\varphi}\dot{\psi}\frac{(I_x - I_z)}{I_y} + \frac{l}{I_y}\tau_\theta \\ \ddot{\psi} &= \dot{\varphi}\dot{\theta}\frac{(I_y - I_x)}{I_z} + \frac{l}{I_z}\tau_\psi.\end{aligned}\quad (2.13)$$

Las ecuaciones (2.7) y (2.13) representan las dinámicas traslacionales y rotacionales del cuadricóptero; dichas ecuaciones se puede dividir en cuatro subsistemas como se propone en [49], cada uno de estos subsistemas pueden ser estabilizados de manera independiente. El modelo dinámico reducido es

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -\frac{1}{m}\sin\theta u_s \\ \ddot{y} &= \frac{u_s}{m}\cos\theta\sin\varphi \\ \ddot{z} &= \frac{\cos\theta\cos\varphi}{m}u_s - g \\ \ddot{\varphi} &= \dot{\theta}\dot{\psi}\frac{I_y - I_z}{I_x} + \frac{l}{I_x}\tau_\varphi \\ \ddot{\theta} &= \dot{\varphi}\dot{\psi}\frac{I_x - I_z}{I_y} + \frac{l}{I_y}\tau_\theta \\ \ddot{\psi} &= \dot{\varphi}\dot{\theta}\frac{I_y - I_x}{I_z} + \frac{l}{I_z}\tau_\psi.\end{aligned}\quad (2.14)$$

Este modelo se divide en el subsistema de altitud (2.15) el cual permite despegar al cuadricóptero y mantener la altitud deseada, el subsistema de ángulo de guiñada (2.16) se utiliza para girarlo con respecto al eje  $z$ , el subsistema  $x - \theta$  (2.17) manipula al cuadricóptero para desplazarlo hacia adelante y atrás; finalmente, el subsistema  $y - \varphi$  (2.18) se usa para trasladarlo lateralmente.

$$\ddot{z} = \frac{\cos\theta\sin\varphi}{m}u_s - g, \quad (2.15)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\varphi}\dot{\theta}\frac{I_y - I_x}{I_z} + \frac{l}{I_z}\tau_\psi, \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -\frac{1}{m} \sin \theta u_s \\ \ddot{\theta} &= \dot{\varphi} \dot{\psi} \frac{(I_x - I_z)}{I_y} + \frac{l}{I_y} \tau_\theta,\end{aligned}\tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}\ddot{y} &= \frac{u_s}{m} \cos \theta \sin \varphi \\ \ddot{\varphi} &= \dot{\theta} \dot{\psi} \frac{I_y - I_z}{I_x} + \frac{l}{I_x} \tau_\varphi.\end{aligned}\tag{2.18}$$

Las siguientes suposiciones propuestas en [1], se consideran en el desarrollo de este tema de investigación

1. El cuadricóptero se considera un cuerpo rígido y simétrico.
2. El centro de gravedad del cuadricóptero está en el origen.
3. Las propelas son rígidas con ángulo fijo.
4. En el modelo del cuadricóptero no se han considerado los efectos aerodinámicos.
5. La dinámica del motor se modela como una función de transferencia de primer orden, y es suficiente para representar la dinámica entre la velocidad de referencia de la hélice y su velocidad real. Como la constante de tiempo de esta función de transferencia es pequeña, se puede considerar que la dinámica del rotor es aproximadamente igual a uno [50]. Esta suposición se utiliza para considerar dinámicas adicionales (o incertidumbres paramétricas) que representan perturbaciones desvanecientes en los actuadores.
6. Los ángulos de cabeceo, alabeo y guiñada están restringidos en el intervalo  $[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$ , esto con el fin de tomar imágenes de las plantas que se encuentran debajo del dron.

Además; de la suposición 5, se desprecian los efectos de las hélices [51]. Sin embargo, en [51] se proporciona un modelo del empuje del motor, que se puede expresar como

$$\begin{aligned}T_i &= c_1 \omega_i^2 \left( c_2 \left( 1 + \frac{3}{2} \mu_i^2(t) \right) - \lambda_i(t) \right) \\ &= c_1 \omega_i^2 c_2 + \underbrace{c_1 \omega_i^2 \left[ c_2 \frac{3}{2} \mu_i^2(t) - \lambda_i(t) \right]}_{\delta},\end{aligned}$$

donde  $T_i$  es el empuje del motor  $i^{th}$ ,  $\omega_i$  es la velocidad angular del motor  $i^{th}$ ,  $\mu_i(t)$  y  $\lambda_i(t)$  son las relaciones de avance y flujo entrada respectivamente (funciones no lineales),  $c_1$  y  $c_2$  son constantes positivas. Entonces,  $\delta$  podría ser el segundo término de  $T_i$ , entre otras dinámicas no modeladas.

Una vez que se obtiene el modelo de cada subsistema del cuadricóptero, se desarrolla una ley de control basada en la metodología del backstepping clásica.

## 2.2. Preliminares de control

En esta sección se describe la estrategia de control backstepping clásica [52] que se utiliza para formular el resultado teórico de este trabajo de tesis. Además, se menciona el resultado sobre la metodología de backstepping, empleada en [1] para sintetizar a los controladores que estabilizan a los subsistemas  $x - \theta$  y  $y - \varphi$ .

### 2.2.1. Control backstepping clásico

La técnica de control backstepping que se aplica, parte de la consideración del sistema de la forma [52]:

$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= f(\eta) + g(\eta)\xi \\ \dot{\xi} &= u,\end{aligned}\tag{2.19}$$

donde  $[\eta, \xi]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$  es el estado y  $u \in \mathbb{R}$  es la entrada del control, las funciones  $f : \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}^n$  y  $g : \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}^n$  son suaves en el dominio  $D \subset \mathbb{R}^n$  con  $\eta = 0$  y  $f(0) = 0$ ; la entrada de control  $u$  tiene la estructura clásica de la forma:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] - \frac{\partial V}{\partial \eta} g(\eta) - k[\xi - \phi(\eta)],\tag{2.20}$$

donde  $k$  es una constante definida positiva;  $V$ , y  $\phi(\eta)$  son funciones positivas y conocidas.

Para utilizar esta metodología, el sistema a controlar debe estar en la forma (2.19), en caso de no cumplirse, esta condición no puede ser empleada; pero en este caso los subsistemas del cuadricóptero cumplen con esta condición. Nótese que el método de backstepping parte de dividir al sistema en subsistemas con la finalidad de facilitar la estabilización de la plataforma, para ello, se puede utilizar la siguiente secuencia.

- Paso 1: Obtenga la representación espacio de estado (REE) del sistema con  $n$  ecuaciones

- Paso 2: Se realiza la primera iteración, Seleccionando las dos primeras ecuaciones de la representación.
- Paso 3: Proponga el término estabilizante, también llamado entrada virtual ( $\varphi$ ) y una función de Lyapunov.
- Paso 4: Encuentre el control (2.20) para estabilizar a las dos primeras ecuaciones.
- Paso 5: Haga la segunda iteración, agregando la siguiente ecuación de la REE.
- Paso 6: Proponga el control encontrado en el paso 4 como término estabilizante y una nueva función de Lyapunov.
- Paso 7: Halle el control que estabilice a las tres ecuaciones con base a (2.20).
- Paso 8: Repita desde el paso 4 hasta utilizar todas las ecuaciones de la REE.

Y para concluir, la última entrada de control obtenida del método iterativo es la que garantizará la estabilidad del sistema.

### 2.2.2. Control backstepping con entrada virtual senoidal [1]

Para este trabajo se utiliza la proposición propuesta por [1] la cual dice lo siguiente

**Proposición 1:** Sea el sistema

$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= f(\eta) + g(\eta) \sin \xi \\ \dot{\xi} &= u,\end{aligned}\tag{2.21}$$

donde  $\eta \in \mathbb{R}^n$ ,  $\xi \in \mathbb{R}$ ,  $u \in \mathbb{R}$ . Bajo las suposiciones

- las funciones  $f : \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}^n$  y  $g : \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}^n$  son continuamente diferenciables,
- $f(0) = 0$  y  $\eta = 0$
- $\xi \in \left(\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}\right)$ .

El control  $u$ , el cual estabiliza localmente al sistema, está dado de la manera

$$u = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta) \sin \xi] - \frac{\partial V}{\partial \eta} g(\eta) - k (\sin \xi - \varphi(\eta))}{\cos \xi},\tag{2.22}$$

donde  $k > 0$ ,  $V(\eta) > 0$ , y  $\phi(\eta) > 0$  son funciones conocidas.

Este control, se puede decir que es una variante del backstepping clásico, pero considera en la entrada virtual a la función seno. Para la aplicación de esta metodología el sistema debe estar en la forma (2.21) y así con el control (2.22) se estabiliza al sistema; observe que

la función seno garantiza que la entrada virtual está siempre acotada. También, se aprecia que  $\xi$  no puede ser mayor o igual a  $\left|\frac{\pi}{2}\right|$  ya que de serlo se indetermina el control  $u$ ; pensado en el cuadricóptero implica que está girado  $90^\circ$  con respecto a la referencia, por lo que el cuadricóptero se caería.

## 2.3. Antecedentes del procesamiento de imágenes

A continuación se presentan los antecedentes de procesamiento de imágenes y se introducen conceptos relacionados al color como lo son: el espectro visible, sus propiedades y los espacios de color.

### 2.3.1. Espectro visible

La luz está compuesta de fotones cuyo comportamiento tiene propiedades tanto de onda como de partícula. La región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir recibe el nombre de espectro visible o espectro óptico de la luz (Figura 2.2). Las longitudes de onda que puede percibir una persona son por lo regular entre 400 nm y 700 nm. Por debajo del espectro visible se encuentran las ondas correspondientes a la luz ultravioleta, rayos-x, rayos-gama mientras que las ondas por encima de las visibles corresponden a la luz infrarroja, microondas y ondas de radio [53, 54].

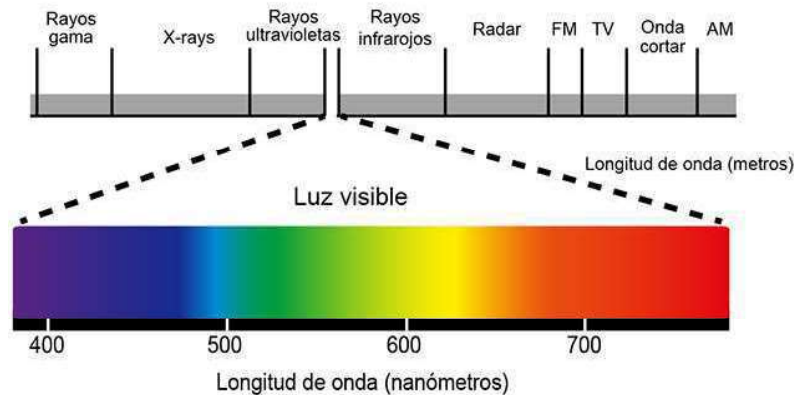


Figura 2.2: Espectro visible [2].

El espectro visible no contiene todos los colores que el ojo humano tiene la capacidad de distinguir. Los colores sin saturar como el rosa, marrón o variaciones del púrpura como el magenta, no pueden reproducirse mediante una sola longitud de onda sino mediante la combinación de dos o más luces monocromáticas. Estos colores forman parte del grupo de colores no espectrales.

La luz, además de medirse por su longitud de onda, también puede medirse por su frecuencia y por su energía. La frecuencia del espectro de luz visible cubre el rango que va desde los 430 THz (TeraHertz) para el color rojo hasta los 770 THz para el color violeta. La cantidad de energía contenida en cada onda está relacionada proporcionalmente a la frecuencia. Cuanto mayor es la energía de una onda, mayor es su frecuencia y viceversa [53].

### **2.3.2. Propiedades de color**

Las propiedades del color son atributos que describen las características que hacen único a cada color. Estos atributos son el matiz, la saturación y la luminosidad [55].

El matiz, también denominado tono, tinte, tonalidad o por su nombre en inglés “hue”, es la propiedad fundamental que permite diferenciar un color de otro y darle un nombre que permite identificarlo. La longitud de onda y el matiz están altamente correlacionados, tal como aparece en el arcoiris [55].

La saturación representa la intensidad cromática o el grado de pureza de un color. La saturación de los colores cambia a medida que ese color tiene más o menos cantidad de gris. A mayor cantidad de gris, el color es más pálido y menos saturado. A menor cantidad de gris, es más vivo y más saturado. Comúnmente suele confundirse el término saturación con el término croma ya que ambos se utilizan para indicar el grado de diferencia entre un estímulo cromático y otro acromático. Estos términos contrastan en que el croma requiere que los estímulos tengan el mismo brillo mientras que para la saturación el brillo no se toma en cuenta [55, 56].

La luminosidad, también denominada valor, luminancia o brillo, es la cantidad de luz reflejada por una superficie en comparación con la reflejada por una superficie blanca en iguales condiciones de iluminación. Este término se utiliza para describir el grado de claridad u oscuridad de un color, y se refiere a la cantidad de luz percibida. A mayor luminosidad de un color mayor luz reflejará y se percibirá más claro [55, 57]. Otros aspectos a considerar son el modelo del color y el espacio del color.

El modelo de color es un modelo matemático abstracto, utilizado para describir la forma en la que los colores son representados a través de una lista ordenada de valores. La mayoría de estos valores de color tienen tres o cuatro componentes diferentes, los cuales, al combinarse, ofrecen un espectro de colores. En consecuencia, cada modelo de color diferente compone una sección específica del espectro de color visible. En la práctica no existe un modelo de color digital que abarque todo el espectro electromagnético de luz visible [55, 57].

El espacio de color es el conjunto resultante de los colores que pueden reproducirse utilizando todas las combinaciones de valores posibles de los componentes que forman el color para un modelo de color específico [54].

## 2.4. Modelos básicos de color

Existe una importante cantidad de modelos que establecen la forma de describir o de reproducir un color. Estos modelos permiten definir colores utilizando valores numéricos y representaciones físicas [54, 58].

### 2.4.1. Modelo de color RGB

Este modelo de color está basado en los tres colores primarios de la síntesis aditiva( es decir, la suma de los tres componentes de color RGB). Su nombre proviene de las iniciales en inglés de los componentes que se utilizan para formar el color, R es el color rojo, G es el color verde y B es por el color azul. El espacio de color generado por este modelo representa un cubo donde cada coordenada está asociada a una proporción de rojo, verde y azul en el color asociado a cada punto dentro del mismo cubo (Figura 2.3). En los vértices del cubo se encuentran los colores primarios y secundarios [58].

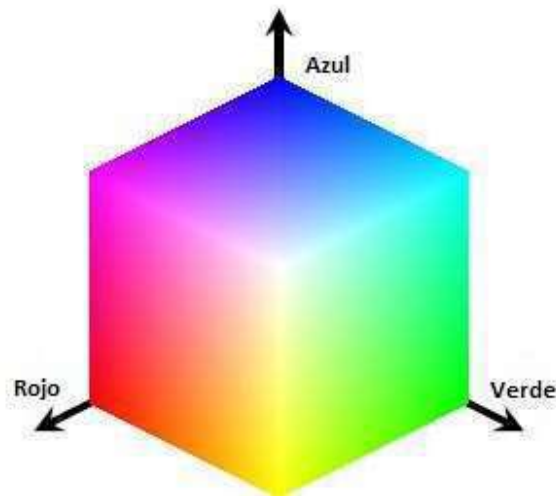


Figura 2.3: Modelo del color RGB [3].

Sobre la diagonal principal del cubo se encuentran los puntos con iguales intensidades en sus componentes que representan una escala de grises. Esta diagonal comienza con el color negro (cero intensidad en sus componentes RGB) y avanza aclarando los colores en su recorrido hasta llegar al color blanco (intensidad máxima en todos los componentes RGB).

## 2.5. Espacios de colores perceptivos

Los espacios de color perceptivos son aquellos en donde una variación en el valor de color produce una variación de igual relevancia en la percepción visual del observador. Por tal razón, se crearon modelos alternativos al RGB buscando acercarse a la forma en que las personas perciben los atributos del color. De esta manera surgieron los modelos de color HSV (Hue, Saturation, Value), HSL (Hue, Saturation, Lightness) y HSI (Hue, Saturation, Intensity) para ofrecer al observador una experiencia más intuitiva y natural del color que el modelo de color RGB [54].

Las características perceptivas del color como matiz, saturación y luminosidad no pueden ser descritas de manera directa por el modelo de color RGB. Por este motivo, se han desarrollado muchas transformaciones no lineales con el objetivo de representar las características perceptivas del color a partir del modelo RGB [58].

### 2.5.1. Modelo de color HSV

El modelo de color HSV (“Hue, Saturation, Value”) o HSB (“Hue, Saturation, Brightness”) caracteriza al color en términos de Matiz (Hue) que representa la esencia del color, Saturación (Saturation) que representa la pureza del color y la Intensidad (Value, Brightness) que representa el brillo del color [54].

El matiz en el modelo HSV se representa con un valor numérico que corresponde a un desplazamiento angular alrededor del eje central en el espacio de color del sistema. Cada círculo que comprende todas las coordenadas de un mismo plano es similar al círculo cromático y mantiene una percepción intuitiva del color para el observador. Normalmente, los valores típicos para el matiz pueden ir del rango de 0 a 1 o de 0° a 360° (Figura 2.4).

La dimensión correspondiente a la saturación representa la pureza del color, con un rango de 0 a 1 o de 0 a 100. A medida que el valor de saturación se acerca a su valor mínimo, el color se torna más puro o vivo (saturado). A medida que el valor de saturación se acerca a su valor máximo, el color se torna gris (no saturado). El brillo en el modelo HSV representa la luminosidad del color y describe qué tan oscuro es éste; el intervalo es de 0 a 1 o de 0 a 100. A medida que el valor de luminosidad disminuye, el color se percibe más oscuro hasta tornarse negro. A medida que el valor de luminosidad incrementa el color se aprecia más claro o brillante [54].

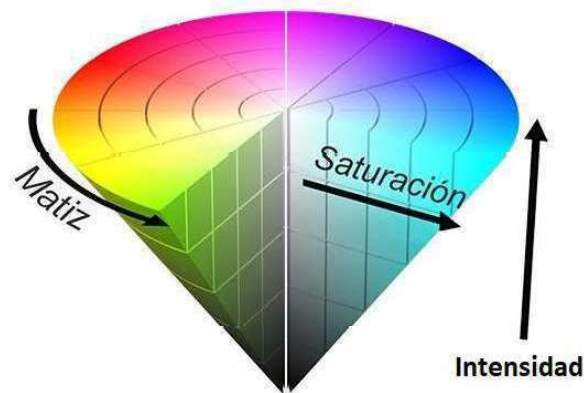


Figura 2.4: Modelo del color HSV [4].

## 2.6. Espacios de color ortogonales

Los espacios de colores ortogonales representan al color con componentes estáticamente independientes, separando iluminación y cromaticidad. Una ventaja de estos espacios sobre los espacios de color perceptivos como el HSV es que la transformación desde RGB es más simple y en consecuencia tiene un costo computacional menor [56].

### 2.6.1. Modelo del color YCbCr

El modelo de color YCbCr está compuesto por un único componente de luminosidad Y y dos componentes de cromaticidad Cb y Cr. El componente Y es la suma ponderada de los valores de rojo, verde y azul, y coincide con la luminosidad del estándar de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). El componente Cb representa la diferencia entre el azul y el valor de referencia Y. El componente Cr muestra la diferencia entre el rojo y el valor de referencia Y. Comúnmente, los valores del espacio de color YCbCr admiten valores en el rango 0 a 255 o de 0 a 1 [58].

## 2.7. Espacio de color perceptiblemente uniforme

Se dice que los espacios de color son perceptiblemente uniformes cuando una variación en el valor de color produce una variación de igual importancia visual para el observador humano. Para obtener esta percepción uniforme se requieren transformaciones de gran costo computacional. En los espacios de color perceptiblemente uniformes, el cálculo de la luminosidad y de la cromaticidad se obtienen a través del mapeo no lineal de coordenadas del espacio de color CIE-XYZ. Dos ejemplos de modelos de color perceptiblemente uniformes

que frecuentemente se utilizan son los modelos CIE-Lab y CIE-LUV; en este caso solo se vera el modelo CIE-Lab [54, 58].

### 2.7.1. Modelo del color CIE-Lab

El espacio de color  $L^*a^*b^*$  fue modelado en base a una teoría de color oponente que establece que dos colores no pueden ser rojo y verde al mismo tiempo o amarillo y azul al mismo tiempo. Como se muestra a la Figura 2.5,  $L$  indica la luminosidad su rango es de 0 a 100, la  $a$  indica coordenadas cromáticas que van del rojo al verde (+ $a$  indica rojo, - $a$  indica verde) el rango admisible es de -100 a 100 y la  $b$  muestra las coordenadas cromáticas que van del amarillo al azul (+ $b$  indica amarillo, - $b$  indica azul) el rango permisible es de -100 a 100 [54].

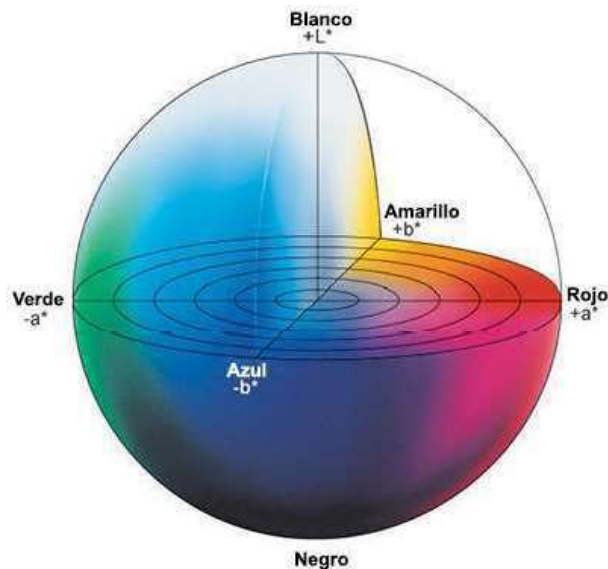


Figura 2.5: Modelo del color CIE-Lab [5].

Una vez, vistos los conceptos necesarios para comprender los espacios de color; ahora, se vera con el procesamiento de la imagen.

### 2.7.2. Antecedentes del procesamiento de imágenes

El procesamiento de imagen puede ser utilizado para aplicaciones donde se requiera una mejora de la calidad de la imagen para una mejor interpretación humana o para el procesamiento de la información de una imagen para almacenamiento, transmisión y presentación de la información para la percepción de una máquina autónoma [59]. Las imágenes que se obtienen a través de una cámara convencional son generadas a partir de la combinación de

la iluminación de la escena a capturar y el reflejo o la absorción de la energía de la escena por los elementos que contiene la cámara y son los encargados de procesar la escena que fue capturada en una imagen. La energía antes mencionada es convertida en voltaje por medio de la combinación de una fuente de poder y material sensorial. La forma de onda del voltaje de salida es la respuesta del sensor(es), y se obtiene una cantidad digital de cada sensor al digitalizar su respuesta. La salida de la mayoría de los sensores es una forma de onda de voltaje continua cuya amplitud y comportamiento espacial están relacionados con el fenómeno físico que se detecta. Para crear una imagen digital, es necesario convertir los datos de detección continuos en formato digital, lo que implica dos procesos: muestreo y cuantificación. El muestreo es la digitalización de los valores de coordenadas y la cuantificación es la digitalización de los valores de amplitud que son obtenidos a partir de muestrear la función continua antes mencionada. La sección del plano real abarcada por las coordenadas de una imagen se denomina dominio espacial, con  $x$  e  $y$  se denominan variables espaciales o coordenadas espaciales. Cuando se trabaja con escalas en gris los elementos se expresan de la forma  $x, y$  y  $z$  donde  $x$  e  $y$  son coordenadas espaciales y  $z$  es el valor de la función  $f$  en las coordenadas  $x$  e  $y$ . Las matrices numéricas se utilizan para el procesamiento y el desarrollo de algoritmos, cada elemento de esta matriz es llamada pixel. El proceso de muestreo puede verse como una división del plano  $x$ - $y$  en una cuadrícula, con las coordenadas del centro de cada celda en la cuadrícula como un par de elementos del producto cartesiano. Si  $x$  e  $y$  son enteros y  $f$  es una función que asigna un valor de intensidad a cada par de coordenadas distinto, esta asignación funcional es el proceso de cuantificación. El contraste es la relación entre la intensidad máxima medible y el nivel mínimo de intensidad detectable en la imagen y una imagen con un bajo contraste suele tener un aspecto gris apagado y descolorido [60]. Por lo tanto, tener una imagen de buena calidad es necesaria para su procesamiento, es decir, tener un alto contraste y tener la mayor cantidad de pixeles disponibles para el procesamiento de imagen.

MATLAB cuenta con su propia librería para realizar procesamiento de imagen la cual es llamada "Image Processing", está admite una gran variedad de formatos de imágenes provenientes de dispositivos tales como cámaras digitales, satélites, dispositivos para imágenes médicas y otros dispositivos, se utiliza para la extracción de parámetros, un ejemplo de ello es el trabajo realizado por [61], donde se utilizó la librería de procesamiento de imágenes el reconocimiento por color de Matlab versión 5.3 para medir la severidad de la mancha de hierro que afecta las hojas del cafeto; los resultados fueron favorables, lo que ayudo a identificar con mayor precisión y rapidez el área foliar de las plantas de café y el área afectada por la enfermedad mancha de hierro o la producida por algún otro disturbio fitosanitario. Otro ejemplo, de la aplicación del procesamiento de imagen es el realizado por [62], el trabajo consistió en el estudio de imágenes RGB en plantaciones de caña de azúcar para determinar el daño causado en las hojas por enfermedades causadas por hongos; para este trabajo se utilizó el software MATLAB versión 7.4 utilizando los complementos

de procesamiento de imágenes y umbralización; se encontró que las enfermedades tienen variaciones significantes en las diferentes etapas de la enfermedad, por lo que el método para segmentar las regiones afectadas tuvo una exactitud del 98.60 %; cabe destacar que la toma de imágenes se realizó con ambientes controlados para tener la luminosidad deseada y la distancia deseada sobre las hojas.

Por lo cual, que el uso de MATLAB para el procesamiento de imágenes es de gran relevancia gracias a que sus librerías facilitan las tareas de procesamiento de la imagen en comparación con algún software donde se tendría que realizar el procesamiento de imagen desde cero. El programador solo tiene la tarea de determinar la mejor manera en como emplear los resultados del procesamiento de imagen utilizando técnicas que el programador considere necesaria para lograr su objetivo. Para el desarrollo de este tema de tesis se utiliza MATLAB y dentro de él, el módulo de procesamiento de imágenes en el cual se usa el complemento de umbralización de color para segmentar a la imágenes en base a las áreas de interés; en este caso, las partes de las hojas del maíz que estén secas; los métodos de segmentación a usar son: la segmentación RGB, la segmentación HSV, la segmentación YCbCr y la segmentación CIE-Lab, en estos métodos de segmentación se encuentran los umbrales (rangos) de las áreas de interés, en capítulos subsecuentes se explicará cada método.

## 2.8. Descripción de la plataforma

La plataforma es un cuadricóptero (Fig. 2.6), el cual, entra en la clasificación de los VANTs, el cual funciona debido a unas hélices acopladas a motores sin escobillas que les permite mantenerse y propulsarse en el aire. Este cuadricóptero cuenta con cuatro hélices (propelas) con dos palas cada una. Para que el cuadricóptero se mantenga estable, dos de estas propelas rotan en sentido horario mientras que el resto lo hacen en sentido anti-horario. Cada una de las propelas se impulsa mediante un motor sin escobillas manipulado mediante un controlador de velocidad electrónico; además, el dron está en configuración “X” (Figura 2.7).

Los cuadricópteros se manejan por radio control obteniendo desplazamientos rotacionales y traslaciones. Todos estos movimientos se controlan ajustando la propulsión de cada propela mediante un dispositivo electrónico programable denominado controlador de vuelo o autopiloto (Pixhawk), cuya función principal es que el cuadricóptero mantenga un vuelo lo más estable posible.



Figura 2.6: Plataforma experimental.

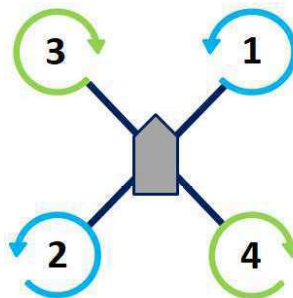


Figura 2.7: Esquema del cuadricóptero en configuración "X" [6].

El controlador de vuelo consta de diferentes componentes, uno de los principales es el magnetómetro, que mide la fuerza y la dirección del campo magnético y que funciona como una brújula que señala el polo norte magnético. El controlador recibe la información sobre la posición del aparato, a través de una unidad GPS (sistema de posicionamiento global), que es un sistema de navegación y localización por satélite. Otra función del controlador de vuelo es transmitir información al controlador de velocidad electrónico (ESC), que es el encargado de que cada motor gire con las revoluciones necesarias para asegurar el vuelo.

Para alimentar de energía a todos los componentes electrónicos del aparato se usan baterías de tipo Li-Po (polímero de iones de litio), que son fáciles de recargar y permiten alimentar todos los circuitos del cuadricóptero. La capacidad de la batería, junto con el número de motores del cuadricóptero, serán los factores que determinen el tiempo de vuelo.

Con el fin de saber el precio de la plataforma experimental, se realiza la siguiente Tabla 2.1 con el costo aproximado, en pesos mexicanos, de los componentes del cuadricóptero. Cabe destacar que se presentan los precios cuando se compraron los componentes en el año 2018 (excepto la cámara que se compró el 15 de abril del 2021) y los actuales para ver como han cambiado (cotización realizada el 1 de noviembre del 2022).

Tabla 2.1: Lista de precios de los componentes del cuadricóptero

Cantidad	Descripción	Precio 2018	Precio 2022
2	Chasis modelo: f450	\$852.20	\$775.05
4	Motores sin escobillas 2212 920kv	\$494.10	\$497.14
1	Paquete de 4 ESC	\$443.80	\$443.84
1	Controlador de vuelo Pixhawk	\$2,062.91	\$3,775.74
1	GPS, modelo: Neo-M8N	\$371.70	\$364.80
1	Radio control Futaba 10J	\$8,008.43	\$8,518.00
1	Receptor de telemetría R3008SB	\$1,280.50	\$1,707.80
2	Baterías Li-Po de 11.1v a 5200mAh	\$1,700.00	\$3,960.00
1	Batería Li-Po de 7.4v a 1000mAh	\$220.00	\$410.00
1	Cámara Gopro Hero 8	\$7,199.00	\$5,999.00
6	Pares propelas modelo: 1045	\$279.90	\$173.55
1	Tren de aterrizaje alto	\$90.00	\$149.42
1	Módulo de alimentación de 90A	\$235.40	\$165.30
1	Distribuidor de energía	\$169.40	\$173.50
1	Paquete se cinchos de nylon de 10 cm	\$17.00	\$20.00
	Tornillos de diversas medidas	\$50.00	\$65.00
1	Paquete de protectores para propelas	\$227.00	\$164.30
1	Paquete de correas para fijar la batería	\$87.80	\$82.45
1	Cinta doble cara	\$95.50	\$120.00
1	Placa de montaje anti-vibración	\$70.10	\$180.39
12	Pares de conectores tipo bala de 3.5 mm	\$27.86	\$81.85
	Total	\$ 23,982.60	\$27,338.90

## 2.9. Comentarios del capítulo

La plataforma presentada se construyo utilizando los componentes necesarios para cumplir con el seguimiento de la trayectoria, el precio del cuadricóptero es de \$23,982.60 (precio del 2018) que es aproximadamente el 12 % del precio del cuadricóptero diseñado específicamente para la agricultura de precisión, aunque el precio es todavía algo elevado

para los agricultores, aún se puede reducir su costo si se elige un radio control más económico, tal como el radio control flysky modelo FS-i6, el cual tiene un precio aproximado de \$950.00 (precio del 2018); esto ocasionaría que el cuadricóptero costará \$ 16,924.20.

Por otra parte, se obtuvo el modelo matemático que describe el comportamiento del cuadricóptero al volar y este se subdivide en subsistemas para poder encontrar el control para cada uno de ellos. También, se presentó el algoritmo matemático del control backstepping clásico que será utilizado para diseñar el control backstepping robusto. Además, se muestra el control backstepping con entrada virtual senoidal que se usará en una de las iteraciones para encontrar la entrada de control de los subsistemas. Asimismo, para comprender el procesamiento de imágenes se dan los conceptos necesarios del color, donde para cada modelo se mencionan los rangos (umbrales). Por último, para el procesamiento de imágenes se utilizará el complemento “Color thresholding” que está en el software de Matlab versión 2018, en el cual se encontrarán los niveles de umbralización de las imágenes, aplicando los métodos de segmentación RGB, HSV, YCbCr y CIE-Lab.



# Capítulo 3

## Backstepping robusto ante perturbaciones

En este capítulo se diseña el algoritmo de control que garantiza la estabilidad robusta ante perturbaciones acopladas, partiendo del algoritmo del backstepping clásico. Posteriormente, se obtienen los controles para los subsistemas de altitud, de ángulo de guiñada,  $x - \theta$  y  $y - \phi$ .

### 3.1. Backstepping robusto ante la perturbación acoplada en la entrada

Se tiene el sistema no lineal perturbado de la forma

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta) \xi \quad (3.1)$$

$$\dot{\xi} = u + \delta(t, \eta) \quad (3.2)$$

donde  $[\eta^T, \xi^T]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$  es el estado y  $u \in \mathbb{R}$  es la entrada de control; considere que se cumplen las siguientes consideraciones

1. Las funciones conocidas  $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  y  $g : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  son continuamente diferenciables, y contienen al origen  $\eta = 0$  y  $f(0) = 0$ .
2. La ecuación (3.1) del sistema es estabilizada con la retroalimentación de estado  $\xi = \varphi(\eta)$ , con  $\varphi(0) = 0$ , entonces, hay una función de Lyapunov que satisface

$$\frac{\partial V(\eta)}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta) \varphi(\eta)] \leq -W(\eta),$$

donde  $W(\eta)$  es una función definida positiva,  $\forall \eta \in D$ .

3. La función  $\delta(t, \eta)$  es una perturbación acoplada acotada desvaneciente, es decir

$$\delta(t, 0) = 0, \quad |\delta(t, \eta)| \leq \Delta, \quad \text{y } \Delta > 0.$$

El problema es diseñar el control  $u$  tal que garantice la estabilidad robusta en el origen ( $\eta = 0, \xi = 0$ ) del sistema (3.1) y (3.2) ante las perturbaciones acopladas no estructuradas  $\delta(t, \eta)$ . Para posteriormente, calcular las leyes de control de cada subsistema del cuadricóptero y así garantizar la estabilidad robusta. Ahora, la síntesis del control propuesto se muestra a continuación.

**Teorema 1** *Sea el sistema de la forma (3.1)- (3.2), bajo las suposiciones (1)-(3), con  $k > 0$  y la función de Lyapunov  $V_1(\eta, z) = V(\eta) + \frac{1}{2}z^2$ , donde  $z = \xi - \varphi(\eta)$ ; entonces, la ley de control  $u$  está dada por*

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] - \frac{\partial V(\eta)}{\partial \eta} g(\eta) - k(\xi - \varphi_\eta) - \text{sgn}(\xi - \varphi_\eta) \Delta(\eta),$$

*estabiliza robustamente al sistema.*

**Prueba:** Se basa en la metodología clásica del backstepping [52], se asume que existe una función  $\varphi(\eta)$  tal que,  $\varphi(0) = 0$  y el sistema con esta consideración se reescribe como

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\varphi(\eta) \quad (3.3)$$

tiene punto de equilibrio estable. Ahora, suponga que existe una función suave  $V(\eta)$  definida positiva y  $V(0) = 0$ , tal que satisface

$$\dot{V}(\eta) \Big|_{(3.3)} = \frac{\partial V}{\partial \eta} \dot{\eta} = \frac{\partial V}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\varphi(\eta)] \leq -W(\eta), \quad W(\eta) > 0,$$

donde  $W(\eta)$  es una función definida positiva conocida. Así, el sistema (3.1)-(3.2) se reescribe como

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= [f(\eta) + g(\eta)\varphi(\eta)] + g(\eta)[\xi - \varphi(\eta)], \\ \dot{\xi} &= u + \delta(t, \eta). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Se define a  $z = \xi - \varphi(\eta)$  la variable de desviación y la derivada de  $z$  es  $\dot{z} = \dot{\xi} - \dot{\varphi}(\eta) = (u + \delta(t, \eta)) - \dot{\varphi}(\eta)$ . Entonces, el sistema (3.4) se escribe en función de la variable  $z$ .

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= [f(\eta) + g(\eta)\varphi(\eta)] + g(\eta)z \\ \dot{z} &= u - \dot{\varphi}(\eta) + \delta(t, \eta), \end{aligned} \quad (3.5)$$

como en la metodología clásica del backstepping cuando  $z = 0$ , se garantiza que el sistema (3.5) tiene punto de equilibrio en el origen; la derivada  $\dot{\varphi}$  con respecto al tiempo es

$$\dot{\varphi}(\eta) = \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \dot{\eta} = \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta) \xi].$$

Posteriormente, se define a

$$\bar{v} = u - \dot{\varphi}(\eta). \quad (3.6)$$

Con esta expresión el sistema (3.5) puede escribirse como

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \bar{f}(\eta) + g(\eta) z, \\ \dot{z} &= \bar{v} + \delta(t, \eta), \end{aligned} \quad (3.7)$$

donde  $\bar{f}(\eta) = f(\eta) + g(\eta) \varphi(\eta)$ . A continuación, se propone una función candidata de Lyapunov de la forma

$$V_1(\eta, z) = V(\eta) + \frac{1}{2} z^2,$$

dicha función se deriva a lo largo de las trayectorias del sistema (3.7) para garantizar la estabilidad

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(\eta, z) \Big|_{(3.7)} &= \frac{\partial V(\eta)}{\partial \eta} \bar{f}(\eta) + \frac{\partial V(\eta)}{\partial \eta} g(\eta) z + z \dot{z} \\ &\leq -W(\eta) + \frac{\partial V(\eta)}{\partial \eta} g(\eta) z + z(\bar{v} + \delta(t, \eta)). \end{aligned}$$

Se propone a  $\bar{v} \triangleq -kz - \frac{\partial V(\eta)}{\partial \eta} g(\eta) - \text{sgn}(z) \Delta(\eta)$ , donde  $k > 0$  y  $\text{sgn}$  representa a la función signo; sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene

$$\dot{V}_1(\eta, z) \Big|_{(3.7)} \leq -W(\eta) - kz^2 + z\delta(t, \eta) - z \text{sgn}(z) \Delta(\eta), \quad (3.8)$$

el término  $z\delta(t, \eta)$  se mayoriza empleando la desigualdad de Cauchy-Schwartz como sigue

$$z\delta(t, \eta) \leq |z\delta(t, \eta)| \leq |z| |\delta(t, \eta)| \leq |z| \Delta(\eta);$$

como se sabe  $|z| \triangleq z \text{sgn}(z)$ ; por lo que,  $|z| \Delta(\eta) = z \text{sgn}(z) \Delta(\eta)$ ; sustituyendo en (3.8) se obtiene

$$\dot{V}_1(\eta, z) \Big|_{(3.7)} \leq -W(\eta) - kz^2 < 0,$$

así, la solución del sistema (3.5) es asintóticamente estable. La entrada  $u$  se obtiene de (3.6) como

$$\begin{aligned} u &= \bar{v} + \dot{\varphi}(\eta) \\ &= -kz - \frac{\partial V(\eta)}{\partial \eta} g(\eta) - \text{sgn}(z)\Delta(\eta) + \dot{\varphi}(\eta) \\ &= -k(\xi - \varphi(\eta)) - \frac{\partial V(\eta)}{\partial \eta} g(\eta) - \text{sgn}(\xi - \varphi(\eta))\Delta(\eta) + \frac{\partial \varphi(\eta)}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi], \end{aligned}$$

y se concluye la prueba.  $\square$

## 3.2. Síntesis de los controladores para el cuadricóptero

En esta sección se presenta la síntesis de los controladores para cada uno de los subsistemas del cuadricóptero, mediante el enfoque backstepping y backstepping robusto propuesto en el Teorema 1. Para la obtención de los controladores se parte del modelo matemático simplificado del cuadricóptero dado por (2.14) el cual se subdivide el modelo en subsistemas; el subsistema de altitud, el subsistema de ángulo de guiñada, el subsistema  $x - \theta$  y el subsistema  $y - \varphi$ ; y para cada uno de ellos se encuentran un controlador que estabilice al sistema. Además, sin pérdida de generalidad, las variables  $y$ ,  $x$  y  $z$  representan el error que hay entre la variable deseada y la variable medida para el calculo del control, con el fin de satisfacer los teoremas utilizados; es decir converger a la solución trivial.

En esta contribución, basada en el enfoque de Lyapunov, el controlador no lineal robusto resuelve el problema de seguimiento de la trayectoria de un cuadricóptero. El control propuesto utiliza el método de backstepping [52], que permite construir un algoritmo de control iterativo que rechaza los efectos de la dinámica no estructurada en el modelo no lineal del cuadricóptero. Para ello, el modelo cuadricóptero se divide en cuatro subsistemas relacionados con la altitud, el ángulo de guiñada, el  $x - \theta$  y el  $y - \varphi$ , como en [1], y considera la dinámica no lineal acoplada en los actuadores. Si bien estas perturbaciones son desconocidas, se supone que son acotadas y desvanecientes. La robustez se incorpora en el controlador propuesto para estabilizar al dron ante la presencia de dinámicas no modeladas, que mejoran el sistema de captura de imágenes a bordo del VANT mientras sobrevuela cultivos de maíz para detectar hojas secas, brindando pistas para identificar hongos como “Phyllachora maydis”, “Monographella maydis” y “Coniothyrium phyllachorae” en las hojas de maíz. Estos hongos son la causa de la mancha de asfalto en el del maíz [63], lo que causa pérdidas en las cosechas.

### 3.2.1. Controlador del subsistema de altitud

Para obtener el controlador bajo el enfoque de backstepping, considere el subsistema  $z$  que describe la altitud del cuadricóptero [1], este se representa de la forma

$$\ddot{z} = \frac{\cos \theta \cos \varphi}{m} u_s - g + \delta(\eta, t). \quad (3.9)$$

Considere que  $|\delta(t, \eta)| \leq \Delta_1(\eta)$ . Se realiza la representación espacio de estado del sistema (3.9) con el cambio de variable  $x_1 = z$  y  $x_2 = \dot{z}$ ; además, se tiene que

$$u_s = \frac{m}{\cos \theta \cos \varphi} [g + u_z] = \frac{m}{\cos \theta \cos \varphi} p, \quad (3.10)$$

donde  $p = g + u_z$ . El subsistema anterior se reescribe como

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= u_z + \delta(\eta, t). \end{aligned}$$

Ahora, se selecciona a  $x_2 = \varphi(x_1) = -\alpha_6 x_1$ , donde  $\alpha_6 > 0$ ; aplicando la metodología clásica del backstepping el sistema se reescribe como

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\alpha_6 x_1 \\ \dot{x}_2 &= u_z + \delta(\eta, t). \end{aligned}$$

De acuerdo con [49], se propone una función candidata de Lyapunov de la forma

$$V_z(x_1) = \frac{1}{2} x_1^2,$$

Enseguida se procede a encontrar el control que estabilice al subsistema; para esto se aplica el Teorema 1 propuesto en el capítulo anterior; dicho controlador tiene la forma

$$u_z = -k_z(x_2 + \alpha_6 x_1) - \frac{\partial V_z}{\partial \eta} g(\eta) + \frac{\partial \varphi(x_1)}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] - \text{sgn}(x_2 + \alpha_6 x_1) \Delta_1(\eta),$$

donde  $\xi = x_2$ ,  $f(\eta) = 0$ ,  $\eta = x_1$ ,  $g(\eta) = 1$  y  $\Delta_1(\eta) = \Delta_1$ ; por lo que, la ley de control que estabiliza al subsistema  $Z$  es

$$u_z = -(1 + k_z \alpha_6) x_1 - (\alpha_6 + k_z) x_2 - \text{sgn}(x_2 + \alpha_6 x_1) \Delta_1.$$

### 3.2.2. Controlador del subsistema del ángulo de guiñada

El segundo subsistema a ser controlado describe la dinámica del ángulo de guiñada [1], este se representa de la forma

$$\ddot{\psi} = \dot{\varphi}\dot{\theta}c_1 + c_2\tau_\psi + \delta(\eta, t)$$

donde  $c_1 = \frac{I_y - I_x}{I_z}$ ,  $c_2 = \frac{I}{I_z}$ ,  $|\delta(t, \eta)| \leq \Delta_2(\eta)$ ;  $I_x, I_y, I_z$  son parámetros de la matriz de inercia; definiendo la variables de estado  $x_3 = \psi$  y  $x_4 = \dot{\psi}$ ; además, si se define a  $\tau_\psi$  de la forma

$$\tau_\psi = \frac{1}{c_2} \left( -\varphi\dot{\theta}c_1 + u_\psi \right), \quad (3.11)$$

el subsistema anterior puede reescribirse como

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= u_\psi + \delta(\eta, t). \end{aligned}$$

Aplicando la metodología clásica del backstepping [49], se propone al término estabilizante como  $x_4 = \varphi(x_3) = -\alpha_7 x_3$ , donde  $\alpha_7 > 0$ ; esto ocasiona que el subsistema se escriba

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= -\alpha_7 x_3 \\ \dot{x}_4 &= u_\psi + \delta(\eta, t). \end{aligned}$$

A continuación, se propone una función candidata de Lyapunov

$$V_\psi(x_3) = \frac{1}{2}x_3^2,$$

Posteriormente, se procede a encontrar el control que estabilice al subsistema; para esto se aplica el Teorema 1 propuesto en el capítulo anterior; dicho controlador tiene la forma

$$u_\psi = -k_\psi(x_4 + \alpha_7 x_3) - \frac{\partial V_\psi}{\partial \eta} g(\eta) + \frac{\partial \varphi(x_3)}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] - \text{sgn}(x_4 + \alpha_7 x_3)\Delta_2(\eta),$$

donde  $\xi = x_4$ ,  $u_\psi = u$ ,  $\eta = x_3$ ,  $\Delta_2(\eta) = \Delta_2$ ,  $f(\eta) = 0$  y  $g(\eta) = 1$ ; por lo que, la ley de control estabiliza al subsistema  $\psi$  es

$$u_\psi = -(1 + k_\psi\alpha_7)x_3 - (\alpha_7 + k_\psi)x_4 - \text{sgn}(x_4 + \alpha_7 x_3)\Delta_2.$$

### 3.2.3. Controlador del subsistema $x - \theta$

Sea el subsistema  $x - \theta$  el cual describe el movimiento de traslación en el eje  $x$  y el ángulo de cabeceo ( $\theta$ ) [1]

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -\frac{1}{m} \sin \theta u_s \\ \ddot{\theta} &= \dot{\varphi} \dot{\psi} \frac{I_x - I_z}{I_y} + \frac{l}{I_y} \tau_\theta + \delta(\eta, t),\end{aligned}$$

donde  $a_3 = \frac{I_x - I_z}{I_y}$ ,  $u_s \neq 0$  y  $a_4 = \frac{l}{I_y}$ . Para obtener la representación espacio de estado se considera  $x_5 = x$ ,  $x_6 = \dot{x}$ ,  $x_7 = \theta$  y  $x_8 = \dot{\theta}$ , con estas consideraciones se obtiene la representación espacio de estado

$$\begin{aligned}\dot{x}_5 &= x_6 & (3.12) \\ \dot{x}_6 &= -\frac{1}{m} \sin x_7 u_s \\ \dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= \dot{\varphi} \dot{\psi} a_3 + a_4 \tau_\theta + \delta(\eta, t).\end{aligned}$$

Tomando la primera y segunda ecuación de la representación espacio de estado y seleccionando a la entrada virtual de la forma

$$u_{1x} = \sin x_7 = -\frac{m}{u_s} u_x, \quad (3.13)$$

donde  $u_x$  es la entrada de control; por lo que, el subsistema queda de la forma

$$\begin{aligned}\dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= u_x.\end{aligned}$$

De acuerdo, a la metodología del backstepping,  $x_6 = \varphi(x_5) = -\alpha_5 x_5$ , donde  $\alpha_5 > 0$  se tiene

$$\begin{aligned}\dot{x}_5 &= -\alpha_5 x_5 & (3.14) \\ \dot{x}_6 &= u_x.\end{aligned}$$

Para el subsistema (3.14), se propone una función de Lyapunov

$$V_1(x_5) = \frac{1}{2} x_5^2,$$

y se aplica la metodología clásica del backstepping; por lo que, la entrada  $u_x$  es

$$u_x = -(1 + \alpha_5 k_5)x_5 - (\alpha_5 + k_5)x_6.$$

Sustituyendo el control  $u_x$  en (3.13), se obtiene

$$u_{1x} = \frac{m}{u_s} (d_1 x_5 + d_2 x_6),$$

donde:  $d_1 = 1 + \alpha_5 k_5$  y  $d_2 = \alpha_5 + k_5$ . Para el siguiente paso, se aplica la metodología iterativa del backstepping agregando la tercera ecuación de la representación de espacio de estado del subsistema (3.12)

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= -\frac{1}{m} \sin x_7 u_s \\ \dot{x}_7 &= x_8. \end{aligned} \quad (3.15)$$

El subsistema (3.15) y se aplica la estructura modificada del backstepping propuesta por [1]

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \begin{bmatrix} x_6 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{u_s}{m} \end{bmatrix} \sin x_7 \\ \dot{\xi} &= x_8 = u_{2x}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

donde  $\xi = x_7$ ; continuando con el método iterativo de backstepping, se propone una nueva función de Lyapunov

$$V_2(x_5, x_6) = \frac{1}{2}x_5^2 + \frac{\beta_1}{2}(x_6 + \alpha_5 x_5)^2,$$

se propone la entrada virtual  $\varphi_1$  y de acuerdo al método iterativo del backstepping, esta se define mediante el control previo  $u_{1x}$ , la cual es

$$\varphi_1(x_5, x_6) = \frac{m}{u_s} (d_1 x_5 + d_2 x_6). \quad (3.17)$$

Ahora, dada la ecuación (3.17) se sustituye (3.10) en  $\varphi_1$

$$\varphi_1(x_5, x_6) = \frac{\cos x_7 \cos x_{11}}{p} (d_1 x_5 + d_2 x_6).$$

debido a que el subsistema (3.16) tiene en la entrada virtual la función seno se aplica el control  $u$  dado en (2.22), el cual tiene la forma

$$u = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta) \sin \xi] - \frac{\partial V}{\partial \eta} g(\eta) - k (\sin \xi - \varphi(\eta))}{\cos \xi}.$$

Por lo que, realizando los cambios de variables pertinentes el control es

$$u_{2x} = \frac{\frac{\partial \varphi_1}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta) \sin \xi] - \frac{\partial V_2}{\partial \eta} g(\eta) - k_6 (q_1)}{\cos x_7},$$

donde  $\eta = (x_5, x_6)$ ; realizando las derivadas parciales de  $\varphi_1$  y  $V_2$  se llega a

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\varphi_1(x_5, x_6))}{\partial x_5} &= \frac{\cos x_7 \cos x_{11} d_1}{p}, \\ \frac{\partial (\varphi_1(x_5, x_6))}{\partial x_6} &= \frac{\cos x_7 \cos x_{11} d_2}{p}, \\ \frac{\partial (V_2(x_5, x_6))}{\partial x_6} &= \beta_1 \alpha_5 x_5 + \beta_1 x_6, \\ q_1 &= \sin x_7 - \varphi_1, \end{aligned}$$

recuerde que  $p = g + u_z$ . Entonces, la entrada virtual  $u_{2x}$  es

$$\begin{aligned} u_{2x} &= \left( \frac{k_6 d_1 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 \alpha_5 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) x_5 \\ &+ \left( \frac{d_1 \cos x_{11} + k_6 d_2 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) x_6 - (d_2 + k_6) \tan(x_7). \end{aligned}$$

Finalmente, se agrega la última ecuación de la representación en espacio de estado (3.12).

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= x_6 & (3.18) \\ \dot{x}_6 &= -\frac{p \sin x_7}{\cos x_7 \cos x_{11}} \\ \dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= \dot{\varphi} \dot{\psi} c_1 + c_2 \tau_\theta + \delta(\eta, t) \end{aligned}$$

donde:  $\eta = (x_5, x_6, x_7)$ , además, se sustituyó  $u_s$  en (3.18) y se define al control  $\tau_\theta$  como

$$\tau_\theta = \frac{1}{c_2} \left[ -\dot{\varphi} \dot{\psi} c_1 + \tau_{\theta a} \right]. \quad (3.19)$$

Sustituyendo a  $\tau_\theta$  en (3.18)

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= x_6 & (3.20) \\ \dot{x}_6 &= -\frac{p \sin x_7}{\cos x_7 \cos x_{11}} \\ \dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= \tau_{\theta a} + \delta(\eta, t), \end{aligned}$$

este subsistema se puede reescribir como

$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= \begin{bmatrix} x_6 \\ -\frac{p \sin x_7}{\cos x_7 \cos x_{11}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} x_8 \\ \dot{\xi} &= \tau_{\theta a} + \delta(\eta, t) = u_{3x} + \delta(\eta, t).\end{aligned}\quad (3.21)$$

La función de Lyapunov propuesta para el subsistema (3.20) es de la forma

$$V_3(x_5, x_6, x_7) = \frac{1}{2}x_5^2 + \frac{\beta_1}{2}(x_6 + \alpha_5 x_5)^2 + \frac{\beta_2}{2} \left( \sin x_7 - \frac{\cos x_7 \cos x_{11}}{p} (d_1 x_5 + d_2 x_6) \right)^2.$$

La entrada virtual  $\varphi_2$  se asocia a  $u_{2x}$

$$\begin{aligned}\varphi_2 &= \left( \frac{k_6 d_1 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 \alpha_5 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) x_5 \\ &+ \left( \frac{(d_1 + k_6 d_2) \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) x_6 - (d_2 + k_6) \tan x_7.\end{aligned}$$

Ahora, se procede a encontrar el control que estabilice al subsistema (3.21); para esto se aplica el Teorema 1 propuesto en el capítulo anterior; dicho controlador tiene la forma

$$u_{3x} = -k_7 z_3 - \frac{\partial V_3(\eta)}{\partial \eta} g(\eta) - \text{sgn}(z_3) \Delta_3(\eta) + \frac{\partial \varphi_2(\eta)}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta) \xi],$$

donde  $z_3 = x_8 - \varphi_2$ ,  $k_7 > 0$ ,  $\Delta_3(\eta) = \Delta_3$ ,  $\eta = (x_5, x_6, x_7)$ ,  $g(\eta) = [0, 0, 1]^T$ ; las derivadas parciales de  $\varphi_2$  y  $V_3$  son

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varphi_2}{\partial x_5} &= \left( \frac{k_6 d_1 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 \alpha_5 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_6} &= \left( \frac{d_1 \cos x_{11}}{p} + \frac{k_6 d_2 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_7} &= \left( \frac{2\beta_1 \alpha_5 p \sin x_7}{\cos^3 x_7 \cos x_{11}} \right) x_5 + \left( \frac{2\beta_1 p \sin x_7}{\cos^3 x_7 \cos x_{11}} \right) x_6 - (d_2 + k_6) \sec^2 x_7 \\ \frac{\partial V_3}{\partial x_7} &= \beta_2 \sin x_7 \cos x_7 - \left[ \frac{\beta_2 \cos x_{11} (d_1 x_5 + d_2 x_6)}{P} \right] (2 \cos^2 x_7 - 1).\end{aligned}$$

Así, la entrada  $u_{3x}$  es

$$\begin{aligned}u_{3x} &= \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_5} x_6 - \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_6} \frac{p \sin x_7}{\cos x_7 \cos x_{11}} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial x_7} x_8 - \frac{\partial V_3}{\partial x_7} - k_7 (x_8 - \varphi_2) \\ &- \text{sgn}(x_8 - \varphi_2) \Delta_3.\end{aligned}$$

### 3.2.4. Controlador del subsistema $y - \varphi$

Considere el subsistema  $y - \varphi$ , el cual describe el ángulo de alabeo y la traslación en el eje  $y$ ; dicho subsistema se representa mediante las siguientes ecuaciones [1]

$$\begin{aligned}\ddot{y} &= \frac{u_s}{m} \cos \theta \sin \varphi \\ \ddot{\varphi} &= \dot{\theta} \dot{\psi} a_1 + a_2 \tau_\varphi + \delta(t, \eta),\end{aligned}$$

donde  $a_1 = \frac{I_y - I_z}{I_x}$ ,  $a_2 = \frac{l}{I_x}$ , realizando cambio de variables  $x_9 = y$ ,  $x_{10} = \dot{y}$ ,  $x_{11} = \varphi$ ,  $x_{12} = \dot{\varphi}$ , así la representación espacio de estado se representa como

$$\begin{aligned}\dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \frac{\cos x_7}{m} \sin x_{11} u_s \\ \dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= \dot{\theta} \dot{\psi} a_1 + a_2 \tau_\varphi + \delta(t, \eta),\end{aligned}\tag{3.22}$$

para el primer paso, considere las primeras dos ecuaciones de (3.22)

$$\begin{aligned}\dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \frac{\cos x_7}{m} \sin x_{11} u_s.\end{aligned}\tag{3.23}$$

Si la entrada virtual  $u_y$  se selecciona de la forma

$$u_y = \sin x_{11} = \frac{m}{u_s \cos x_7} [u_1].\tag{3.24}$$

Sustituyendo la entrada virtual (3.24) en (3.23) se tiene

$$\begin{aligned}\dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= u_1,\end{aligned}$$

definiendo  $x_{10} = \varphi(x_9) = -\alpha_1 x_9$ , donde  $\alpha_1 > 0$ ; el subsistema se reescribe como

$$\begin{aligned}\dot{x}_9 &= -\alpha_1 x_9 \\ \dot{x}_{10} &= u_1.\end{aligned}$$

Ahora, se propone una función de Lyapunov

$$V_1(x_9) = \frac{1}{2}x_9^2$$

y aplicando la metodología clásica del backstepping la entrada

$$u_1 = -(k_1\alpha_1 + 1)x_9 - (k_1 + \alpha_1)x_{10}. \quad (3.25)$$

Sustituyendo (3.25) y (3.10) en (3.24) la entrada es

$$u_y = \frac{\cos x_{11}}{p} (-b_1x_9 - b_2x_{10}),$$

donde  $b_1 = k_1\alpha_1 + 1$ ,  $b_2 = k_1 + \alpha_1$ ; en el siguiente paso, se agrega la siguiente ecuación de la representación espacio de estado

$$\begin{aligned} \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \frac{p}{\cos x_{11}} \sin x_{11} \\ \dot{x}_{11} &= x_{12}, \end{aligned}$$

se reescribe el subsistema en la forma modificada del backstepping propuesta en [1]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_{10} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{p}{\cos x_{11}} \end{bmatrix} \sin x_{11} \\ \dot{\xi} &= x_{12} = u_{y2}, \end{aligned}$$

donde  $\xi = x_{11}$ ; se propone una nueva función de Lyapunov

$$V_2(x_9, x_{10}) = \frac{1}{2}x_9^2 + \frac{\beta_3}{2}(x_{10} + \alpha_1x_9)^2.$$

Ahora, la entrada virtual  $\varphi_{1y}$  se define en base a  $u_y$

$$\varphi_{1y} = \varphi_{1y}(x_9, x_{10}) = \frac{\cos x_{11}}{p} (-b_1x_9 - b_2x_{10}),$$

aplicando la proposición 1 de [1], el control  $u_{y2}$  es

$$u_{y2} = \frac{\frac{\partial \varphi_{1y}}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta) \sin \xi] - \frac{\partial V_2}{\partial \eta} g(\eta) - k_2 (\sin x_{11} - \varphi_1)}{\cos x_{11}},$$

reduciendo  $u_{y2}$  a su mínima expresión se obtiene

$$u_{y2} = - \left[ \frac{k_2 b_1}{p} + \frac{\beta_3 \alpha_1 p}{\cos^2 x_{11}} \right] x_9 - \left[ \frac{b_1 + k_2 b_2}{p} + \frac{\beta_3 p}{\cos^2 x_{11}} \right] x_{10} - (b_2 + k_2) \tan x_{11}.$$

En el último paso, se agrega la última ecuación de la representación espacio de estado

$$\begin{aligned} \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \frac{p \sin x_{11}}{\cos x_{11}} \\ \dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= \dot{\theta} \dot{\psi} a_1 + a_2 \tau_\varphi + \delta(t, \eta), \end{aligned} \quad (3.26)$$

donde  $\eta = (x_9, x_{10}, x_{11})^T$ ; se define a  $\tau_\varphi$  como

$$\tau_\varphi = \frac{1}{a_2} \left[ -\dot{\theta} \dot{\psi} a_1 + \tau_1 \right], \quad (3.27)$$

sustituyendo (3.27) en el subsistema (3.26) se tiene

$$\begin{aligned} \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \frac{p \sin x_{11}}{\cos x_{11}} \\ \dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= \tau_1 + \delta(t, \eta), \end{aligned} \quad (3.28)$$

el subsistema (3.28) se reescribe

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_{10} \\ \frac{p \sin x_{11}}{\cos x_{11}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} x_{12} \\ \dot{\xi} &= \tau_1 + \delta(t, \eta). \end{aligned} \quad (3.29)$$

donde  $\tau_1 = u_{y3}$ , la entrada virtual  $\varphi_{2y}$  se asocia a  $u_{y2}$ ; además, se propone una función de Lyapunov de la forma

$$V_3(x_9, x_{10}, x_{11}) = \frac{1}{2} x_9^2 + \frac{\beta_3}{2} (x_{10} + \alpha_1 x_9)^2 + \frac{\beta_4}{2} \left[ \sin x_{11} + \frac{(b_1 x_9 + b_2 x_{10}) \cos x_{11}}{p} \right]^2.$$

A continuación, se calcula el control que establezca al subsistema (3.29), utilizando el Teorema 1 propuesto en el capítulo anterior; la entrada es

$$u_{y3} = \frac{\partial \varphi_{2y}}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] - \frac{\partial V_3}{\partial \eta} g(\eta) - k_3(z_4) - \text{sgn}(z_4)\Delta_4(\eta),$$

donde:  $z_4 = x_{12} - \varphi_{2y}$ ,  $\Delta_4(\eta) = \Delta_4$ ,  $\eta = (x_9, x_{10}, x_{11})$ ,  $g(\eta) = [0, 0, 1]^T$ ; finalmente, el

control  $u_{y3}$  es:

$$u_{y3} = \frac{\partial \varphi_{2y}}{\partial x_9} x_{10} + \frac{\partial \varphi_{2y}}{\partial x_{10}} \frac{p \sin x_{11}}{\cos x_{11}} + \frac{\partial \varphi_{2y}}{\partial x_{11}} x_{12} - \frac{\partial V_3}{\partial x_{11}} - k_3(x_{12} - \varphi_{2y}) - \text{sgn}(x_{12} - \varphi_{2y}) \Delta_4.$$

donde

$$\frac{\partial \varphi_{2y}}{\partial x_9} = - \left( \frac{k_2 b_1}{p} + \frac{\beta_3 \alpha_1 p}{\cos^2 x_{11}} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{2y}}{\partial x_{10}} = - \left( \frac{b_1 + k_2 b_2}{p} + \frac{\beta_3 p}{\cos^2 x_{11}} \right)$$

$$\frac{\partial \varphi_{2y}}{\partial x_{11}} = - \left( \frac{(k_2 + b_2)}{\cos^2 x_{11}} + \frac{(\alpha_1 x_9 + x_{10}) 2\beta_3 P \sin x_7}{\cos^3 x_7} \right)$$

$$\frac{\partial V_3}{\partial x_{11}} = \left[ \frac{\beta_4}{p} (b_1 x_9 + b_2 x_{10}) \right] (2 \cos^2 x_{11} - 1) + \left( \beta_4 - \frac{\beta_4 (b_1^2 x_9^2 + b_2^2 x_{10}^2)}{p^2} - \frac{2\beta_4 b_1 b_2 x_9 x_{10}}{m^2 p^2} \right) \sin x_{11} \cos x_{11}.$$

### 3.3. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se desarrollo, con base en la metodología del backstepping, el control robusto ante perturbaciones desvanecientes para garantizar la estabilidad del sistema; además, se desarrollaron los controladores de altitud es

$$u_s = \frac{m}{\cos \theta \cos \varphi} [g + u_z],$$

el de guiñada tiene la forma

$$\tau_\psi = \frac{1}{c_2} \left( -\varphi \dot{\theta} c_1 + u_\psi \right),$$

el del subsistema  $x - \theta$

$$\tau_\theta = \frac{1}{c_2} \left[ -\dot{\varphi} \dot{\psi} c_1 + \tau_{\theta a} \right],$$

y finalmente, el controlador del subsistema  $y - \varphi$  es

$$\tau_\varphi = \frac{1}{a_2} \left[ -\dot{\theta} \dot{\psi} a_1 + \tau_1 \right].$$

Estos se implementarán en simulación para el seguimiento de diferentes trayectorias en el cuadricóptero y posteriormente, se mostrarán resultados experimentales en exteriores.



# Capítulo 4

## Sistema de visión y procesamiento de las imágenes

### 4.1. Introducción

A continuación se presenta el sistema de visión y el procesamiento de las imágenes, los cuales tienen la finalidad de localizar en los sembradíos de maíz la enfermedad mancha de asfalto en base a las imágenes tomadas al sobre volar el cultivo mediante el cuadricóptero. Además, se describen los diferentes sistemas de color que se usan en el procesamiento de las imágenes. También, se presentan los resultados experimentales del vuelo exterior sobre las plantas de maíz.

### 4.2. Sistema de visión

Los componentes principales de un sistema de visión son la iluminación, la cámara y el procesamiento de las imágenes. La luz ilumina; en este caso a las plantas a inspeccionar permitiendo destacar las características a analizar (la enfermedad mancha de asfalto) y estas son vistas por la cámara. La lente de la cámara capta la imagen y se la envía al sensor en forma de luz; dicho sensor convierte la luz que recibe a una imagen digital la cual es guardada en la memoria de la cámara; para posteriormente ser analizada. El sistema de visión utilizado está compuesto principalmente por 2 módulos. El primer módulo es una cámara, con la cual se capturan las imágenes mediante video. Mientras que el segundo módulo corresponde a la parte de procesamiento de las imágenes. Para este procesamiento se utiliza la librería de segmentación del color (Color Thresholding) de Matlab, con la que se pueden seleccionar las áreas de interés en la imágenes a analizar con base en los espacios de color (RGB, HSV, YCbCr y CIE-Lab), esto se realiza aplicando la segmentación en imágenes. La segmentación de imágenes es una técnica de procesamiento que se refiere a la extracción

de información útil de un fotograma para facilitar la observación y el análisis, ya que el resto del contenido de la imagen no es útil para el propósito buscado (es decir, si dentro de una imagen se selecciona el color rojo, todo lo que no sea de color rojo es discriminado por el método de segmentación). Se seleccionó esta librería porque, permite básicamente realizar una comparación de nivel de intensidad pixel a pixel con un determinado umbral (rango), definido previamente por el usuario. Para establecer dicho umbral, es necesario analizar la región de interés que se desea aislar con el propósito de encontrar un nivel de color característico y exclusivo que defina a esa área. Si bien, hay otros métodos de segmentación como el CIE-XYZ, HSI, entre otros; aquí se emplearán los que incluye la librería de MATLAB. En este proyecto la captura de imágenes se realiza mediante una cámara GoPro Hero 8 Black (Figura 4.1) con las siguientes características:

- Procesador: GoPro GP1
- Resolución foto: 12 Mega pixeles
- Resolución video: 4K@60, 1080p@240, cámara lenta 8x
- Micrófonos: tres micrófonos, reducción de ruido de viento
- Almacenamiento: MicroSd de hasta 256GB
- Estabilización de video: HyperSmooth 2.0 y Boost
- Conectividad: Wifi, Bluetooth, GPS y USB-C
- Batería: 1220 mAh
- Dimensiones: 66.3 x 48.8 x 28.4 milímetros
- Peso: 126 gramos



Figura 4.1: Cámara GoPro Hero 8 Black.

Además, tiene un software de estabilización de imagen, llamado "HyperSmooth 2.0", el cual se encarga de compensar la vibración de la cámara debido al movimiento que esta pueda presentar al momento de tomar video o fotos; dicha función cuenta con cuatro ajustes.

También, el fabricante da recomendaciones con base en la actividad que se va a realizar y menciona cual sería la mejor configuración para la cámara. Si se desea tomar fotos se puede seleccionar el lente digital de tres formas: gran angular (16-34mm), lineal (19-39mm) o estrecho (27mm). En los modos de toma de fotografías se tiene la opción de reducción de ruido multifotograma, es decir toma una ráfaga de fotos las combina automáticamente en una sola para disminuir la distorsión. Es posible tomar una secuencia de fotos definiendo el intervalo de captura que van desde 0.5, 1, 2, 5, 10 y 30 segundos, ó 1, 2, 5, 30 y 60 minutos; una vez que se define el intervalo de captura solo se presiona obturador para empezar la captura de la secuencia y esta termina hasta que se vuelve a presionar el obturador. Debido a todas las características y ventajas que presenta esta cámara es la que se utiliza para la captura de las imágenes del sembradío, para posteriormente realizar el procesamiento de las imágenes. Cabe mencionar, que la cámara se acopló al dron sin uso del gimbal, ni se uso software adicional para corregir las imágenes captadas por la cámara.

El cuadricóptero (Figura 4.2), no está dentro de la definición del sistema de visión; sin embargo, es el encargado de realizar el desplazamiento de la cámara sobre el sembradío. El vuelo se debe realizar a una altura de 0.5 m a 1 m con respecto a la espiga de la planta. Dicho desplazamiento tiene que realizarse de manera uniforme para afectar lo menos posible a la captura del video o imágenes, de ahí la necesidad de un control robusto.



Figura 4.2: Plataforma experimental.

Una vez, concluido el vuelo del cuadricóptero sobre el sembradío, el usuario importa el video a la computadora y ahí hace la selección de las imágenes a segmentar, para localizar hojas secas. Después, el usuario importa la imagen la librería antes descrita para realizar la segmentación; todo esto de modo “off-line”.

### 4.3. Procesamiento de la imagen

En la visión artificial los procesos de segmentación son de vital importancia cuando se trata de detectar objetos en entornos no estructurados. La segmentación hace uso de la información del color, que sirve para el tratamiento de secuencias de videos y/o fotogramas para la detección de objetos o individuos en escenas móviles, hasta la detección para el seguimiento. El problema de la segmentación de imágenes ha sido tratado y se han realizado varias propuestas tanto para segmentación de imágenes en escala de grises como de imágenes en color. Típicamente, se hacen dos tipos de aproximaciones básicas para solucionar este problema; una de ellas es la detección de bordes y otra basada en la detección de regiones. En los métodos basados en bordes se detectan discontinuidades locales y que más tarde se tratan de unir formando un borde que delimita unos objetos de otros. En los métodos basados en regiones, se busca determinar las áreas de una imagen que tienen propiedades homogéneas y el borde de estas delimitará unos objetos de otros.

Para la aplicación de los métodos de segmentación se lleva acabo la siguiente metodología (Figura 4.3)

1. Adquisición de las imágenes; se realizan vuelos sobre los cultivos para obtener imágenes necesarias.
2. Descarga de imágenes; concluido el vuelo se extrae de la cámara las imágenes capturadas.
3. Uso del software MATLAB; se abre el software para realizar el procesamiento de las imágenes.
4. Uso de la librería “Color thresholding”; al iniciar la librería se carga la imagen a ser segmentada.
5. Selección del método de segmentación; se elige el método de segmentación a utilizar; ya sea RGB, HSV, YCbCr ó CIE-Lab.
6. Seleccionar el área de interés para obtener los valores de umbral del método escogido.
7. Cargar una nueva imagen para que sea segmentada en base a los umbrales obtenidos en el paso anterior; es decir, los umbrales obtenidos en el paso anterior sirven para que

posteriormente, el usuario importe distintas imágenes a un programa desarrollado en Matlab y en base a los umbrales obtenidos se realiza la segmentación de las imágenes importadas, en busca de indicios de la mancha de asfalto.

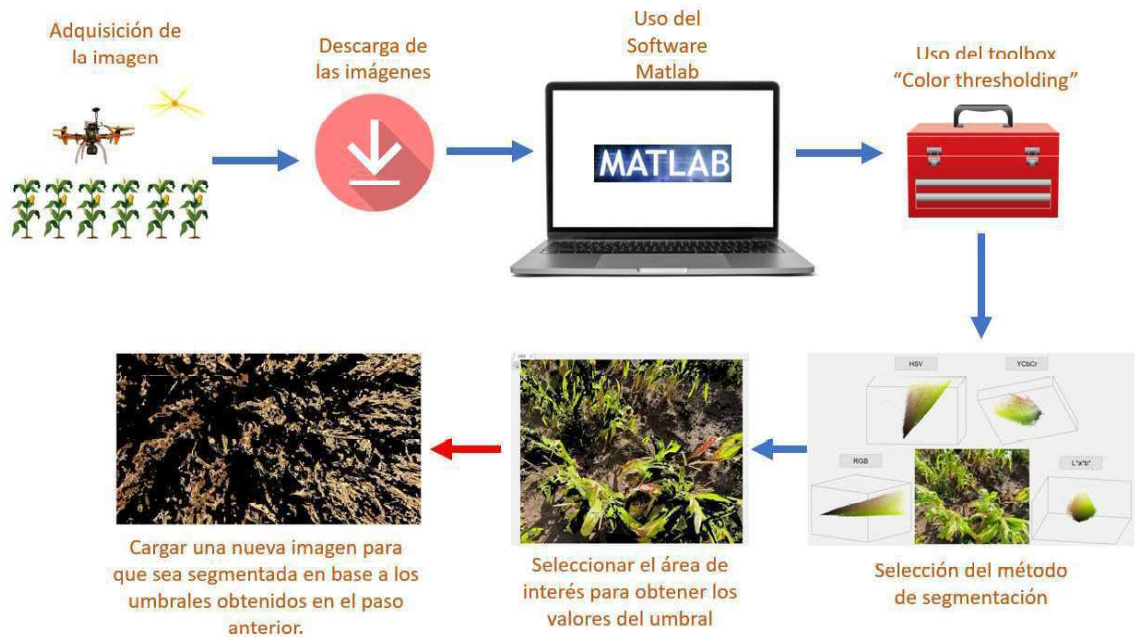


Figura 4.3: Esquema para la aplicación de la metodología de segmentación.

### 4.3.1. Método de segmentación RGB

El espacio de color RGB es el más utilizado en la mayoría de las cámaras de fotografía y video para construir una imagen de color. De ahí, su importancia en visión artificial ya que trabaja con el mismo espacio de color con el que opera la cámara con la que se capturan las imágenes; permite evitar la alteración de las propiedades del color durante el proceso de segmentación, propia de los errores de conversión y transformación.

La segmentación de una imagen RGB se realiza segmentado individualmente cada una de las tres componentes de color de las que consta la imagen. La segmentación se fundamenta en la detección de umbrales del mapa de componentes RGB. En este caso, en particular en base a imágenes tomadas a sembradíos de maíz se detectará a la planta y posteriormente las hojas secas que cada planta tenga (Figura 4.4). Primero, se escoge una de las fotografías, en ella se seleccionan los pixeles de interés para saber sus valores en el espacio RGB, esto con la finalidad de poder distinguir a la planta de maíz y posteriormente las hojas secas que tiene las plantas. Una vez que se tienen los valores de los pixeles seleccionados se crea un filtro con base en estos valores para solo detectar a la planta con sus respectivas hojas secas;

posteriormente, se filtra la fotografía original para distinguir a las planta de maíz con sus hojas secas. Es importante mencionar, que este tratamiento de imágenes se realiza después de realizar el vuelo. Cabe recordar que los umbrales completos para cada color del modelo RGB es de 0 a 255. En la Figura 4.5 se muestra la fotografía procesada donde se resalta a la planta con las hojas secas, ya que estas fueron las áreas seleccionadas; en la foto procesada las áreas que no son de interés se colorean de negro, como se aprecia se detecta de manera correcta a la planta, pero con algo de dificultad las hojas secas. Los valores de los umbrales son:  $R > 126$ ,  $G > 104$ ,  $B < 80$ .



Figura 4.4: Imagen Capturada.



Figura 4.5: Imagen procesada mediante segmentación RGB.

### 4.3.2. Método de segmentación HSV

El fundamento empleado para segmentar imágenes es similar al usado para el espacio de color RGB. Así, se transforma inicialmente, la imagen RGB a HSV y se separan las tres componentes de color: matiz, saturación y la intensidad, para analizarlos y trabajar con ellos. Al aplicar el método de segmentación HSV, se trata de detectar solo a las hojas secas, para que en análisis subsecuentes se analicen dichas hojas para buscar la mancha de asfalto; los resultados obtenidos se pueden ver en la Figura 4.6, donde las partes discriminadas son las que aparecen en color negro y se observa parte de las hojas secas, pero no aparecen completas, también en la imagen aparece ruido, es decir, zonas que no son de interés. Esto se puede distinguir si se compara con la imagen original (Figura 4.4); al hacer dicha comparación se aprecia que se están detectando ramas de hierbas o el suelo. Recuerde que los umbrales completos para cada elemento del modelo HSV es de 0 a 1. Los umbrales obtenidos son:  $0.096 < H < 0.153$ ,  $0.243 < S < 0.944$ ,  $0.222 < V < 0.944$ .



Figura 4.6: Imagen procesada mediante segmentación HSV.

### 4.3.3. Método de segmentación YCbCr

En este método, la información de la luminosidad está representada por una sola componente, Y, y la información de color es almacenada como dos componentes de la diferencia de color, Cb y Cr. La componente de cromaticidad azul o Cb es la diferencia entre la componente azul y el valor de referencia, y la componente de cromaticidad roja o Cr es la diferencia entre la componente roja y el valor de referencia. El valor de la componente de luminosidad Y se encuentra en un rango nominal de 16 - 235; Cb y Cr están definidas en un rango nominal de 16 - 240. Al aplicar el método de segmentación YCbCr se decide igualmente solo detectar las hojas secas que tienen las plantas de maíz; y en la Figura 4.7 se observan los resultados obtenidos, donde si se le compara con la obtenida en la segmentación HSV, se aprecia que de igual manera tiene algo de ruido pero la detección de las hojas secas lo hace de mejor manera; ya que las hojas secas no se ven tan discontinuas. Cabe recordar que los umbrales completos para la ponderación y los componentes de cromaticidad del modelo YCbCr es para Y de 0 a 255. Los umbrales que se obtienen son  $70 < Y < 225$ ,  $72 < Cb < 109$ ,  $136 < Cr < 163$ .



Figura 4.7: Imagen procesada mediante segmentación YCbCr.

#### 4.3.4. Método de segmentación CIE-Lab

Para realizar la clasificación de los colores, se utiliza el espacio de color CIE-Lab, evaluando cualitativamente su capacidad de emular la manera en la que los seres humanos perciben los colores. En la Figura 4.8 se visualiza la detección de las hojas secas, se aprecia que la imagen tiene más ruido que la imagen obtenida mediante la segmentación YCbCr, pero tiene menos que la segmentación HSV. Tenga presente que los umbrales completos para cada color de referencia del modelo CIE-Lab es para L de 0 a 100 y para los componentes a y b es de -100 a 100. Los siguientes umbrales son los proporcionados por la segmentación CIE.Lab,  $38.49 < L < 100$ ,  $-10.353 < a < 19.622$ ,  $19.622 < b < 55.531$



Figura 4.8: Imagen procesada mediante segmentación CIE-Lab.

### 4.4. Implementación de los métodos de segmentación

Con los umbrales obtenidos de los métodos de segmentación se realiza un programa en Matlab para analizar las imágenes obtenidas de los vuelos realizados sobre los sembradíos

de maíz. Primero se selecciona una imagen (Figura 4.9), y posteriormente se somete a los umbrales de cada método para analizar la detección de las hojas secas en el sembradío. La Figura 4.9 se seleccionó para someter a los métodos de segmentación al caso extremo donde todas las hojas están secas, esto para validar que los umbrales seleccionados sean los correctos.



Figura 4.9: Fotografía obtenida al sobre volar un cultivo de maíz.

La Figura 4.10 muestra la aplicación de la segmentación RGB, la Figura 4.11 presenta lo que se obtuvo con los umbrales de la segmentación HSV, la Figura 4.12 se observan los resultados al aplicar los umbrales mediante el método de segmentación YCbCr; y por último, la Figura 4.13 proporciona la imagen segmentada al aplicar el método CIE-Lab. Se aprecia que la segmentación RGB para la detección de hojas secas no es muy conveniente, ya que solo se aprecian puntos donde están las hojas secas de la planta, mientras que en el método de segmentación HSV se puede apreciar una mayor detección de las hojas secas en la imagen del cultivo pero estas parecen pinceladas y no se distingue bien a la planta. En la segmentación YCbCr ya se puede apreciar de mejor manera las hojas secas en la parcela, aunque al compararla con la imagen original hay partes de las hojas secas de la planta que a pesar de que están secas no aparecen en la imagen procesada. Por último, al ser aplicado a la Figura 4.9 el método de segmentación CIE-Lab se puede ver que detectan bien las plantas secas, aunque también un poco del suelo. Estas imágenes fueron tomadas cuando se aplico el control backstepping robusto propuesto, dicho controlador proporcionó robustez y mejoró el rendimiento del cuadricóptero para el seguimiento de trayectorías, lo cual reduce la distorsión de las imágenes de los cultivos.

La robustez proporcionada al controlador propuesto es necesaria para mejorar el rendimiento del vehículo en el entorno exterior. Este rendimiento mejorado es un tema crucial para la captura de imágenes mientras el UAV ejecuta la tarea de seguimiento de la trayectoria, lo que permite reducir la distorsión de las imágenes de los cultivos. De hecho, cuando se

utiliza el controlador PD para el seguimiento de trayectorias del VANT las imágenes no estaban nítidas, de diez experimentos, solo seis resultaron satisfactorios para estabilizar el dron con la cámara montada. Por otro lado, cuando se aplicó el control backstepping robusto, todas las pruebas fueron satisfactorias.

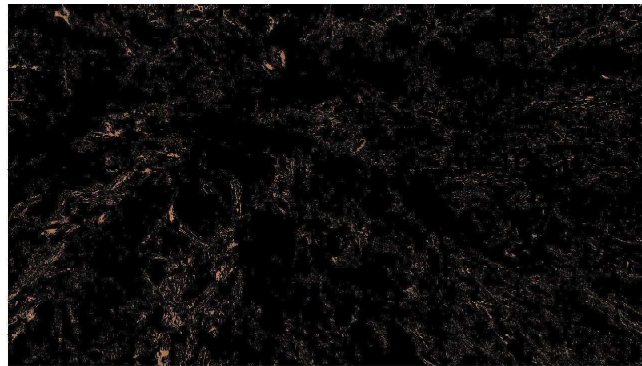


Figura 4.10: Imagen aplicando los umbrales de la segmentación RGB.

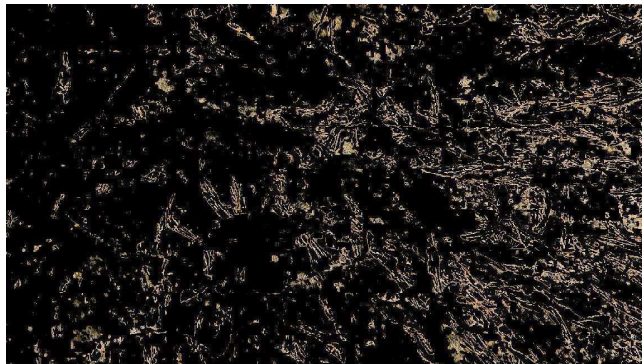


Figura 4.11: Imagen aplicando los umbrales de la segmentación HSV.

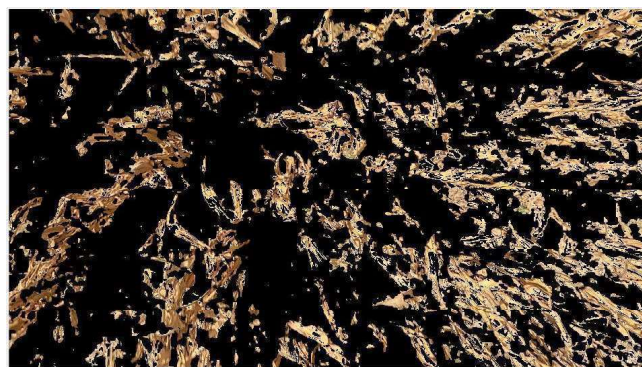


Figura 4.12: Imagen aplicando los umbrales de la segmentación YCbCr.



Figura 4.13: Imagen aplicando los umbrales de la segmentación CIE-Lab.

Para comprobar que método funciona mejor para la detección de la mancha de asfalto, se selecciona una imagen que tenga la enfermedad, Figura 4.14; a esta se le aplican los métodos de segmentación (Figura 4.15), al comparar las imágenes se observa que en el método de segmentación CIE-Lab se aprecia mejor la enfermedad.



Figura 4.14: Imagen con alto grado de mancha de asfalto

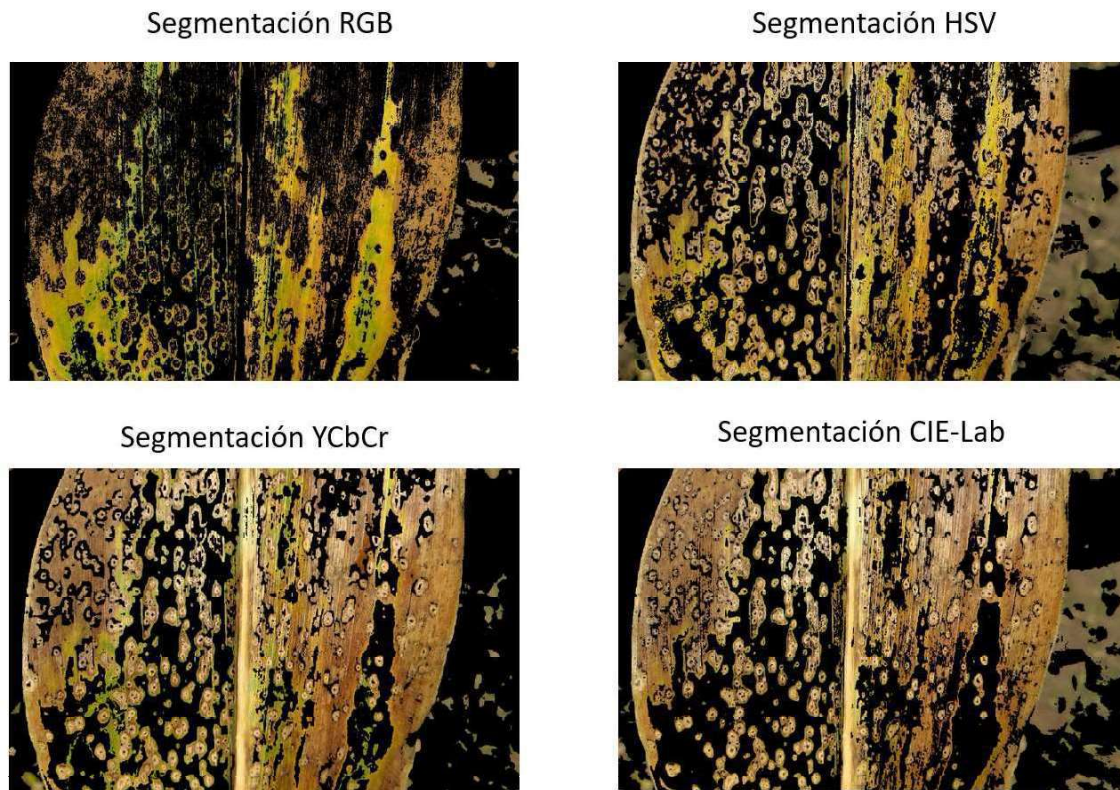


Figura 4.15: Imagen aplicando los métodos de segmentación.

## 4.5. Comentarios del capítulo

Como se puede apreciar se detecta a la planta en su mayoría o las hojas secas; para mejorar la detección se definen los intervalos de los umbrales para el filtrado de la imagen en base a los métodos de segmentación RGB, HSV, YCbCr, CIE-Lab; si bien, la detección hasta el momento se centra en las hojas secas, es porque en los sembradíos que se visitaron no había la enfermedad mancha de asfalto; pero como se ha comentado en capítulos anteriores, lo primero en ocurrir al enfermarse las plantas es que se empiezan a secar las hojas de las plantas; por lo tanto, es importante detectar las hojas secas. Para verificar la utilidad de los métodos de segmentación se consiguió una fotografía donde la planta tenga la enfermedad y al aplicar los métodos de segmentación a está, se obtienen resultados donde se aprecia la afección en la planta.



# Capítulo 5

## Resultados experimentales del vuelo del cuadricóptero en exteriores

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al aplicar el control robusto backstepping propuesto; además, se muestran resultados experimentales del seguimiento de trayectorias con controladores PD, con el fin de compararlos. Estos vuelos se realizaron sobre cultivos de maíz.

### 5.1. Resultados experimentales al aplicar el control backstepping propuesto

En esta sección, se presentan los resultados experimentales de los vuelos del cuadricóptero para ambos controladores, los controles del backstepping propuesto en este documento y el controlador PD, esto es para fines de comparación; los vuelos fueron realizados en exteriores. Para seguir una trayectoria dada en el espacio de traslación  $(x, y, z)$  y mantener el espacio de rotación  $(\phi, \theta, \psi)$  alrededor de la referencia, la tarea del cuadricóptero se da en un espacio tridimensional  $(x, y, z)$ , y se describe en tres etapas: La primera es el despegue, en este caso, el despegue se realiza mediante el uso del radio control hasta alcanzar la altura deseada; esta altitud la define el operador. Una vez que el vehículo alcanza la altitud deseada, comienza la segunda etapa; donde el cuadricóptero empieza a seguir una trayectoria aplicando los controladores de backstepping propuestos. La trayectoria de referencia son las ecuaciones paramétricas del círculo dadas por

$$\begin{aligned}x_{ref} &= -5 \cos\left(\frac{\pi}{180}t\right) + 5 \text{ m}, \\y_{ref} &= -5 \sin\left(\frac{\pi}{180}t\right) \text{ m}, \\z_{ref} &= 2 \text{ m}.\end{aligned}$$

Cuando finaliza la trayectoria; empieza la tercera etapa, donde el operador recupera el control del cuadricóptero y lo aterriza, terminando así el vuelo. El periodo de muestreo ( $T$ ) utilizado en la prueba de vuelo presentada en este trabajo es de  $T = 0.01$  s. Los parámetros del cuadricóptero son: masa  $m = 1.3$  kg, la distancia de los motores al centro de gravedad  $l = 0.3$  m, la constante de gravedad  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup> y los momentos de inercia  $I_x = I_y = 0.01567$  kgm<sup>2</sup>,  $I_z = 0.028346$  kgm<sup>2</sup>. Las ganancias de los controladores (3.10), (3.11), (3.19) y (3.27) se muestran en la Tabla 5.1, para encontrarlas; primero se realiza un vuelo con el cuadricóptero, con los datos obtenidos se hace un programa que proponga los valores de las ganancias y con estos valores se calcula el control backstepping propuesto, enseguida se comparan las señales del vuelo con el control propuesto. Si las señales no son iguales se vuelven a proponer otros valores hasta reducir al mínimo la diferencia entre las señales de seguimiento de trayectoria.

Tabla 5.1: Parámetros de los controladores de cada subsistema

Subsistemas			
$\psi$	$z$	$x - \theta$	$y - \varphi$
$k_\varphi = 24.2$	$k_z = 7.39$	$k_5 = 0.1$	$k_1 = 0.4$
$\alpha_7 = 5.7$	$\alpha_6 = 12.3$	$k_6 = 0.13$	$k_2 = 0.27$
$\Delta_1 = 3.2$	$\Delta_2 = 2.5$	$k_7 = 7.3$	$k_3 = 5.3$
		$\Delta_3 = 5$	$\Delta_4 = 2$
		$\alpha_5 = 12$	$\alpha_1 = 0.009$
		$\beta_1 = 0.1$	$\beta_3 = 5.2$
		$\beta_2 = 0.25$	$\beta_4 = 3.64$

Para comparar el comportamiento de los controladores propuestos, se utiliza un controlador PD, el cual se ajusta como se propone en donde las ganancias se obtienen proponiendo los parámetros temporales del máximo sobre impulso y el tiempo de establecimiento. Las condiciones iniciales del proceso en tiempo real están alrededor del origen del marco de referencia del sistema del sistema.

La Figura 5.1 muestra el comportamiento de las posiciones de traslación siguiendo la trayectoria deseada. Estas figuras se dividen en tres subfiguras: la primera representa el desempeño de la trayectoria a lo largo del eje  $x$ , la segunda muestra el seguimiento en el eje  $y$  y en la tercera se muestra la altitud deseada en el eje  $z$ . Como se muestra en la Figura 5.1, donde el sistema está en lazo cerrado con los controladores diseñados, las posiciones traslacionales representadas por la línea azul tienen un buen desempeño con respecto a los valores de referencia (línea roja). La diferencia que hay entre la trayectoria propuesta y la trayectoria real puede explicarse por la precisión del GPS ya que tiene una desviación de 1.4

m. a 1.6 m. El desempeño traslacional del cuadricóptero, se muestra en la Figura 5.2 y en la Figura 5.3; la primera muestra el desplazamiento en un plano tridimensional, mientras que la segunda lo muestra en un plano bidimensional. Estas figuras muestran cómo el sistema sigue la trayectoria deseada en el espacio.

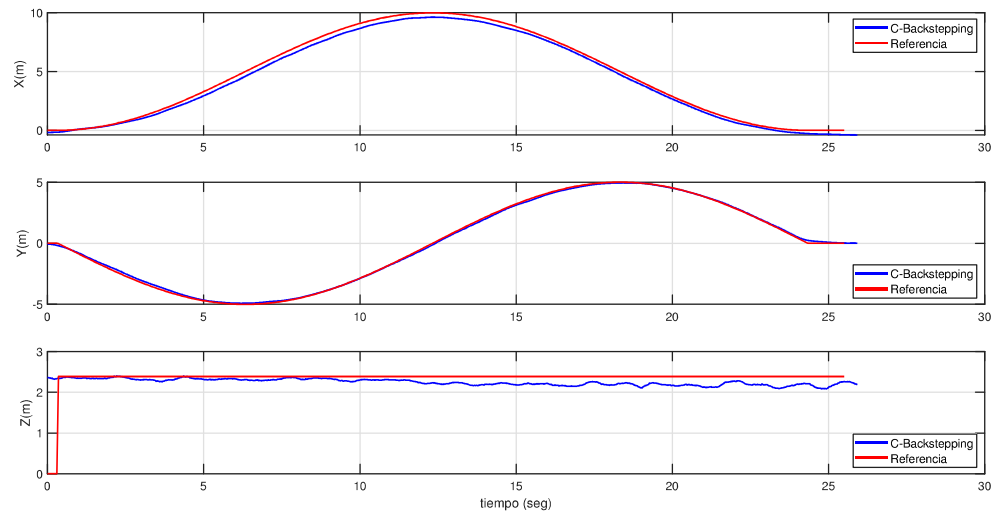


Figura 5.1: Posiciones traslacionales al aplicar los controles del backstepping propuesto.

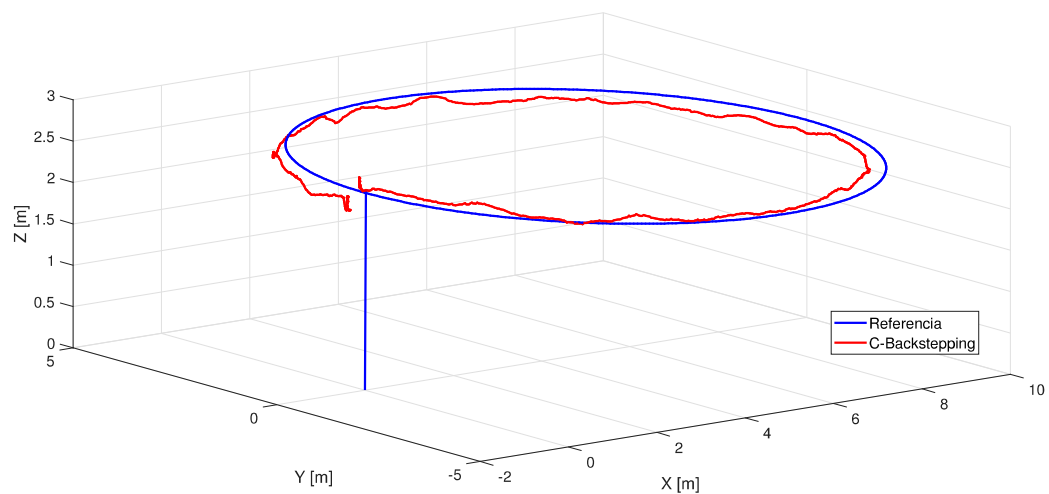


Figura 5.2: Seguimiento de la trayectoria al aplicar los controles del backstepping propuesto; vista en 3D

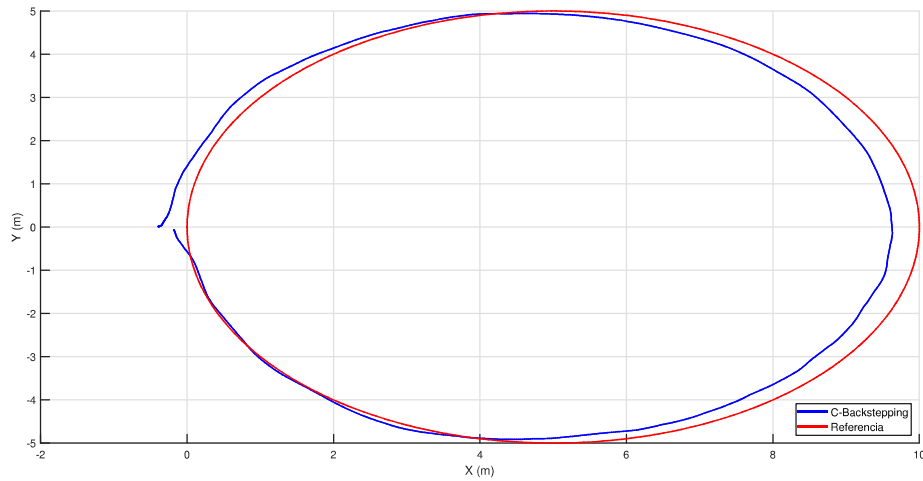


Figura 5.3: Seguimiento de la trayectoria al aplicar los controles del backstepping propuesto; vista en 2D.

La Figura 5.4 muestra los errores durante el seguimiento de la trayectoria. Tenga en cuenta que mientras la referencia cambia en ambos ejes, estas inexactitudes pueden aumentar o disminuir, pero cuando la referencia se vuelve constante, estos errores permanecen cercanos a cero. Adicionalmente, las medidas de las variables traslacionales dadas por el GPS, tienen errores relativamente grandes (de 1.4 m a 1.6 m). Esto explica el error observado en la tarea de desplazamiento de seguimiento de trayectoria.

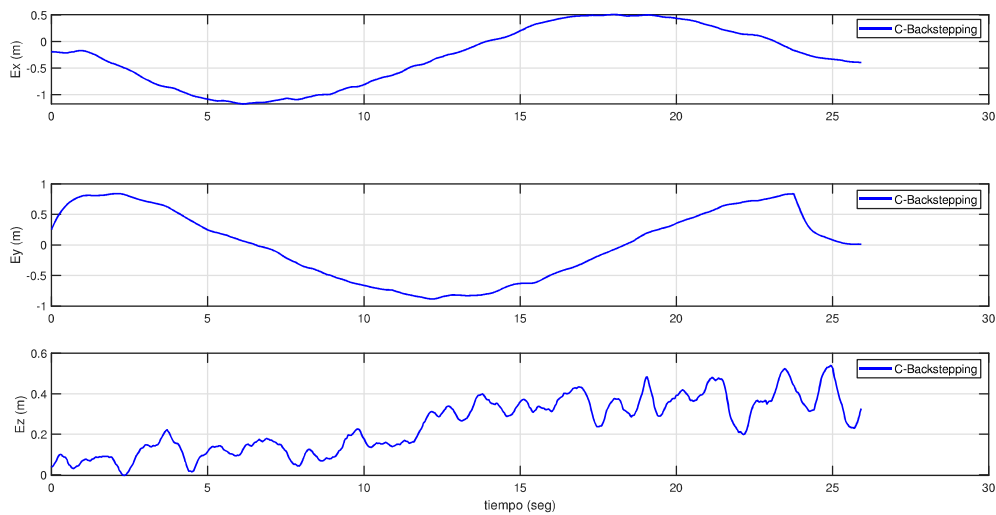


Figura 5.4: Señales del error al aplicar los controles del backstepping propuesto.

Además, las cuatro señales de control para el alabeo, el cabeceo, la altitud y la guiñada, respectivamente, se presentan en la Figura 5.5. Estas entradas de control se obtienen con los controladores backstepping propuestos y se aplican en experimentos reales para el seguimiento de la trayectoria deseada.

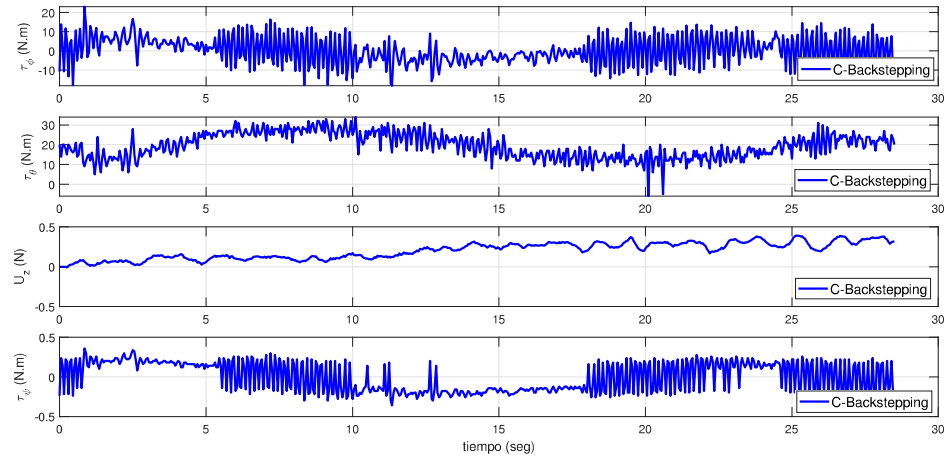


Figura 5.5: Señales de control al aplicar los controles del backstepping propuesto.

La Figura 5.6 muestra el comportamiento de las posiciones traslacionales siguiendo la trayectoria deseada, para controladores PD. Esta Figura se divide en tres subfiguras, que representan el desempeño de la trayectoria a lo largo de  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

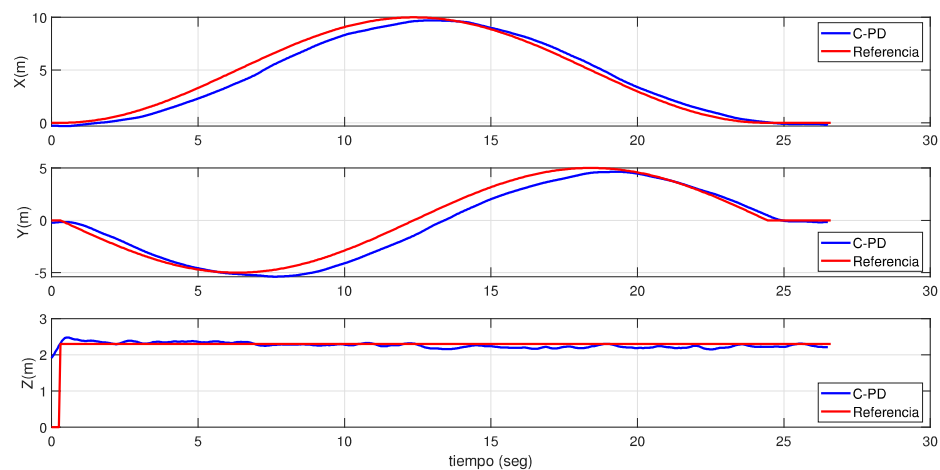


Figura 5.6: Posiciones traslacionales al aplicar los controles del PD.

La Figura 5.7 muestra el desempeño de la trayectoria del dron en un espacio tridimensional, mientras que la figura 5.8 lo muestra en un espacio bidimensional; la Figura 5.9 muestra los errores durante el seguimiento de la trayectoria; las señales de control para los controladores PD se muestran en la Figura 5.10.

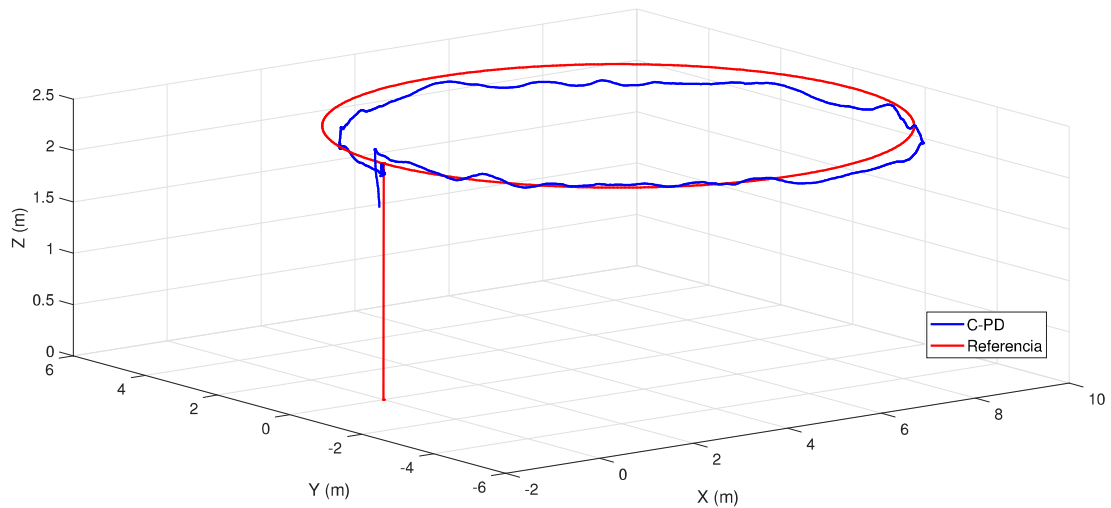


Figura 5.7: Seguimiento de la trayectoria al aplicar los controles del PD; vista en 3D.

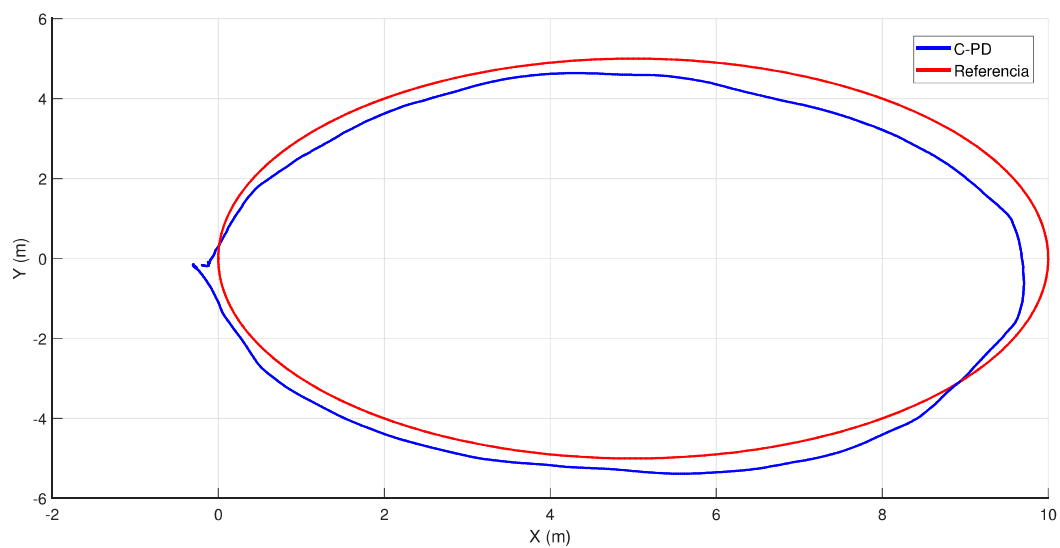


Figura 5.8: Seguimiento de la trayectoria al aplicar los controles del PD; vista en 2D.

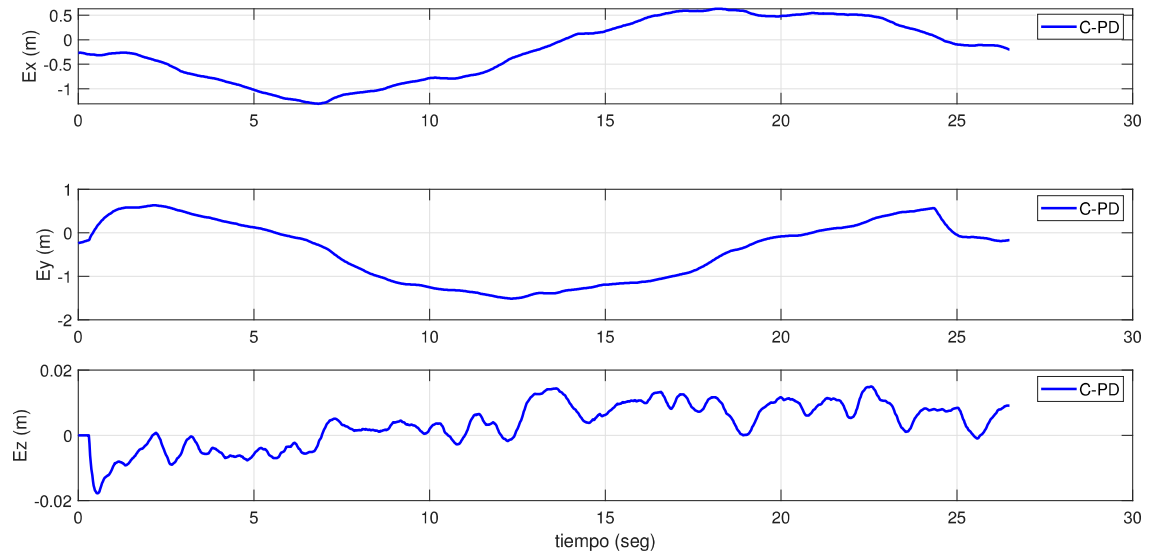


Figura 5.9: Señales del error al aplicar los controles del PD.

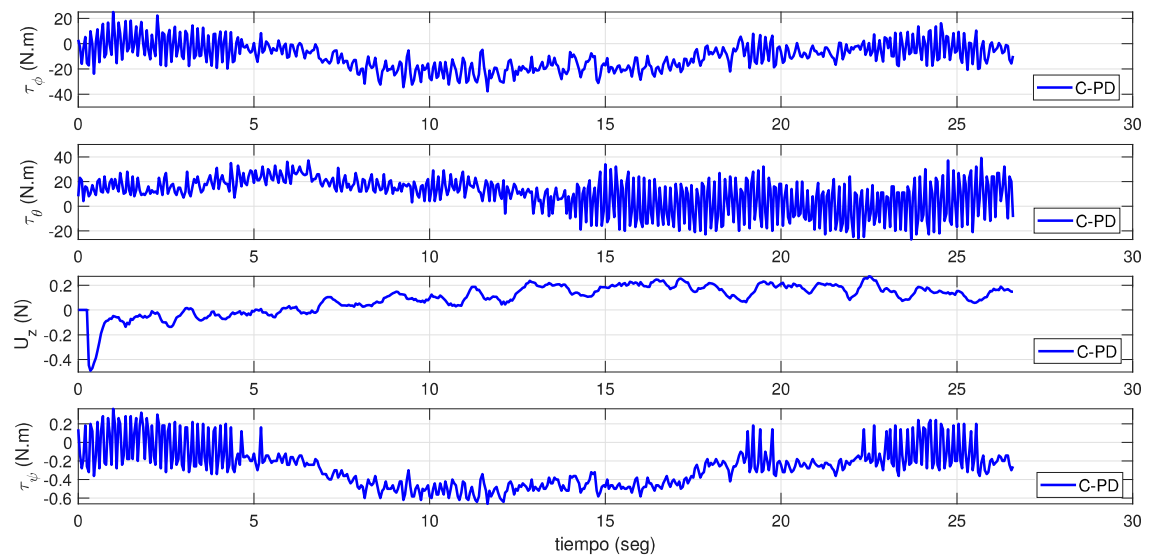


Figura 5.10: Señales de control al aplicar los controles del PD.

Para comparar los desempeños de ambos controladores, se calcula el Error Absoluto Integral (IAE) para el backstepping robusto (BS) y para el PD, estos valores se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Comparación del IAE durante el seguimiento de la trayectoria

Trayectoria circular				
Índice	BS	PD	$\sigma_{BS}$	$\sigma_{PD}$
IAEx	674.0325	732.8948	0.3195	0.6095
IAEy	646.48	849.0646	0.2691	0.6949
IAEz	159.96	85.4140	0.06747	0.0678

Como se muestra en la Tabla 5.2, el controlador backstepping robusto supera al controlador PD en la etapa de seguimiento de la trayectoria del cuadricóptero; aunque con respecto a la altura el PD se comporta mejor. Otro aspecto importante es que se calcularon las desviaciones estándar de los errores para cada desplazamiento traslacional, con la finalidad de observar que tan separados se encuentran los errores de la media aritmética; se observa que los datos están muy cercanos a la medida de tendencia central, las desviaciones estándar para la trayectoria son menores en comparación con los del controlador PD.

Asimismo, la Tabla 5.3 muestra el promedio del valor absoluto integral de la señal de control, definida como

$$J_{control} = \sum_{i=0}^N |control(i)|,$$

donde  $N$  es el número de muestras. El índice  $J_{control}$  es el consumo de energía de los actuadores.

Tabla 5.3: Comparativa de los valores de control absoluto

Seguimiento de trayectoria		
Índice de rendimiento	BS	PD
$J_{\tau_\phi}$	6051.2	6662
$J_{\tau_\theta}$	7337	8661
$J_{u_s}$	519.647	662.5175
$J_{\tau_\psi}$	802.8	848.2

Con los resultados mostrados en la Tabla 5.3 se aprecia que el consumo de energía usando el controlador backstepping robusto es menor que el del control PD. Esto implica, que la señal de control del controlador propuesto es menor que la señal de control del PD.

## **5.2. Comentarios del capítulo**

El problema de seguimiento de la trayectoria del cuadricóptero se aborda mediante el esquema de control robusto sugerido. Los cuatro controladores se sintetizan utilizando el enfoque de backstepping. La convergencia de las variables del cuadricóptero en cuanto a la altitud, traslación y rotación está garantizada cuando el vehículo está sujeto a perturbaciones desvanecientes. En lugar de un controlador de PD basado en un modelo linealizado, el algoritmo de control propuesto logra un mayor rendimiento en lazo cerrado. Los resultados de la experimentación respaldan la última parte de la afirmación.



# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo a futuro

### 6.1. Conclusiones

De este trabajo de investigación se desprenden los siguientes resultados y conclusiones:

1. El controlador propuesto basado en la metodología clásica del backstepping, estabiliza al sistema ante las perturbaciones acopladas acotadas para el seguimiento de trayectorias.
2. Se desarrollaron simulaciones numéricas antes de implementar el control propuesto en el cuadricóptero; estas se realizaron para el seguimiento de diferentes trayectorias (circunferencia, lemniscata, lissajous y deltoide); el algoritmo mostró controlar al cuadricóptero de manera adecuada y esto se aprecia al analizar los IAE y las desviaciones estándar del error (ver Apéndice A).
3. Se implementó el sistema de visión para la detección de la enfermedad mancha de asfalto en el cuadricóptero, sin la necesidad de agregar un estabilizador de cámara, ni de software adicional para el procesamiento de las imágenes.
4. Se obtuvieron resultados experimentales en exteriores; los cuatro controladores se sintetizan utilizando la metodología de backstepping propuesta en este proyecto de investigación. La convergencia de las variables del cuadricóptero en cuanto a la altitud, traslación y rotación está garantizada cuando el vehículo está sujeto a perturbaciones desvanecientes. En lugar de un controlador de PD basado en un modelo linealizado, el algoritmo de control propuesto logra un mejor rendimiento en lazo cerrado. Los resultados de la experimentación respaldan la última parte de la afirmación.
5. Se hizo una estancia en el Municipio de Chinameca, Veracruz, del 1 al 3 de julio del 2022 (<https://fb.watch/e1yBQHdzLA/>). y se realizaron vuelos en sembradíos de maíz (<https://youtube.com/playlist?list=PLTRz4N9RD9p9ozyor-GCCCyxnFS4-L1cr>).

6. El procesamiento de las imágenes se realizó aplicando diferentes métodos de segmentación de imágenes; logrando detectar indicios de la enfermedad mancha de asfalto en las hojas del maíz; el algoritmo de segmentación CIE-Lab es el que tuvo un mejor desempeño.
7. Se construyó la plataforma experimental del cuadricóptero para obtener los resultados experimentales; previamente, se seleccionaron los componentes necesarios para cumplir con el seguimiento de la trayectoria. Se obtiene el precio de cuadricóptero el cual es de \$23,982.60 MN que es el 12 % del precio del dron comercial para agricultura de precisión [16].

## 6.2. Trabajo a futuro

En este proyecto de investigación se realizaron vuelos sobre los sembradíos de maíz para la detección de la enfermedad mancha de asfalto siguiendo una trayectoria predefinida; obteniendo resultados para la detección de las hojas secas e indicios de la enfermedad en diferentes fotografías; estos representan el preámbulo para la detección de la enfermedad ya que al secarse las hojas es un indicio de que puede estar presente la enfermedad en el sembradío. Por tal motivo, el trabajo futuro está abierto, siguiendo como pauta los resultados presentados se proponen lo siguiente

- Una vez detectada la enfermedad, poder dar el punto de localización en el sembradío de donde se encuentran las plantas que presentan la enfermedad.
- Realizar un análisis estadístico para comparar los métodos de segmentación y seleccionar el idóneo.
- Implementar en vuelos en exteriores el seguimiento de diferentes trayectorias.
- Desarrollar un sistema de vuelo completamente autónomo para el monitoreo de cultivos.
- Realizar la detección de la enfermedad en tiempo real, mientras se realiza el vuelo sobre el sembradío.

# Bibliografía

- [1] O. García, P. Ordaz, O.-J. Santos-Sánchez, S. Salazar, and R. Lozano. Backstepping and robust control for a quadrotor in outdoors environments: An experimental approach. *IEEE Access*, 7(1):40636, February 2019.
- [2] Konica Minolta. Medición de color de una fuente de luz. Sensing Americas, Jan 2021. Accedido 18-08-2021.
- [3] W. Urueña, J. Cortes, and J. Vargas. Técnicas alternativas para la conversión de imágenes a color a escala de grises en el tratamiento digital de imágenes. *Scientia et Technica*, 1(47), Abril 2011.
- [4] Beatrizxe. La teoría del color. beatrizxe.com, Oct 2021. Accedido 22-11-2021.
- [5] Konica Minolta. Entendiendo el espacio de color cie-lab. Sensing Americas, Feb 2021. Accedido 25-03-2021.
- [6] Ardupilot. ardupilot.org. <https://ardupilot.org/copter/docs/>, Jan 2019. Accedido 30-01-2020.
- [7] McCormick Power Technology. Todos los datos sobre la producción del maíz en el mundo. <https://mccormick.it/mx>, May 2020. Accedido 14-12-2021.
- [8] Secretaría de Agricultura. Maíz el cultivo de México. url:<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-el-cultivo-de-mexico?idiom=es>, 2020. Accedido 10-05-2021.
- [9] Intagri. El complejo de la mancha de asfalto en el cultivo de maíz. Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura, Jan 2020. Accedido 15-02-2020.
- [10] CIMMYT. *Enfermedades del maíz: una guía para su identificación en el campo*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 4 edition, 2004. Accedido 11-05-2021.
- [11] S. Sindhuja, A. Mishra, R. Ehsani, and C. Davis. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Comput. Electron. Agric.*, 72:1–13, 2010.

- [12] M. Mirik, D.C. Jones, J.A. Price, F. Workneh, R.J. Ansley, and C.M. Rush. Satellite remote sensing of wheat infected by wheat streak mosaic virus. *Plant Dis*, 1(95):4–12, 2011.
- [13] L. Han, M. Salman-Haleem, and M. Taylor. Automatic detection and severity assessment of crop. diseases using image pattern recognition. *Springer International Publishing: Cham, Switzerland*, 2016.
- [14] M. Borengasser, W.S. Hungate, and R. Watkins. *Hyperspectral Remote Sensing: Principles and Applications*. CRC Press, Florida, USA, 2008.
- [15] Parrot Sequoia. Parrot sequoia+ multispectral sensor. [www.dronenerds.com](http://www.dronenerds.com), May 2021.
- [16] P4 Multispectral. godron.mx. <https://tienda.godron.mx>, May 2022.
- [17] C.H. Bock, G.H. Poole, P.E. Parker, and T.R. Gottwald. Plant disease severity estimated visually, by digital photography and image analysis, and by hyperspectral imaging. *Critical Reviews in Plant sciences*, 29(2):59–107, March 2010.
- [18] J.H. Lenthe, E.-C. Oerke, and H.-W. Dehne. Digital infrared thermography for monitoring canopy health of wheat. *Precision Agriculture*, 8:15–26, March 2007.
- [19] H.G. Jones, M. Stoll, T. Santos, and C. Sousa. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53(378):2249–2260, November 2002.
- [20] A.K. Mahlein. Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2):241–251, February 2016.
- [21] P.J. Zarco-Tejada, J.A.J. Berni, and L. Suarez. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 113(6):1262–1275, June 2009.
- [22] S. Cogliati, M. Rossini, and M. Meroni. Continuous and long-term measurements of reflectance and sun-induced chlorophyll fluorescence by using novel automated field spectroscopy systems. *Remote Sensing of Environment*, 164(6):270–281, July 2015.
- [23] T. Adao, J. Hruska, L. Padua, J. Bessa, and E. Perez. Hyperspectral imaging: A review on uav-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sensing*, 9(110):1–30, October 2017.

- [24] T. Hilker, N.C. Coops, M.A. Wulder, T.A. Black, and R.D. Guy. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. *Science of The Total Environment*, 404(2-3):411–423, October 2008.
- [25] E. Boegh, H. Dpegaard, N. Broge, N.O. Jensen, K. Schelde, and A. Thomsen. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Enviroment*, 81(2-3):179–193, October 2002.
- [26] A. Zeggada, F. Melgani, and Y. Bazi. A deep learning approach to uav image multilabeling. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 14(1):694–698, 2017.
- [27] Y. Chen, Z. Lin, X. Zhao, G. Wang, and Y. Gu. Deep learning-based classification of hyperspectral data. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 7(1):2094–2107, 2014.
- [28] Iris Automation. Precision agriculture. url:<https://www.irisonboard.com>, 2020. Accedido 10-05-2021.
- [29] Wingtra Develops. Applications in agriculture. url:<https://wingtra.com/drone-mapping-applications/use-of-drones-in-agriculture/>, 2020. Accedido 10-05-2021.
- [30] DJI. P4 multiespectral. url:<https://www.dji.com/mx/p4-multispectral>, 2022. Accedido 23-09-2022.
- [31] Rededge-mx. Micasense, rededge.mx. [www.micasense.com](http://www.micasense.com), May 2021.
- [32] H. L. N. N. Thanh and S. K. Hong. Quadcopter robust adaptive second order sliding mode control based on PID sliding surface. *IEEE Access*, 6:66850–66860, October 2018.
- [33] G. Ononiwu, O. Onojo, O. Ozioko, and O. Nosiri. Quadcopter design for payload delivery. *Journal of Computer and Communications*, 4(10):1–12, 2016.
- [34] V. Duggal, M. Sukhwani, K. Bipin, G. Syamasundar Reddy, and K. Madhava Krishna. Plantation monitoring and yield estimation using autonomous quadcopter for precision agriculture. In *2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, pages 5121–5127, 2016.
- [35] U. R. Mogili and B.B.V.L. Deepak. Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 133:502–509, 2018.

- [36] E. Kuantama, R. Tarca, S. Dzitac, I. Dzitac, T. Vesselenyi, and I Tarca. The design and experimental development of air scanning using a sniffer quadcopter. *Sensors*, 19(18):3849, 2019.
- [37] K. Rudin, H. Minh-Duc, G. Ducard, and S. Bouabdallah. A robust attitude controller and its application to quadrotor helicopters. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1):10379–10384, 2011.
- [38] H. Ramirez-Rodriguez, V. Parra-Vega, A. Sanchez-Orta, and O. Garcia-Salazar. Robust backstepping control based on integral sliding modes for tracking of quadrotors. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 73(1):55–66, 2014.
- [39] C. Peng, Y. Bai, X. Gong, Q. Gao, C. Zhao, and Y. Tian. Modeling and robust backstepping sliding mode control with adaptive rbfnn for a novel coaxial eight-rotor UAV. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2(1):56–64, 2015.
- [40] J.D. Colorado, N. Cera-Bornacelli, J.S. Caldas, E. Petro, M.C. Rebolledo, D. Cuellar, F. Calderon, I.F. Mondragon, and A. Jaramillo-Botero. Estimation of nitrogen in rice crops from UAV-captured images. *Remote Sensing*, 12(20):3396, 2020.
- [41] A. Aboudonia, A. El-Badawy, and R. Rashad. Active anti-disturbance control of a quadrotor unmanned aerial vehicle using the command-filtering backstepping approach. *Nonlinear Dynamics*, 90(1):581–597, 2017.
- [42] J. Zhang, D. Gu, C. Deng, and B. Wen. Robust and adaptive backstepping control for hexacopter UAVs. *IEEE Access*, 7:163502–163514, 2019.
- [43] N. Xuan-Mung, S. Kyung-Hong, N.P. Nguyen, L.N.N. Thanh, and L. Tien-Loc. Autonomous quadcopter precision landing onto a heaving platform: New method and experiment. *IEEE Access*, 8:167192–167202, 2020.
- [44] S.H. Derrouaoui, Y. Bouzid, and M. Guiatni. Nonlinear robust control of a new reconfigurable unmanned aerial vehicle. *Robotics*, 10(2):76, 2021.
- [45] G.A.P. de Morais, L.B. Marcos, J.N.A.D. Bueno, N.F. de Resende, M.H. Terra, and V. Grassi Jr. Vision-based robust control framework based on deep reinforcement learning applied to autonomous ground vehicles. *Control Engineering Practice*, 104:104630, 2020.
- [46] L. Mejias, J.-P. Diguët, C. Dezan, D. Campbell, J. Kok, and G. Coppin. Embedded computation architectures for autonomy in Unmanned Aircraft Systems ( UAS). *Sensors*, 21(4):1115, 2021.

- [47] H.-A. López-Labra, O.-J. Santos-Sánchez, L. Rodríguez-Guerrero, J.-P. Ordaz-Oliver, and C. Cuvas-Castillo. Experimental results of optimal and robust control for uncertain linear time-delay systems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 181(3):1076–1089, 2019.
- [48] U. Mahajan and B Raj-Bundel. Drones for normalizaed difference vegetation index (ndvi), to estimate crop health for precision agriculture: A cheaper alternative for spatial satellite sensors. *International Conference on Innovative Research in Agriculture, Food Science, Forestry, Horticulture, Aquaculture, Animal Sciences, Biodiversity, Ecological Sciences and Climate Change (AFHABEC-2016)*, pages 38–41, 2016.
- [49] R. Lozano. *Unmanned Aerial Vehicles: Embedded Control*. Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [50] S. Bouabdallah and R. Siegwart. Full control of a quadrotor. *In Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 153–158, 2007.
- [51] J. Svacha, K. Mohta, and V. Kumar. Improving quadrotor trajectory tracking by compensating for aerodynamic effects. *In Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 860–866, 2017.
- [52] H.K. Khalil. *Nonlinear Systems*, volume 2. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1996.
- [53] INAOEP. Chapter 1 ¿qué es la luz? Óptica en el INAOEP, Nov 2021. Accedido 9-11-2021.
- [54] J. Chaki and N. Dey. *Image Color Feature Extraction Techniques*. Springer, 2021.
- [55] C. Fernandez-Maloigne, editor. *Advanced Color Image Processing and Analysis*. Springer, 2013.
- [56] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, and S.L. Eddins. *Digital Image Processing using Matlab*. Gatesmark Publishing, 2009.
- [57] J. Tornquist. *Color y Luz: Teoría y Practica*. Gustavo Gili, 2008.
- [58] A. Koschan and M. Abidi. *Digital Color Image Processing*. Wiley-Interscience, 2008.
- [59] J. Star. *Introduction to Image Processing*. Byte, USA, 1995.
- [60] R.C. Gonzalez and R.E. Woods. *Digital Image Processing*. Pearson, 2008.

- 
- [61] P. Guzmán, E. Gomez, and C. Rivillas. Utilización del procesamiento de imágenes para determinar la severidad de la mancha de hierro del cafeto, en hojas de café. *Cenicafé*, 3(54):258–265, November 2003.
- [62] S. Patil and B. Shrikant. Leaf disease severity measurement using image processing. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(1):297–301, November 2011.
- [63] J. Hock, J. Kranz, and B.L. Renfro. Studies on the epidemiology of the tar spot disease complex of maize in Mexico. *Plant Pathology*, 44(3):490–502, 1995.
- [64] O. Santos, H. Romero, S. Salazar, O. García-Pérez, and R. Lozano. Optimized discrete control law for quadrotor stabilization: Experimental results. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 84(1):67–81, March 2016.

# Apéndice A

## Simulación de los controladores

En este apéndice se realizan las simulaciones del sistema para analizar la estabilidad del cuadricóptero al aplicar el control robusto backstepping propuesto. El diagrama de bloques de la Figura A.1 representa de forma simplificada al sistema en lazo cerrado.

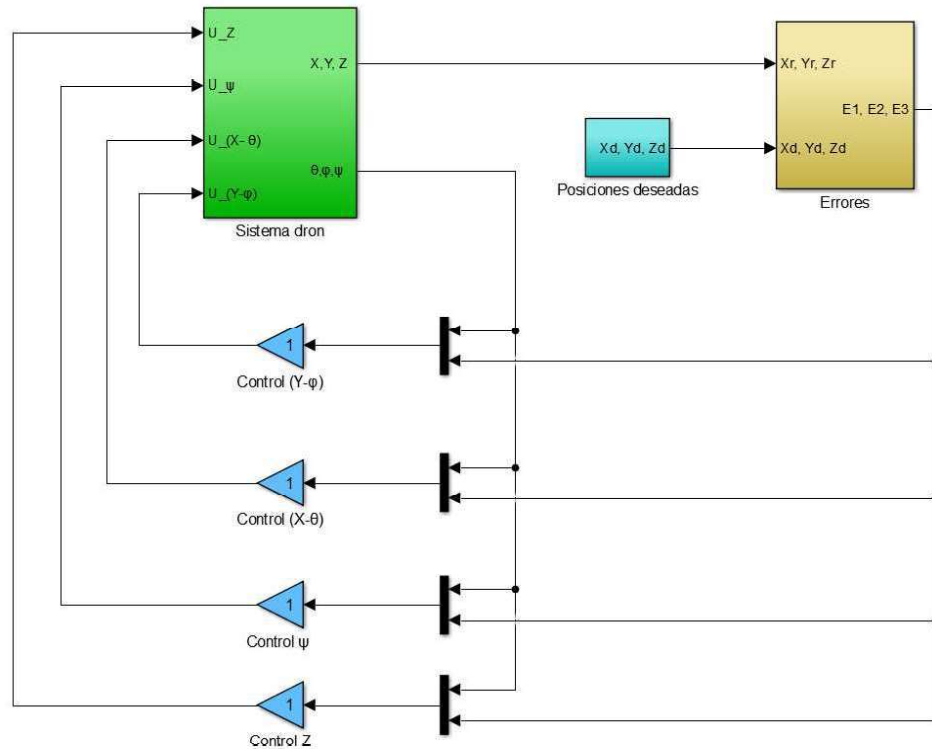


Figura A.1: Diagrama de simulación del sistema en lazo cerrado

## A.1. Resultados de simulación

A continuación se presentan las simulaciones del sistema realizadas en Matlab-Simulink y se utiliza el solucionador numérico ode45 basado en el método Dormand-Prince, el tiempo de muestreo es de 0.01 segundos. Para obtener los resultados de las simulaciones del seguimiento de trayectorias del cuadricóptero se aplicó el enfoque del backstepping propuesto en esta tesis. Las trayectorias se dan en un espacio tridimensional; Se propusieron diferentes trayectorias, tales como circulares, lemniscatas, lissajous y deltoides. Para estas simulaciones, los parámetros del sistema del cuadricóptero son: la masa  $m = 0.8$  kg, la distancia desde los motores al centro de gravedad  $l = 0.3$  m, constante de gravedad  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup> y los momentos de inercia son  $I_x = I_y = 0.01567$  kgm<sup>2</sup>  $I_z = 0.028346$  kgm<sup>2</sup>; dichos momentos de inercia se obtuvieron mediante el diseño en CAD del cuadricóptero en el software Solidworks. Para comparar el desempeño del control propuesto, se utiliza un controlador PD para cada subsistema del cuadricóptero; el controlador de PD se sintoniza mediante el uso de los parámetros temporales como el máximo sobreimpulso y tiempo de establecimiento en lazo cerrado, como se propone en Las trayectorias a seguir son una circunferencia, la curva lemniscata, la curva Lissajous y la curva Deltoide.

Antes de empezar a realizar las simulaciones en el sistema, se deben proponer y probar valores para las constantes de los controladores en el sistema para ver si estabilizan el sistema (Tablas A.1 y A.2). Cabe mencionar, que en todas las trayectorias el cuadricóptero está sometido a una perturbación; en este caso, la perturbación es una onda sinusoidal con una amplitud de  $\pm 1$  y una frecuencia de 1 rad/s. Estos parámetros se propusieron son los máximos valores que pudieron ajustarse de manera heurística, tal que el desempeño en lazo cerrado sea satisfactorio; la única premisa es que todos los parámetros sean definidos positivos; por tal motivo se tienen diferentes ganancias para las diferentes trayectorias.

Tabla A.1: Parámetros del controlador para las curvas de la circunferencia y la lemniscata

Subsistemas			
$\psi$	$z$	$x - \theta$	$y - \varphi$
$k_\varphi = 67.2$	$k_z = 1$	$k_5 = 0.152$	$k_1 = 0.4$
$\alpha_7 = 12.5$	$\alpha_6 = 15.8$	$k_6 = 0.25$	$k_2 = 0.6$
$\Delta_1 = 35.4$	$\Delta_2 = 3.2$	$k_7 = 1.2$	$k_3 = 0.5$
		$\Delta_3 = 27$	$\Delta_4 = 35.4$
		$\alpha_5 = 0.26$	$\alpha_1 = 1.5$
		$\beta_1 = 0.4$	$\beta_3 = 0.8$
		$\beta_2 = 0.6$	$\beta_4 = 0.5$

Tabla A.2: Parámetros del controlador para las curvas Lissajous y Deltoide

Subsistemas			
$\psi$	$z$	$x - \theta$	$y - \varphi$
$k_\varphi = 67.2$	$k_z = 1$	$k_5 = 0.152$	$k_1 = 0.4$
$\alpha_7 = 12.5$	$\alpha_6 = 15.8$	$k_6 = 0.25$	$k_2 = 0.6$
$\Delta_1 = 35.4$	$\Delta_2 = 3.2$	$k_7 = 1.2$	$k_3 = 0.5$
		$\Delta_3 = 27$	$\Delta_4 = 35.4$
		$\alpha_5 = 0.5$	$\alpha_1 = 1.1$
		$\beta_1 = 0.4$	$\beta_3 = 0.8$
		$\beta_2 = 0.6$	$\beta_4 = 0.5$

Para la primera trayectoria, se usan las ecuaciones paramétricas de la circunferencia dadas por

$$\begin{aligned}
 x_{ref} &= -10 \cos\left(\frac{\pi}{180}t\right) \text{ m,} \\
 y_{ref} &= -10 \sin\left(\frac{\pi}{180}t\right) \text{ m,} \\
 z_{ref} &= 2 \text{ m.}
 \end{aligned}$$

Las Figuras A.2-A.5 muestran el comportamiento del sistema ante el seguimiento de una trayectoria circular;

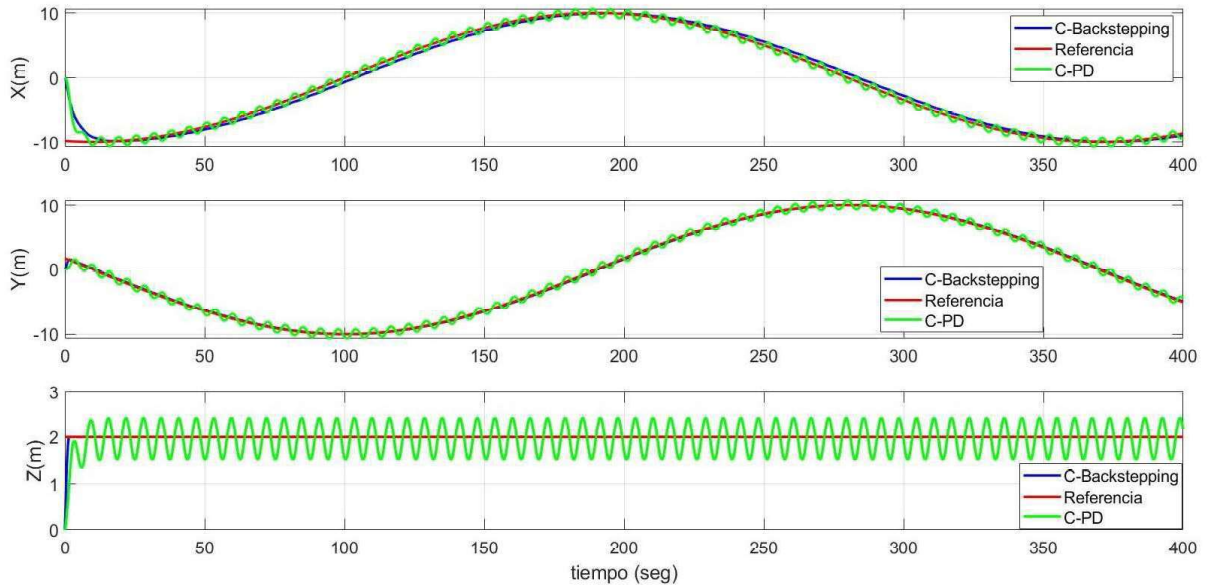


Figura A.2: Posiciones traslacionales al aplicar los controladores; circunferencia

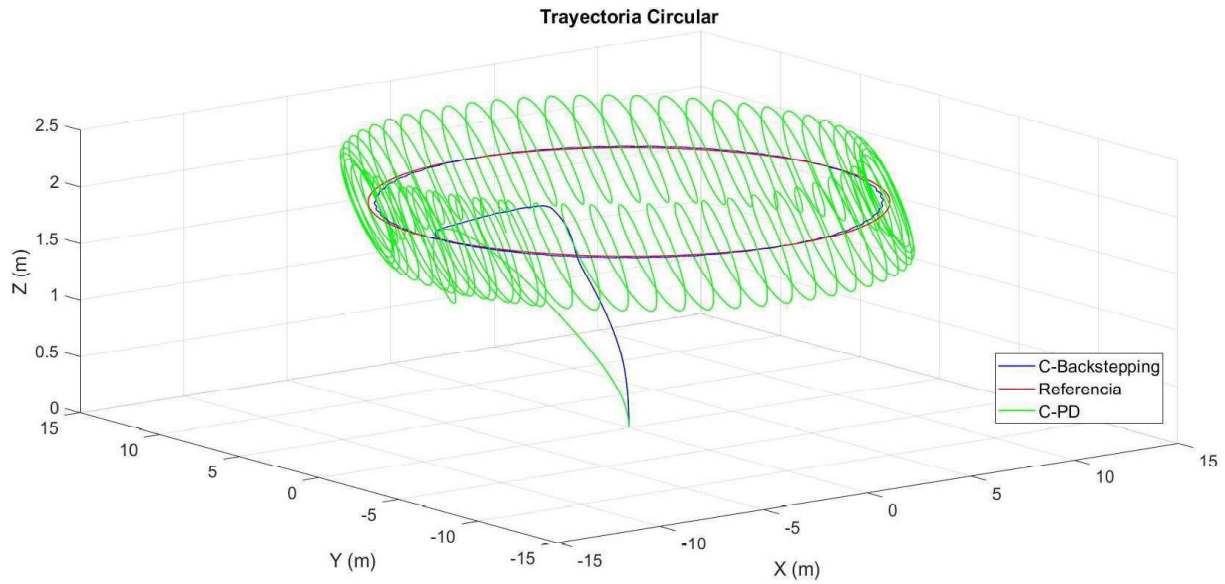


Figura A.3: Seguimiento de trayectoria de la circunferencia

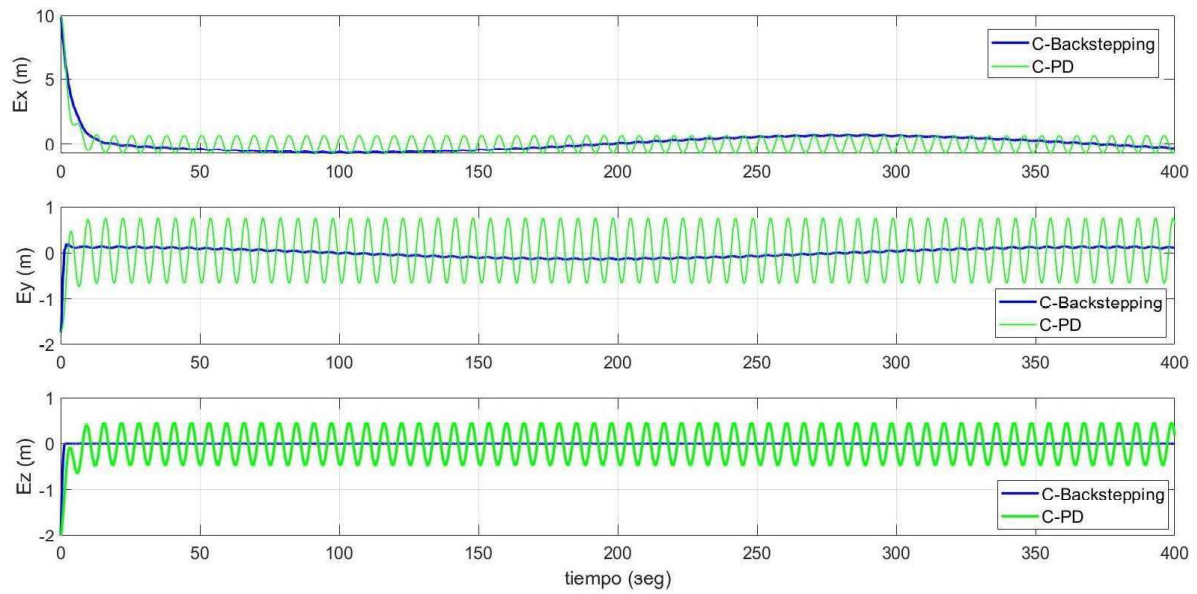


Figura A.4: Señales de error; circunferencia

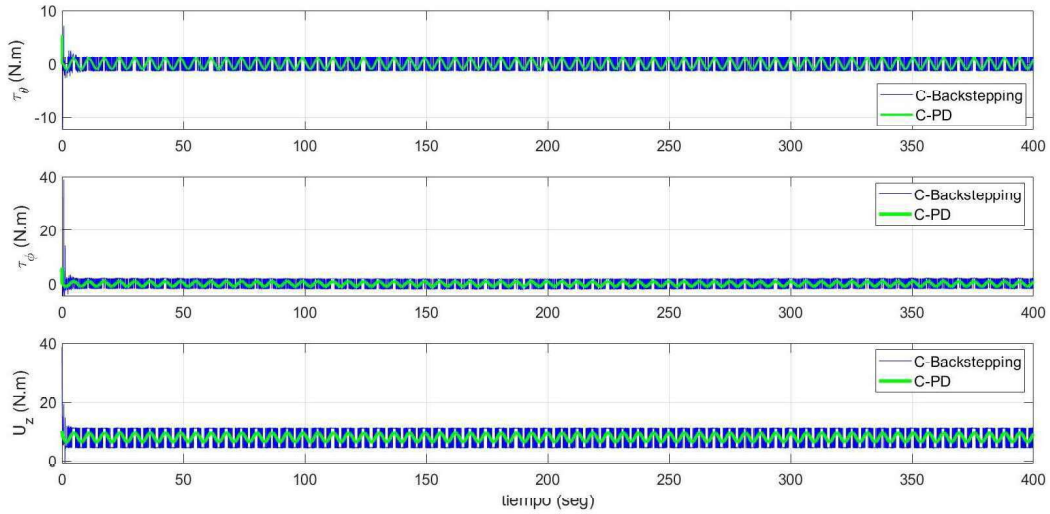


Figura A.5: Señales de control, control backstepping propuesto vs PD; circunferencia

La Figura A.2 muestra las posiciones de traslación del VANT para cada trayectoria. Estas figuras se dividen en tres subfiguras: la primera representa el desempeño de la trayectoria a lo largo de la "X"; la segunda muestra el funcionamiento del cuadricóptero en el eje "Y"; finalmente, el comportamiento de la altitud se muestra en la última subfigura. La línea roja representa la trayectoria de referencia, las posiciones de traslación para los controladores son la línea azul y la línea verde; la línea verde representa el comportamiento con el controlador PD, mientras que la línea azul muestra el comportamiento del VANT con el controlador propuesto en esta tesis. Observando las gráficas de traslación el control propuesto tiene un buen desempeño con respecto a los valores de referencia. El desempeño que tienen los controladores para el seguimiento de las diferentes trayectorias del VANT se presenta en la Figura A.3 está muestra como el sistema se comporta para seguir a la trayectoria. En la Figura A.4 se muestran los errores que se tiene el cuadricóptero para seguir a la trayectoria deseada. Por último, en la Figura A.5 se presentan los controles aplicados.

La segunda trayectoria a seguir es una lemniscata cuyas ecuaciones paramétricas son

$$\begin{aligned}
 x_{ref} &= \frac{-10 \cos\left(\frac{\pi}{180}t\right)}{1 + \sin^2\left(\frac{\pi}{180}t\right)} \text{ m}, \\
 y_{ref} &= \frac{-10 \sin\left(\frac{\pi}{180}t\right) \cos\left(\frac{\pi}{180}t\right)}{1 + \sin^2\left(\frac{\pi}{180}t\right)} \text{ m}, \\
 z_{ref} &= 2 \text{ m}.
 \end{aligned}$$

Las Figuras A.6-A.9 presentan el desempeño del cuadricóptero ante la referencia de la curva lemniscata;

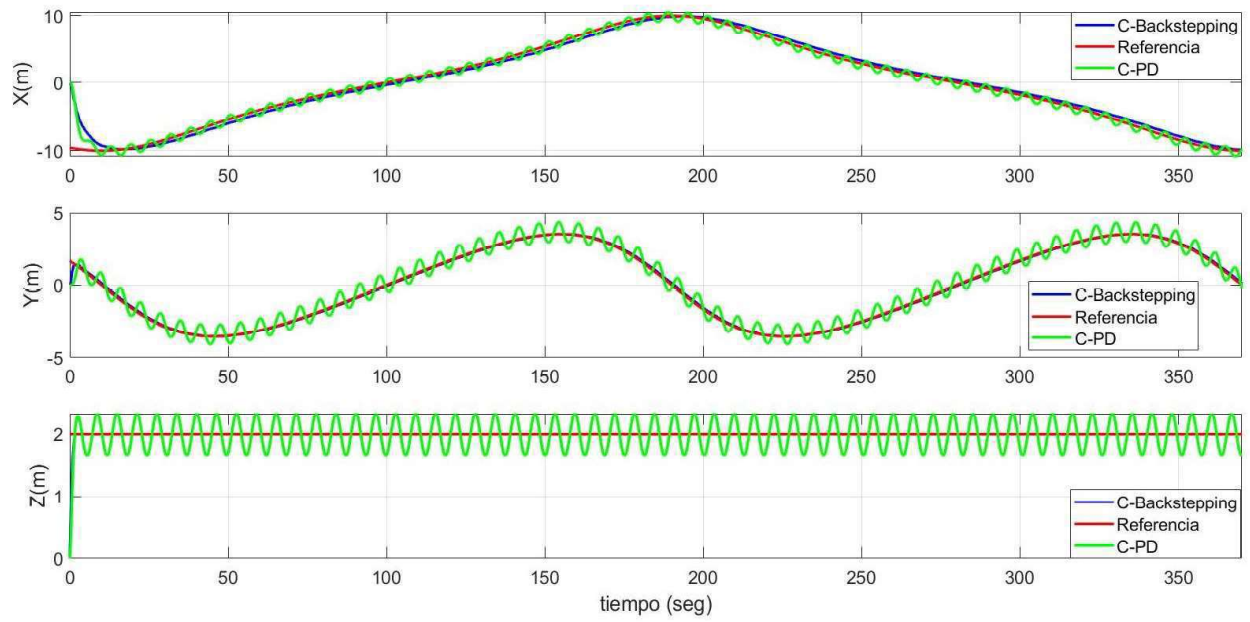


Figura A.6: Posiciones traslacionales al aplicar los controladores; lemniscata

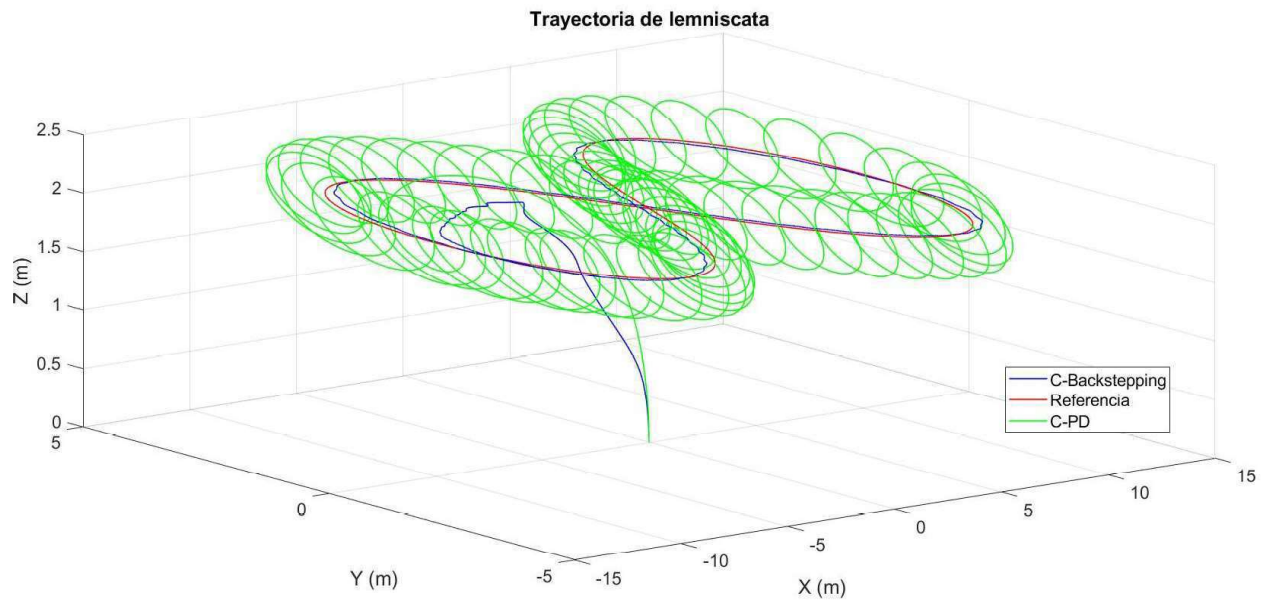


Figura A.7: Seguimiento de trayectoria de la curva lemniscata

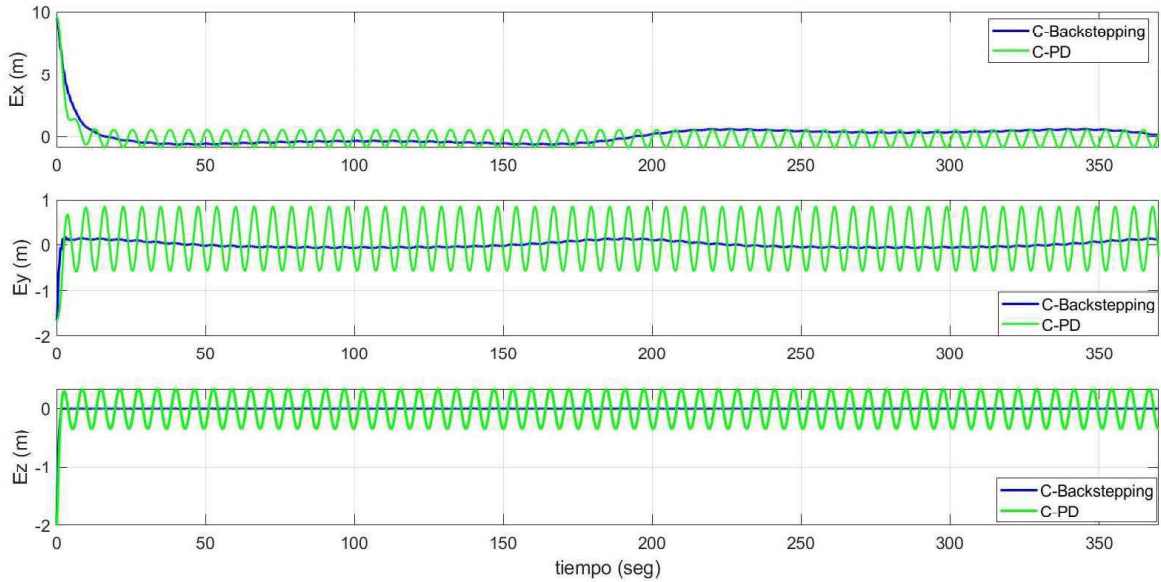


Figura A.8: Señales de error; lemniscata

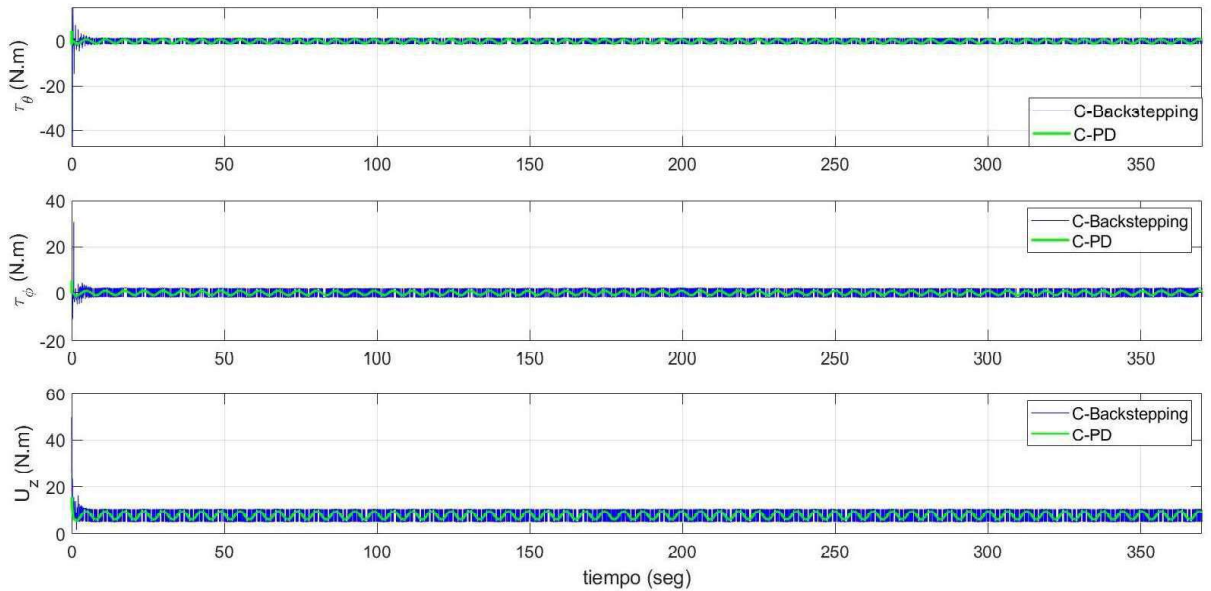


Figura A.9: Señales de control, control backstepping propuesto vs PD; lemniscata

La Figura A.6 muestra las posiciones de traslación del VANT para cada trayectoria. Estas figuras se dividen en tres subfiguras: la primera representa el desempeño de la trayectoria a lo largo del eje "X"; la segunda muestra el funcionamiento del cuadricóptero en el eje "Y"; finalmente, el comportamiento de la altitud se muestra en la última subfigura. La línea roja

representa la trayectoria de referencia, las posiciones de traslación para los controladores son la línea azul y la línea verde; la línea verde representa el comportamiento con el PD, mientras que la línea azul muestra el comportamiento del VANT con el controlador propuesto en esta tesis. Observando las gráficas de traslación el control propuesto tiene un buen desempeño con respecto a los valores de referencia.

El desempeño que tienen los controladores para el seguimiento de las diferentes trayectorias del VANT se presenta en la Figura A.7 está demuestra como el sistema se comporta para seguir a la trayectoria. En la Figura A.8 se observan los errores que se tiene el cuadricóptero para seguir a la trayectoria deseada. Por último, en la Figura A.9 se presenta los controles aplicados.

La tercera trayectoria es de una curva lissajous; a continuación se presentan las ecuaciones paramétricas que la describen

$$\begin{aligned}x_{ref} &= -10 \sin\left(\frac{\pi}{180}(2t)\right) \text{ m}, \\y_{ref} &= -10 \sin\left(\frac{\pi}{180}(3t)\right) \text{ m}, \\z_{ref} &= 2 \text{ m}.\end{aligned}$$

Las Figuras de A.10 a A.13 enseñan el comportamiento del VANT para seguir a la trayectoria de la curva lissajous.

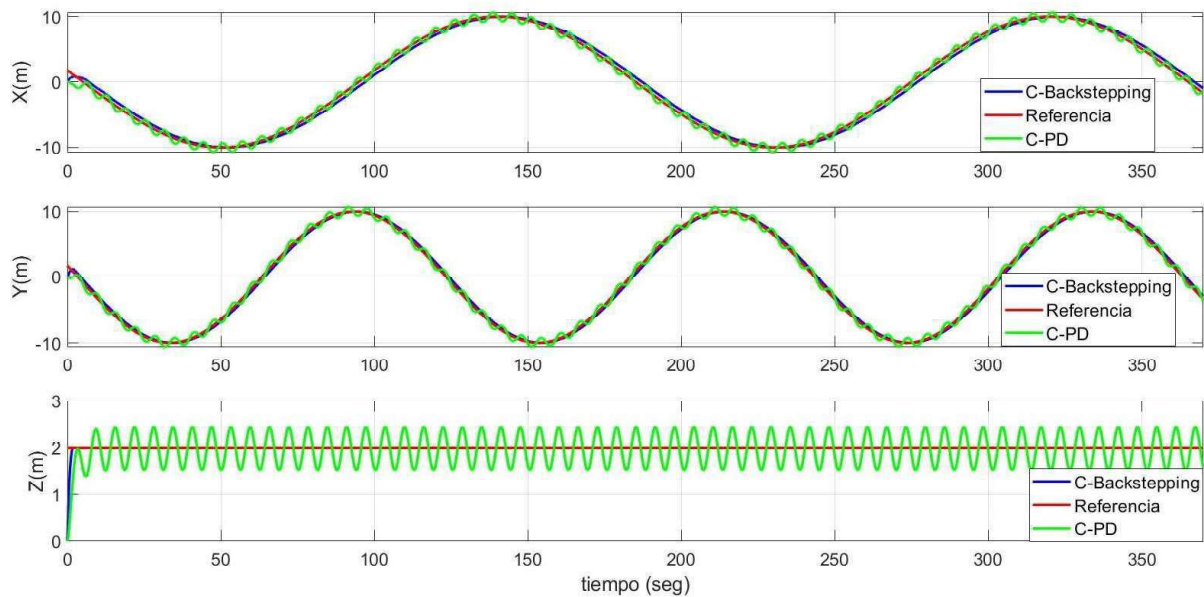


Figura A.10: Posiciones traslacionales al aplicar los controladores; lissajous

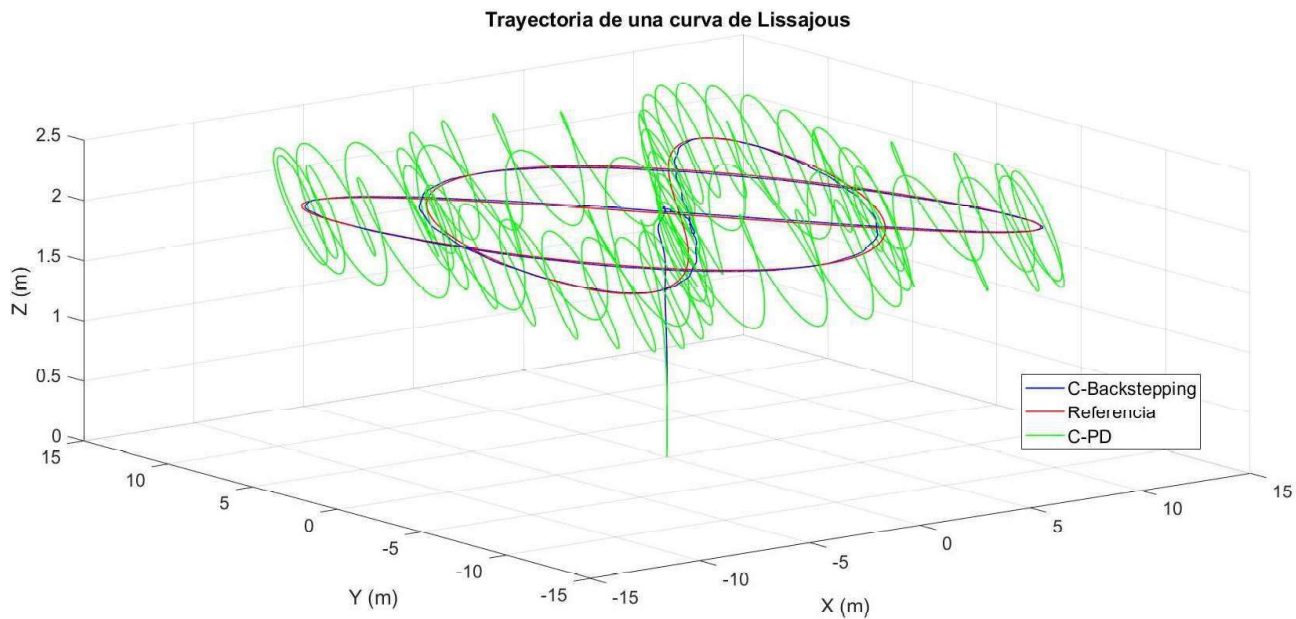


Figura A.11: Seguimiento de trayectoria de la curva Lissajous

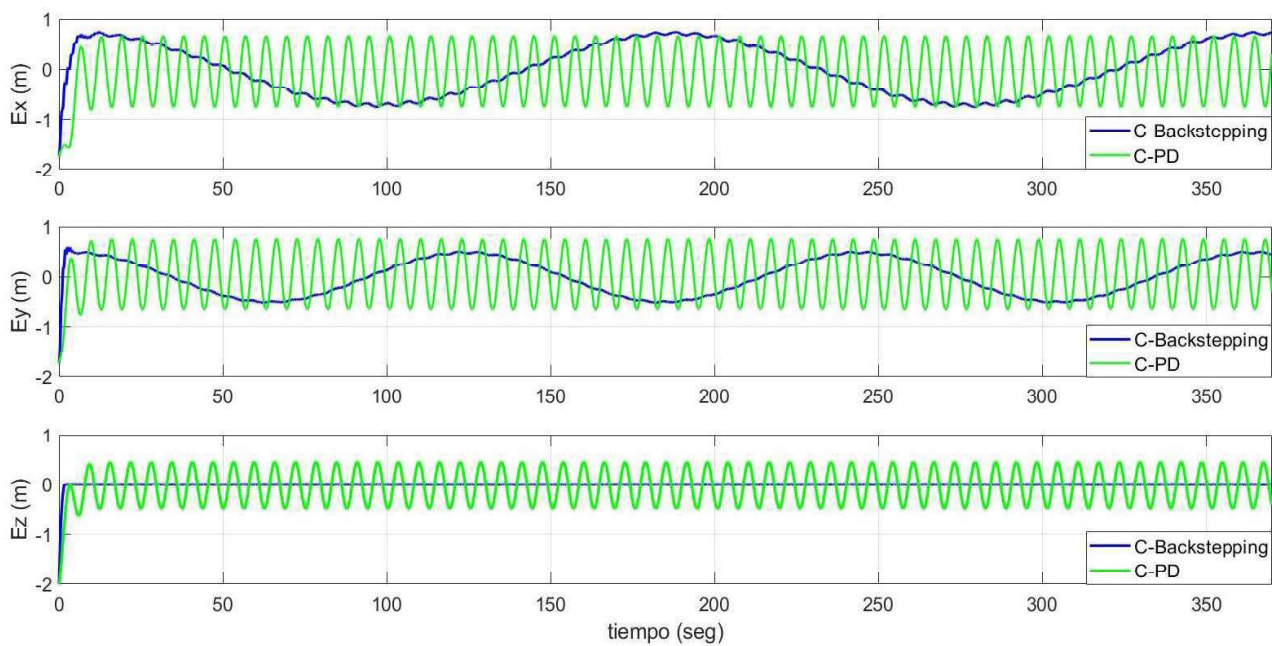


Figura A.12: Señales de error; lissajous

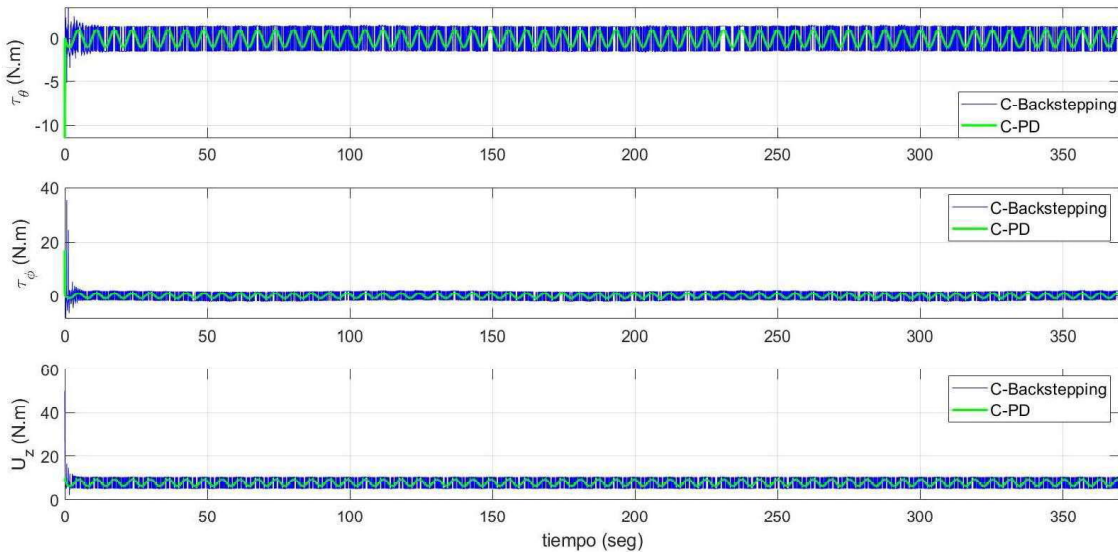


Figura A.13: Señales de control, control backstepping propuesto vs PD; lissajous

La Figura A.10 muestra las posiciones de traslación del VANT para cada trayectoria. Estas figuras se dividen en tres subfiguras: la primera representa el desempeño de la trayectoria a lo largo del eje "X"; en la segunda se aprecia el funcionamiento del cuadricóptero en el eje "Y"; finalmente, el comportamiento de la altitud se observa en la última subfigura. La línea roja representa la trayectoria de referencia, las posiciones de traslación para los controladores son la línea azul y la línea verde; la línea verde representa el comportamiento con el controlador de PD, mientras que la línea azul se ve el comportamiento del VANT con el controlador propuesto en esta tesis. Observando las gráficas de traslación el control propuesto tiene un buen desempeño con respecto a los valores de referencia. El desempeño que tienen los controladores para el seguimiento de las diferentes trayectorias

del VANT se presenta en la Figura A.11 está muestra como el sistema se comporta para seguir a la trayectoria. En la Figura A.12 se presentan los errores que se tiene el cuadricóptero para seguir a la trayectoria deseada, como se aprecia los errores con el control PD oscilan alrededor de cero con una amplitud considerable mientras que con el control backstepping propuesto la oscilación es casi imperceptible. Por último, en la Figura A.13 se presenta los controles aplicados.

Finalmente, La cuarta trayectoria es una deltoide; y las siguientes ecuaciones describen su comportamiento

$$x_{ref} = -10 \cos\left(\frac{\pi t}{180}\right) + 5 \cos\left(\frac{\pi 2t}{180}\right) \text{ m,}$$

$$y_{ref} = -10 \sin\left(\frac{\pi t}{180}\right) - 5 \sin\left(\frac{\pi 2t}{180}\right) \text{ m,}$$

$$z_{ref} = 2 \text{ m.}$$

Las Figuras A.14-A.17 demuestran la actuación del controlador implementado para la trayectoria de una deltoide.

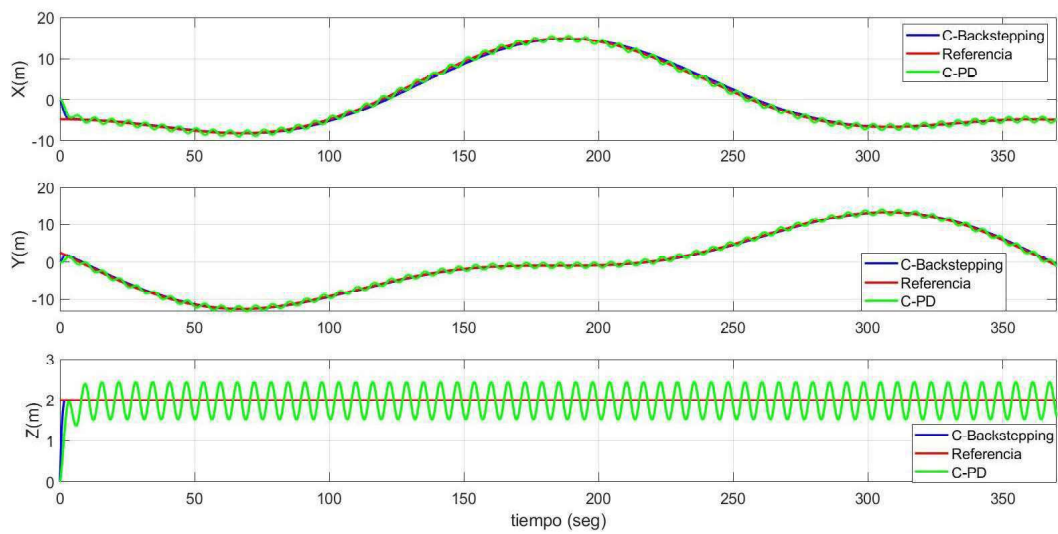


Figura A.14: Posiciones traslacionales al aplicar los controladores; deltoide



Figura A.15: Seguimiento de trayectoria de la curva Deltoide

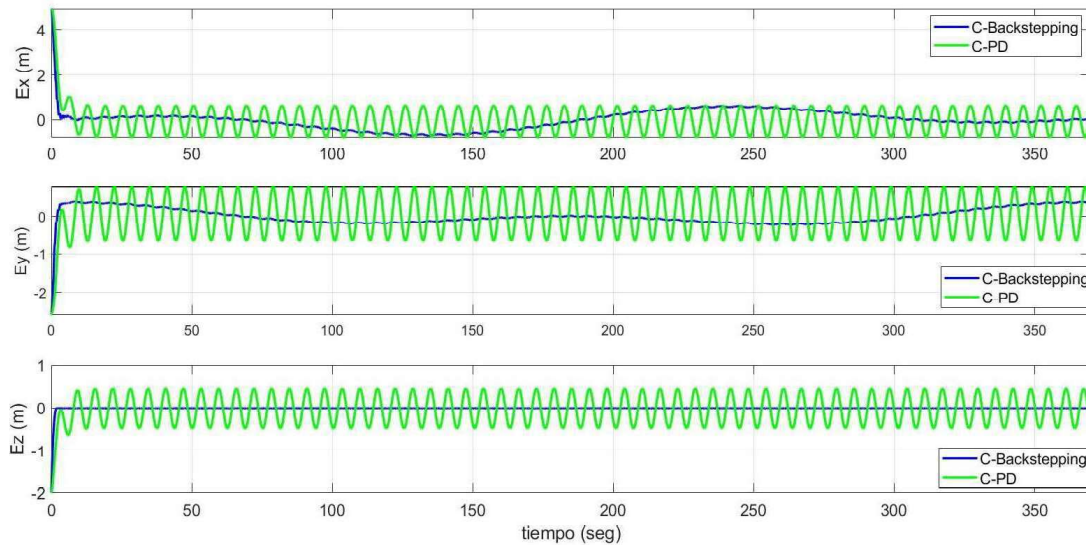


Figura A.16: Señales de error; deltoide

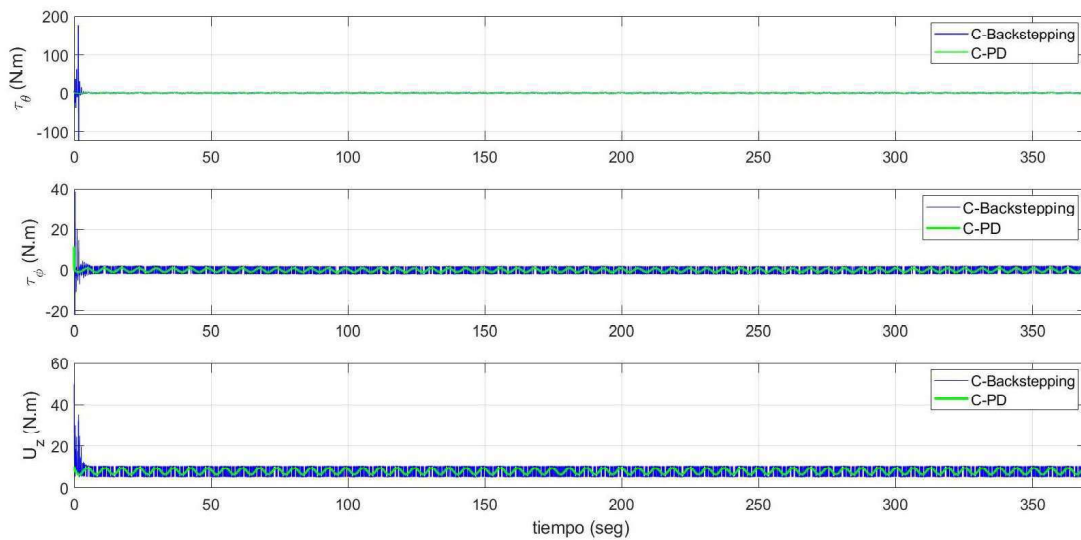


Figura A.17: Señales de control, control backstepping propuesto vs PD; deltoide

La Figura A.14 presenta las posiciones de translación del VANT para cada trayectoria. Estas figuras se dividen en tres subfiguras: la primera representa el desempeño de la trayectoria a lo largo del eje "X"; en la segunda se aprecia el funcionamiento del cuadricóptero en el eje "Y"; finalmente, el comportamiento de la altitud se observa en la última subfigura. La línea roja representa la trayectoria de referencia, las posiciones de translación para los controladores son la línea azul y la línea verde; la línea verde representa el comportamiento con el controlador de PD, mientras que la línea azul muestra el comportamiento del VANT

con el controlador propuesto en esta tesis. Observando las gráficas de traslación el control propuesto tiene un buen desempeño con respecto a los valores de referencia.

El desempeño que tienen los controladores para el seguimiento de las diferentes trayectorias del VANT se presenta en la Figura A.15 está muestra como el sistema se comporta para seguir a la trayectoria. En la Figura A.16 se muestran los errores que se tiene el cuadricóptero para seguir a la trayectoria deseada. Por último, en la Figura A.17 se presenta los controles aplicados.

Si bien, se puede apreciar en las figuras de seguimiento de trayectoria que el control propuesto backstepping que considera la perturbación en la entrada del sistema tiene un buen desempeño, se procede a calcular la integral del error absoluto (IAE) para realizar una comparación entre controladores (Tabla A.3); comparando a los controladores se aprecia que, con el backstepping propuesto sus índices de IAE para el seguimiento de trayectorias tiene un IAE menor que el PD, por tal motivo tiene un mejor desempeño; así mismo, en la misma tabla se aprecia las desviaciones estándar ( $\sigma$ ), esto para ver que tan separados están los datos en base a la medida de tendencia central, en este caso la media aritmética de los errores; se puede ver que para el seguimiento en el eje  $x$  las dispersiones de datos es muy parecida y en algunos casos con el control PD la dispersión es menor que con el control propuesto; pero para el desplazamiento en el eje  $y$  y  $z$  los datos están muy cercanos a la medida de tendencia central.

Tabla A.3: Comparación de IAE durante el seguimiento de trayectorias

Trayectoria circular				
Indicador	BS	PD	$\sigma_{BS}$	$\sigma_{PD}$
IAEx	9855.7	10297	0.8313	0.8253
IAEy	1719.6	9149.9	0.1101	0.5118
IAEz	68.55	6063.1	0.0592	0.3449
Trayectoria de la curva Lemniscata				
IAEx	97841	10052	0.8257	0.8204
IAEy	1190.6	8971.1	0.0892	0.5106
IAEz	68.3025	4272	0.06	0.2502
Trayectoria de la curva Lissajous				
IAEx	8492.5	8605.9	0.5113	0.5243
IAEy	5918.9	8455	0.3571	0.5117
IAEz	67.2387	5592.7	0.0614	0.3444
Trayectoria de la curva deltoide				
IAEx	5515.5	8866.4	0.4321	0.5996
IAEy	2950.9	8542.6	0.2158	0.5273
IAEz	67.92	5598.8	0.0616	0.3448










## **Apéndice B**

**Artículo publicado.**

Article

# Robust Backstepping Control Applied to UAVs for Pest Recognition in Maize Crops

Liliam Rodríguez-Guerrero <sup>†</sup>, Alejandro Benítez-Morales <sup>\*,†</sup>, Omar-Jacobo Santos-Sánchez <sup>\*,†</sup>,  
Orlando García-Pérez <sup>†</sup>, Hugo Romero-Trejo <sup>†</sup>, Mario-Oscar Ordaz-Oliver <sup>†</sup>  
and Jesús-Patricio Ordaz-Oliver 

Electronic and Control Academic Group, Academic Area of Computation and Electronic, Autonomous University of Hidalgo State (UAEH), Pachuca de Soto 42084, Mexico

\* Correspondence: abenitez@uaeh.edu.mx (A.B.-M.); omarj@uaeh.edu.mx (O.-J.S.-S.);

Tel.: +52-771-71-72000 (ext. 6734) (A.B.-M. & O.-J.S.-S.)

† These authors contributed equally to this work.

**Abstract:** In this paper, a robust control technique is developed to achieve the quadrotor stabilization against unmodeled matching vanishing dynamics. The synthesis of the proposed robust control is based on the Lyapunov approach and the backstepping method allowing to construct an iterative control algorithm. To compare the performance of the proposed controller, a Proportional Derivative (PD) controller is used to obtain experimental results in an outdoor environment. To compare the closed-loop system responses with both controllers, the Integral Absolute Error is computed and several tests are conducted to calculate the error standard deviation. Ultimately, employing the robust backstepping control approach in pest recognition in maize crops, which is a specific task of precision agriculture, demonstrates its effectiveness in improving the trajectory tracking of the vehicle while it captures images of the crops.

**Keywords:** outdoor environment; quadrotor; robust backstepping control; vanishing unstructured dynamics; precision agriculture



**Citation:** Rodríguez-Guerrero, L.; Benitez-Morales, A.; Santos-Sánchez, O.-J.; García-Pérez, O.; Romero-Trejo, H.; Ordaz-Oliver, M.-O.; Ordaz-Oliver, J.-P. Robust Backstepping Control Applied to UAVs for Pest Recognition in Maize Crops. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 9075. <https://doi.org/10.3390/app12189075>

Academic Editor: Yosoon Choi

Received: 6 August 2022

Accepted: 7 September 2022

Published: 9 September 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Today, the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) is growing, and multirotor systems are expected to replace manned aircraft in a variety of activities [1]. Examples of such activities include search and rescue missions, data collection, precision agriculture, and payload delivery [2–5]. Quadcopters can rapidly change direction and perform vertical takeoffs and landings, thus making them increasingly popular.

Small-scale UAVs typically suffer from the effects of outside wind gusts and unmodeled dynamics, effects that involve changes in mass and inertial moments causing parametric uncertainties. These effects also result from the coupling effect between the forces and moments produced by their actuators, which are commonly neglected in the practical designs [6]. Since an advanced control system is based on the nominal model, the uncertain parameters and unmodeled dynamics adversely affect its performance. Developing robust controllers to guarantee UAV stabilization has been a key topic that some authors have handled in different ways. For instance, on the basis of sliding mode algorithms and backstepping methods, [7] offers a robust backstepping sliding mode controller for attitude and position control; accordingly, smooth bounded disturbances and non-vanishing perturbations were considered for a quadrotor vehicle, and simulation results were presented. In [8], the attitude control of an eight-rotor UAV in the presence of model uncertainties and external disturbances was suggested; hence, a robust backstepping sliding mode controller with adaptive radial basis function neural network was employed, and simulation results were reported. According to [9], the adaptive backstepping sliding mode tracking control method for underactuated unmanned surface vehicle was employed to compensate for its

model uncertainty, time-varying disturbances and input saturation, and a simulation study was introduced. Attitude and position tracking were performed using the backstepping technique and sliding mode control in [10]; in this case, the controller adapts to the mass changes to control the UAV, and the controller performance was evaluated through simulations. Furthermore, attitude regulation and translational movement of an aircraft using a backstepping approach was done in [11], and altitude control was performed with sliding mode control considering uncertainties. As a result of the presence of sinusoidal functions in the roll and pitch subsystems, the virtual input is always bounded, allowing the control input produced with backstepping to be smoother than the input provided by the sliding mode controller, exhibiting no implementation issues such as chattering; however, the controller robustness problem was not addressed. In [12], a backstepping control strategy was employed to decrease the wind disturbances that can impact the accuracy of image acquisition in the course of drone flight in an outdoor environment; in particular, the specific task involved estimating nitrogen in a rice crop using the aerial imagery.

As a result of adaptive backstepping control, several estimations of the non-vanishing external disturbance were employed for the proposed controller in [13]; in this case, the experimental results were obtained in an indoor environment using a VICON Bonita motion capture system and MATLAB software. Similarly, in [14], the same motion capture system was used to implement feedback linearization and an integral-backstepping-like controller to address the perturbation problems that appear in a quadrotor; in this sense, simulations and indoor environment experimental results were presented with slowly-varying wind conditions. To regulate quadrotors in the presence of constant and time-varying disturbances, a nonlinear controller based on backstepping was designed, and simulation results were presented in [15]; the non-vanishing disturbances were estimated by a nonlinear observer. A nonlinear robust and adaptive backstepping control strategy was proposed in [16] to solve the trajectory tracking problem of hexacopter UAVs. The nominal backstepping control approach was designed as the main controller, and simulations were performed considering non-vanishing bounded disturbances. In [17], the robust position and attitude tracking control problem of a quadrotor subject to nonlinearities, input coupling, aerodynamic uncertainties and external wind disturbances was presented, the control scheme was validated through simulations and experimental validation on a Quanser's 3-DOF Hover setup. In [18], a robust landing algorithm onto a heaving platform, using an autonomous quadcopter DJI-F450, was presented. This algorithm addressed the altitude flight under the ground effect and external disturbances. In [19], a nonlinear robust Fast Terminal Sliding Mode Controller was designed to control and to stabilize a reconfigurable UAV in the presence of uncertain and variable parameters. The proposed controller was evaluated through a flight scenario. In [20], a hybrid control architecture that combines Deep Reinforcement Learning and Robust Linear Quadratic Regulator for vision-based lateral control of an autonomous vehicle was presented. The proposal was validated via simulation results. The robust control Lyapunov function approach is another control approach that has been used to tackle the rejecting bounded-matched disturbance problems in a Planar Vertical Take-Off and Landing (PVTOL) [21], presenting experimental results. Furthermore, using the command filtered backstepping approach with a parameter scheduling algorithm, an experimental flying test of a quadrotor with a nonlinear controller in an indoor environment was described in [22]; however, the robust design was not included in the controller synthesis. Simulation routines of a robust control based on a backstepping method was presented in [23] to drive the position and attitude of a unmanned mini aerial rotorcraft vehicle subjected to bounded uncertainties and bounded disturbances.

According to the specialized literature cited above, most of the robust backstepping or robust control algorithms were tested in simulations: [7–10,15,16,19,20,23]; advanced control in an outdoor environment: for nitrogen estimation with relative high-cost equipment was presented in [12], and robust landing algorithm onto a heaving platform in [18]; in an indoor environment in UAVs [13,14,17] and in a PVTOL [21]. In our opinion, a robust

backstepping control algorithm has to be sufficiently simple to implement it on an autopilot for flying tests in a more realistic environment (outdoors and trajectory tracking in precision agriculture). In this sense, the embedded computing resources required by autonomous unmanned aircraft systems represented a challenge [24]. The backstepping algorithm allows to synthesize a recursive stabilizing controllers for nonlinear systems and it could be modified to obtain robust controllers. Moreover, unmodeled dynamics, external disturbances, actuators, and signal conditioner nonlinearities are latent in the real-time control loop. Under all these conditions, it is essential to assess the controller's performance [25] by experimental evaluation of the control algorithms in meaningful environments to validate their robustness in a closed loop with a real plant.

In this contribution, based on the Lyapunov approach, a robust nonlinear controller solves the trajectory tracking problem for a quadrotor. Our proposal uses the backstepping method [26], allowing to construct an iterative control algorithm that rejects the effects of the unstructured dynamics in the quadrotor nonlinear model. For this purpose, the quadrotor model is divided into four subsystems related to the altitude, the yaw angle, the pitch- $x$  and the roll- $y$ , as in [11], and it considers the coupled nonlinear dynamics in the actuators. While these disturbances are unknown, they are assumed as bounded matched vanishing dynamics. The robustness is incorporated in the proposed controller to stabilize the drone in the presence of non-modeled dynamics, which improve the image capture system on board of the UAV as it flies over corn crops to detect dry leaves, providing clues to identify fungus such as *Phyllachora maydis*, *Monographella maydis*, and *Coniothyrium phyllachorae* on the corn leaves. These fungi are the cause of the tar spot in the corn [27], which causes crop losses.

Regarding the proposal mission in this paper, growing loss owing to disease is one of the most representative problem in agriculture. Crop growth inspecting and early identification of pest in the crops is still an important issue. In this regard, farmers are investing great efforts to conserve crops; however, they are mostly failing because they are not correctly monitoring the crops when they have been infested. Additionally, plagues in the crops are also difficult to detect due to it is not uniformly distributed. Hence, UAVs have a key role in crop disease surveillance and early detection [28–30]. This research attempts to provide experimental evidence of the implementation feasibility of the developed robust backstepping control in a PixHawk autopilot used in a pest detection task. An RGB GoPro Hero8 Black camera is mounted on the vehicle, and the video is processed off-line in the MATLAB software. This image processing provides the approximated location of the possibly affected crops. The overall system (UAV and camera) represents a relative low-cost (less than USD 450) alternative in precision agriculture.

The contributions of the article are as follows:

- A new robust backstepping approach-based control algorithm that considers matched vanishing disturbances is proposed. The proposed controller uses a virtual bounded input: the function  $\sin(\cdot)$ , which produces bounded control signals, and it is appropriate to the physical constrains of the UAV.
- Experimental results in trajectory tracking using a UAV in an outdoor environment are reported. A specific precision agriculture task is involved using a commercial camera system and MATLAB software.
- The robustness provided to the proposed controller allows to reduce the capture of distorted crop images and it represents better performance when our proposal is compared to a PD controller, although a gimbal or additional software are not used.
- This article tries to fill the gap between the technological development with advanced control theory.

Accordingly, the paper is organized as follows: In Section 2, the problem formulation and the main result are presented. The quadrotor model is shown in Section 3, and the application of the control strategy is developed in Section 4. The description of the experimental platform and the experimental results are given in Section 5. Section 6 demonstrates how pests are detected in the field. Finally, concluding comments are enunciated in Section 7.

## 2. Problem Formulation and Main Results

In this part, the problem is stated and the theoretical main result is presented.

### 2.1. System Description

The following perturbed nonlinear system is addressed:

$$\dot{\vartheta} = f_0(\vartheta) + f_1(\vartheta)\zeta \tag{1}$$

$$\dot{\zeta} = u + \delta(t, \vartheta), \tag{2}$$

where  $[\vartheta^T, \zeta]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$  is the state, and  $u \in \mathbb{R}$  is the control input. It is considered that the next assumptions are fulfilled:

1. The known functions  $f_0 : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  and  $f_1 : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  are continuously differentiable in a domain  $D \subset \mathbb{R}^n$  that contains the origin  $\vartheta = 0$  and  $f_0(0) = 0$ .
2. The Equation (1) of the system can be stabilized with a state feedback  $\zeta = \mu(\vartheta)$ , with  $\mu(0) = 0$ , then, there is a Lyapunov function that satisfies the following equation:

$$\frac{\partial V(\vartheta)}{\partial \vartheta} [f_0(\vartheta) + f_1(\vartheta)\mu(\vartheta)] \leq -W(\vartheta),$$

where  $W(\vartheta)$  is a positive definite function,  $\forall \vartheta \in D$ .

3. Function  $\delta(t, \vartheta)$  is a bounded matched vanishing perturbation, i.e.,

$$\delta(t, 0) = 0, |\delta(t, \vartheta)| \leq \Delta, \text{ and } \Delta > 0. \tag{3}$$

**Problem statement:** Design a control  $u$  that guarantees the closed-loop robust stability of the origin ( $\vartheta = 0, \zeta = 0$ ) of system (1) and (2) in the presence of unstructured matched disturbance  $\delta(t, \vartheta)$ . Then, compute the control laws for every subsystem of the quadrotor, guaranteeing its robust stabilization.

### 2.2. Main Result

The synthesis of the proposed control algorithm is stated as follows.

**Theorem 1.** Consider the system (1) and (2), under the Assumptions 1–3, for  $k > 0$ , and for a Lyapunov function of the form  $V_1(\vartheta, \bar{z}) = V(\vartheta) + \frac{1}{2}\bar{z}^2$ , with  $\bar{z} = \zeta - \mu(\vartheta)$ , then, the control law

$$u = \frac{\partial \mu(\vartheta)}{\partial \vartheta} [f_0(\vartheta) + f_1(\vartheta)\zeta] - \frac{\partial V(\vartheta)}{\partial \vartheta} f_1(\vartheta) - k\bar{z} - \text{sgn}(\bar{z})\Delta \tag{4}$$

robustly stabilizes the system.

**Proof of Theorem 1.** The proof is inspired on the methodology given in [26]. Adding and subtracting  $f_1(\vartheta)\mu(\vartheta)$  on the right-hand side of Equation (1), it yields to

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta} &= [f_0(\vartheta) + f_1(\vartheta)\mu(\vartheta)] + f_1(\vartheta)[\zeta - \mu(\vartheta)] \\ \dot{\zeta} &= u + \delta(t, \vartheta). \end{aligned} \tag{5}$$

Define  $\bar{f}_0(\vartheta) = f_0(\vartheta) + f_1(\vartheta)\mu(\vartheta)$ ,  $\bar{z} = \zeta - \mu(\vartheta)$ , then its derivative is given by  $\dot{\bar{z}} = \dot{\zeta} - \dot{\mu}(\vartheta) = (u + \delta(t, \vartheta)) - \dot{\mu}(\vartheta)$ , and consider the change of variable

$$\bar{v} = u - \dot{\mu}(\vartheta), \tag{6}$$

where

$$\dot{\mu}(\vartheta) = \frac{\partial \mu(\vartheta)}{\partial \vartheta} \dot{\vartheta} = \frac{\partial \mu(\vartheta)}{\partial \vartheta} [f_0(\vartheta) + f_1(\vartheta)\zeta]. \tag{7}$$

Now, the system (5) is expressed in the classical backstepping form

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta} &= \overline{f_0}(\vartheta) + f_1(\vartheta)\bar{z} \\ \dot{\bar{z}} &= \bar{v} + \delta(t, \vartheta), \end{aligned} \tag{8}$$

when  $\bar{z} = 0$ , it guarantees that the system (8) has an equilibrium point at the origin (according to Assumption 2).

A positive definite Lyapunov candidate function of the form  $V_1(\vartheta, \bar{z}) = V(\vartheta) + \frac{1}{2}\bar{z}^2$  is proposed, and its derivative along the trajectories of system (8), according to Assumption 2, is given by

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(\vartheta, \bar{z})|_{(8)} &= \frac{\partial V(\vartheta)}{\partial \vartheta} \overline{f_0}(\vartheta) + \frac{\partial V(\vartheta)}{\partial \vartheta} f_1(\vartheta)\bar{z} + \bar{z}\dot{\bar{z}} \\ &\leq -W(\vartheta) + \frac{\partial V(\vartheta)}{\partial \vartheta} f_1(\vartheta)\bar{z} + \bar{z}\dot{\bar{z}}, \end{aligned}$$

where  $\dot{\bar{z}} = \bar{v} + \delta(t, \vartheta)$ , set

$$\bar{v} = -k\bar{z} - \frac{\partial V(\vartheta)}{\partial \vartheta} f_1(\vartheta) - \text{sgn}(\bar{z})\Delta, \tag{9}$$

with  $k > 0$ ; substituting into the previous equation, it yields

$$\dot{V}_1(\vartheta, \bar{z})|_{(8)} \leq -W(\vartheta) - k\bar{z}^2 + \bar{z}\delta(t, \vartheta) - \bar{z}\text{sgn}(\bar{z})\Delta. \tag{10}$$

Majorizing the term

$$\bar{z}\delta(t, \vartheta) \leq |\bar{z}\delta(t, \vartheta)| \leq |\bar{z}||\delta(t, \vartheta)| \leq |\bar{z}|\Delta,$$

and  $|\bar{z}| \triangleq \bar{z}\text{sgn}(\bar{z})$ ; so,  $|\bar{z}|\Delta = \bar{z}\text{sgn}(\bar{z})\Delta$ ; substituting into Equation (10), it yields

$$\dot{V}_1(\vartheta, \bar{z})|_{(8)} \leq -W(\vartheta) - k\bar{z}^2 < 0,$$

so, the origin of the system (8) is robustly stable; since  $\mu(0) = 0$ , the origin of system (1) and (2) is robustly stable too. The input  $u = \bar{v} + \dot{\mu}(\vartheta)$  is obtained from Equation (6), and replacing Equations (7) and (9) into  $u$ , the result follows in Equation (4).  $\square$

The control action (4) is used to solve the trajectory tracking problem of a quadrotor whose model is shown in the following section.

### 3. Quadrotor Model

The quadrotor model (see Figure 1) is obtained by representing a solid body moving in 3D space and being subjected to one force and three moments [31]. The generalized coordinates of the four rotor helicopter  $q = (\gamma, \lambda)$ , where  $\gamma = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$  represents the relative position of the center of mass of the quadrotor with respect to an inertial reference, and  $\lambda = (\phi, \theta, \psi) \in \mathbb{R}^3$  are the Euler angles representing the orientation of the quadrotor, known as roll-pitch-yaw, respectively. The inertial moments in the flying robot are defined by  $I_x, I_y, I_z$  ordered with respect to  $x, y$  and  $z$  axes, while  $m$  denotes its mass,  $l$  is the arm length, and  $\tau_\phi, \tau_\theta$  and  $\tau_\psi$  are the input signals to be applied to the motors.

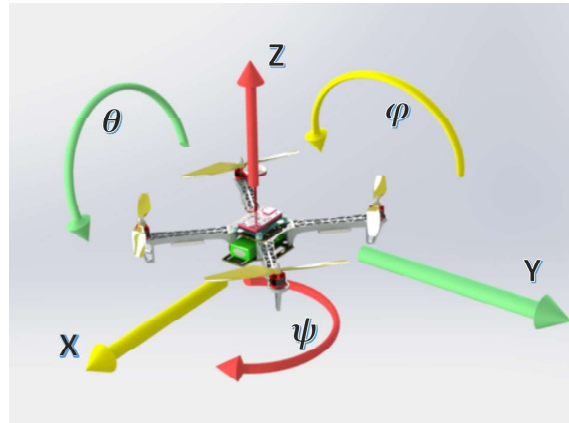


Figure 1. Quadcopter diagram.

The following equations describe the movement of the quadcopter affected by collective throttle  $u_s$  and torques  $\tau_\phi$ ,  $\tau_\theta$  and  $\tau_\psi$  [32]

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} &= -\frac{1}{m} \sin \theta u_s \\
 \ddot{y} &= \frac{u_s}{m} \cos \theta \sin \phi \\
 \ddot{z} &= \frac{\cos \theta \cos \phi}{m} u_s - g \\
 \ddot{\phi} &= \dot{\theta} \dot{\psi} \frac{I_y - I_z}{I_x} + \frac{1}{I_x} \tau_\phi \\
 \ddot{\theta} &= \dot{\phi} \dot{\psi} \frac{I_x - I_z}{I_y} + \frac{1}{I_y} \tau_\theta \\
 \ddot{\psi} &= \dot{\phi} \dot{\theta} \frac{I_y - I_x}{I_z} + \frac{1}{I_z} \tau_\psi.
 \end{aligned} \tag{11}$$

The following assumptions, proposed in [11], are considered:

1. The UAV is considered as a rigid and symmetrical body.
2. The center of gravity (CoG) of the quadrotor is in its origin.
3. The blades are rigid bodies with fixed angle pitch.
4. In the nominal model of the quadrotor, the aerodynamics effects have not been considered.
5. The motor dynamic could be modeled as a first-order transfer function, and it is sufficient to reproduce the dynamics between the propeller’s speed set-point and its true speed. As the time constant of this transfer function is small, we can consider that the rotor dynamic is approximately equal to one [33]. This assumption is used to suppose additional dynamics (or uncertain parameters) that represent matched vanishing perturbations in the actuators.
6. The attitude angles, pitch, roll and yaw are restricted in the interval  $[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$ .

**Remark 1.** Additionally to Assumption 5, the effects of the propellers are neglected [34]. However, a more accurate trust model of the vehicle is given in [34], which can be expressed as

$$\begin{aligned}
 T_i &= c_1 \omega_i^2 \left( c_2 \left( 1 + \frac{3}{2} \mu_i^2(t) \right) - \lambda_i(t) \right) \\
 &= c_1 \omega_i^2 c_2 + c_1 \omega_i^2 \underbrace{\left[ c_2 \frac{3}{2} \mu_i^2(t) - \lambda_i(t) \right]}_{\delta},
 \end{aligned}$$

where  $T_i$  is the trust of motor  $i^{th}$ ,  $\omega_i$  is the angular velocity of the motor  $i^{th}$ ,  $\mu_i(t)$  and  $\lambda_i(t)$  are the advance and inflow ratios respectively (nonlinear functions),  $c_1$  and  $c_2$  are positive constants. So,  $\delta$  could be the second term of  $T_i$ , among other unmodelled dynamics.

With the nominal model given by (11), the robust backstepping controller is synthesized in the next section.

#### 4. Control Strategy Applied to the Quadrotor

In this section, the quadrotor mathematical model (11) is divided into subsystems as was done in [11,35]: the altitude subsystem  $z$ , the yaw subsystem  $\psi$ , the pitch subsystem  $x - \theta$  and the roll subsystem  $y - \phi$ . Then, the robust stabilizing controllers for each subsystem are obtained using the result of Theorem 1 while considering the presence of matched vanishing disturbances  $\delta(t, \vartheta)$ .

##### 4.1. Altitude Controller

The subsystem  $z$  that describes the UAV dynamic of altitude is represented by

$$\ddot{z} = \frac{\cos \theta \cos \phi}{m} u_s - g + \delta(\vartheta, t), \tag{12}$$

where  $|\delta(t, \vartheta)| \leq \Delta_1$ ,  $\Delta_1$  is the upper bound of the matched disturbances. Defining the state variables  $x_1 = z$  and  $x_2 = \dot{z}$ , and

$$u_s = \frac{m}{\cos \theta \cos \phi} [g + u_z], \tag{13}$$

and according to the backstepping methodology [26],  $x_2 = \mu(x_1) = -\alpha_6 x_1$ , for  $\alpha_6 > 0$ , the subsystem (12) is rewritten as follows:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\alpha_6 x_1 \\ \dot{x}_2 &= u_z + \delta(\vartheta, t). \end{aligned} \tag{14}$$

The Lyapunov function is  $V_z(x_1) = \frac{1}{2} x_1^2$ , and following the result of Theorem 1, with  $\zeta = x_2$ ,  $f_0(\vartheta) = 0$ ,  $\vartheta = x_1$ ,  $f_1(\vartheta) = 1$ , and  $\bar{z} = x_2 + \alpha_6 x_1$ , the stabilizing control for subsystem (14) takes the following form:

$$u_z = -(1 + k_z \alpha_6) x_1 - (\alpha_6 + k_z) x_2 - \text{sgn}(x_2 + \alpha_6 x_1) \Delta_1.$$

##### 4.2. Yaw Controller

The dynamic of the  $\psi$  angle is given by

$$\ddot{\psi} = \dot{\phi} \dot{\theta} c_1 + c_2 \tau_\psi + \delta(\vartheta, t), \tag{15}$$

where  $c_1 = \frac{I_y - I_x}{I_z}$ ,  $c_2 = \frac{1}{I_z}$ ,  $|\delta(t, \vartheta)| \leq \Delta_2$ ;  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$  are parameters of the inertia matrix. Defining the state variables  $x_3 = \psi$ ,  $x_4 = \dot{\psi}$ , and

$$\tau_\psi = \frac{1}{c_2} (-\dot{\phi} \dot{\theta} c_1 + u_\psi), \tag{16}$$

then Equation (15) becomes as follows:

$$\ddot{\psi} = u_\psi + \delta(\vartheta, t).$$

Following a similar procedure as in the altitude control,  $x_4 = \mu(x_3) = -\alpha_7 x_3$ , for  $\alpha_7 > 0$ , the subsystem (15) yields to

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= -\alpha_7 x_3 \\ \dot{x}_4 &= u_\psi + \delta(\vartheta, t). \end{aligned} \tag{17}$$

Let  $V_\psi(x_3) = \frac{1}{2} x_3^2$  the Lyapunov function and defining  $\zeta = x_4$ ,  $\vartheta = x_3$ ,  $f_0(\vartheta) = 0$ ,  $f_1(\vartheta) = 1$ ,  $\bar{z} = x_4 + \alpha_7 x_3$ , the control law for the subsystem (17) is given by

$$u_\psi = -(1 + k_\psi \alpha_7) x_3 - (\alpha_7 + k_\psi) x_4 - \text{sgn}(x_4 + \alpha_7 x_3) \Delta_2. \tag{18}$$

### 4.3. Controller for Subsystem $x - \theta$

Dynamics related with translational motion along  $x$ -axis and the pitch angle  $\theta$  around the  $y$ -axis are described by

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\frac{1}{m} \sin \theta u_s \\ \ddot{\theta} &= \dot{\phi} \dot{\psi} \frac{I_x - I_z}{I_y} + \frac{1}{I_y} \tau_\theta + \delta(\theta, t), \end{aligned} \tag{19}$$

where  $c_3 = \frac{I_x - I_z}{I_y}$ ,  $u_s \neq 0$ , and  $c_4 = \frac{1}{I_y}$ . Let  $x_5 = x$ ,  $x_6 = \dot{x}$ ,  $x_7 = \theta$  and  $x_8 = \dot{\theta}$ . Then, the state space representation is given by

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= -\frac{1}{m} \sin x_7 u_s \\ \dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= \dot{\phi} \dot{\psi} c_3 + c_4 \tau_\theta + \delta(\theta, t). \end{aligned} \tag{20}$$

Considering the first and second equations of the state space representation (20) and defining the virtual input as follows:

$$u_{1x} = \sin x_7 = -\frac{m}{u_s} u_x, \tag{21}$$

then, according to the backstepping methodology [26]  $x_6 = \mu(x_5) = -\alpha_5 x_5$ , for  $\alpha_5 > 0$ . Notice that the selected virtual input  $\sin(x_7)$  produces bounded control signals and it is appropriate to the physical constrains of the UAV:  $x_7 \in [-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$ . These equations can be rewritten as follows:

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= -\alpha_5 x_5 \\ \dot{x}_6 &= u_x, \end{aligned}$$

where  $u_x = -(1 + \alpha_5 k_5)x_5 - (\alpha_5 + k_5)x_6$  is the control input, computed with the Lyapunov function  $V_1(x_5) = \frac{1}{2}x_5^2$ . Replacing  $u_x$  into Equation (21), it yields to

$$u_{1x} = \frac{m}{u_s} (d_1 x_5 + d_2 x_6), \tag{22}$$

where  $d_1 = 1 + \alpha_5 k_5$  and  $d_2 = \alpha_5 + k_5$ .

Next, the iterative methodology of backstepping is applied; taking the first three equations of the state space representation (20), the subsystem is rewritten as

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_6 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{u_s}{m} \end{bmatrix} \sin x_7 \\ \dot{x}_7 &= x_8 = u_{2x}, \end{aligned} \tag{23}$$

In this case,  $\vartheta = (x_5, x_6)^T$ , and  $\zeta = x_7$ . The modified backstepping structure, proposed by [11], is applied for system (23) considering the Lyapunov function

$$V_2 = V_2(x_5, x_6) = \frac{1}{2}x_5^2 + \frac{\beta_1}{2}(x_6 + \alpha_5 x_5)^2.$$

The virtual input  $\mu_1 = \mu_1(x_5, x_6) = \frac{m}{u_s} (d_1 x_5 + d_2 x_6)$  is defined as  $u_{1x}$ , given in Equation (22); substituting Equation (13) in  $\mu_1$

$$\mu_1(x_5, x_6) = \frac{\cos x_7 \cos x_{11}}{p} (d_1 x_5 + d_2 x_6).$$

where  $p = g + u_z$ . Applying Proposition 1 of [11], the control  $u_{2x}$  has the following form:

$$u_{2x} = \frac{\frac{\partial \mu_1}{\partial \vartheta} [f_0(\vartheta) + f_1(\vartheta) \sin \zeta] - \frac{\partial V_2}{\partial \vartheta} f_1(\vartheta) - k_6 (\sin x_7 - \mu_1)}{\cos \zeta}, \tag{24}$$

where

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\mu_1(x_5, x_6))}{\partial x_5} &= \frac{\cos x_7 \cos x_{11} d_1}{p}, \\ \frac{\partial(\mu_1(x_5, x_6))}{\partial x_6} &= \frac{\cos x_7 \cos x_{11} d_2}{p}, \\ \frac{\partial(V_2(x_5, x_6))}{\partial x_6} &= \beta_1 \alpha_5 x_5 + \beta_1 x_6, \end{aligned}$$

So, the virtual input  $u_{2x}$  is

$$\begin{aligned} u_{2x} &= \left( \frac{k_6 d_1 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 \alpha_5 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) x_5 \\ &+ \left( \frac{d_1 \cos x_{11} + k_6 d_2 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) x_6 - (d_2 + k_6) \tan x_7 \end{aligned} \tag{25}$$

Finally, the whole state space representation (20) is considered with  $\vartheta = (x_5, x_6, x_7)^T$ ,  $\zeta = x_8$ , and for

$$\tau_\vartheta = \frac{1}{c_4} [-\dot{\phi} \psi c_3 + \tau_{\theta a}], \tag{26}$$

this subsystem can be rewritten as

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_6 \\ -\frac{p \sin x_7}{\cos x_7 \cos x_{11}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} x_8, \\ \dot{x}_8 &= \tau_{\theta a} + \delta(\vartheta, t) = u_{3x} + \delta(\vartheta, t). \end{aligned} \tag{27}$$

The proposed Lyapunov function for subsystem (27) is

$$V_3 = V_3(x_5, x_6, x_7) = \frac{1}{2} x_5^2 + \frac{\beta_1}{2} (x_6 + \alpha_5 x_5)^2 + \frac{\beta_2}{2} \left( \sin x_7 - \frac{\cos x_7 \cos x_{11}}{p} (d_1 x_5 + d_2 x_6) \right)^2,$$

and the virtual input  $\mu_2$  is associated with  $u_{2x}$ , given in (25), as

$$\mu_2 = \left( \frac{k_6 d_1 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 \alpha_5 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) x_5 + \left( \frac{(d_1 + k_6 d_2) \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) x_6 - (d_2 + k_6) \tan x_7.$$

According to Theorem 1, the controller is given by

$$u_{3x} = -k_7 z_3 - \frac{\partial V_3(\vartheta)}{\partial \vartheta} f_1(\vartheta) - \text{sgn}(z_3) \Delta_3 + \frac{\partial \mu_2(\vartheta)}{\partial \vartheta} [f_0(\vartheta) + f_1(\vartheta) \zeta],$$

where  $z_3 = x_8 - \mu_2$ ,  $k_7 > 0$ ,  $\vartheta = (x_5, x_6, x_7)^T$ ,  $f_1(\vartheta) = [0, 0, 1]^T$ , and

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu_2}{\partial x_5} &= \left( \frac{k_6 d_1 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 \alpha_5 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) \\ \frac{\partial \mu_2}{\partial x_6} &= \left( \frac{d_1 \cos x_{11} + k_6 d_2 \cos x_{11}}{p} + \frac{\beta_1 p}{\cos^2 x_7 \cos x_{11}} \right) \\ \frac{\partial \mu_2}{\partial x_7} &= \left( \frac{2\beta_1 \alpha_5 p \sin x_7}{\cos^3 x_7 \cos x_{11}} \right) x_5 + \left( \frac{2\beta_1 p \sin x_7}{\cos^3 x_7 \cos x_{11}} \right) x_6 - (d_2 + k_6) \sec^2 x_7 \\ \frac{\partial V_3}{\partial x_7} &= \beta_2 \sin x_7 \cos x_7 - \left[ \frac{\beta_2 \cos x_{11} (d_1 x_5 + d_2 x_6)}{p} \right] (2 \cos^2 x_7 - 1). \end{aligned}$$

Therefore, the input  $u_{3x}$  is

$$u_{3x} = \frac{\partial \mu_2}{\partial x_5} x_6 - \frac{\partial \mu_2}{\partial x_6} \frac{p \sin x_7}{\cos x_7 \cos x_{11}} + \frac{\partial \mu_2}{\partial x_7} x_8 - \frac{\partial V_3}{\partial x_7} - \text{sgn}(x_8 - \mu_2) \Delta_3 - k_7 (x_8 - \mu_2).$$

#### 4.4. Controller for Subsystem $y - \phi$

The translational and rotational dynamics experienced by the flying robot along the  $y$ -axis and the roll angle  $\phi$  respectively are represented by

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \frac{u_s}{m} \cos \theta \sin \phi \\ \dot{\phi} &= \dot{\theta} \psi c_5 + c_6 \tau_\phi + \delta(t, \vartheta), \end{aligned} \tag{28}$$

where  $c_5 = \frac{I_y - I_z}{I_x}$ ,  $c_6 = \frac{l}{I_x}$ . Defining the variables  $x_9 = y$ ,  $x_{10} = \dot{y}$ ,  $x_{11} = \phi$ ,  $x_{12} = \dot{\phi}$ , the state space representation is given by

$$\begin{aligned} \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= \frac{\cos x_7}{m} \sin x_{11} u_s \\ \dot{x}_{11} &= x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= \dot{\theta} \psi c_5 + c_6 \tau_\phi + \delta(t, \vartheta). \end{aligned} \tag{29}$$

Considering the first two equations of (29), the virtual input

$$u_y = \sin x_{11} = \frac{m}{u_s \cos x_7} u_1, \tag{30}$$

and defining  $x_{10} = \mu(x_9) = -\alpha_1 x_9$ , for  $\alpha_1 > 0$ ; the subsystem is rewritten as  $\dot{x}_9 = -\alpha_1 x_9$  and  $\dot{x}_{10} = u_1$ . The Lyapunov function is  $V_1(x_9) = \frac{1}{2} x_9^2$ , and according to the classic backstepping methodology, the input  $u_1 = -(k_1 \alpha_1 + 1) x_9 - (k_1 + \alpha_1) x_{10}$  is substituted into Equation (30), which yields

$$u_y = \frac{m}{u_s \cos x_7} [-b_1 x_9 - b_2 x_{10}], \tag{31}$$

where  $b_1 = k_1 \alpha_1 + 1$ ,  $b_2 = k_1 + \alpha_1$ ; substituting (13) into (31)

$$u_y = \frac{\cos x_{11}}{p} (-b_1 x_9 - b_2 x_{10}).$$

In the next step, the third equation of the state space representation (29) is added, and the subsystem is rewritten as in [11], with  $\vartheta = (x_9, x_{10})^T$ , and  $\zeta = x_{11}$ , as follows:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_{10} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{p}{\cos x_{11}} \end{bmatrix} \sin x_{11} \\ \dot{x}_{11} &= x_{12} = u_{y2}. \end{aligned} \tag{32}$$

Following a similar procedure applied to the previous subsystems, with  $V_2(x_9, x_{10}) = \frac{1}{2} x_9^2 + \frac{\beta_3}{2} (x_{10} + \alpha_1 x_9)^2$ , and  $\mu_1 = \frac{\cos x_{11}}{p} (-b_1 x_9 - b_2 x_{10})$ , a control is obtained as the given in the Equation (24), and it has the following structure:

$$u_{y2} = -\left[ \frac{k_2 b_1}{p} + \frac{\beta_3 \alpha_1 p}{\cos^2 x_{11}} \right] x_9 - \left[ \frac{b_1 + k_2 b_2}{p} + \frac{\beta_3 p}{\cos^2 x_{11}} \right] x_{10} - (b_2 + k_2) \tan x_{11}. \tag{33}$$

In the last step, subsystem (29) is fully considered, with  $\vartheta = (x_9, x_{10}, x_{11})^T$ ,  $\zeta = x_{12}$ , and defining

$$\tau_\phi = \frac{1}{c_6} [-\dot{\theta} \psi c_5 + \tau_1], \tag{34}$$

it can be rewritten as follows:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_{10} \\ \frac{p \sin x_{11}}{\cos x_{11}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} x_{12} \\ \dot{x}_{12} &= \tau_1 + \delta(t, \vartheta), \end{aligned} \tag{35}$$

where  $\tau_1 = u_{y3}$ ,  $\mu_2$  is associated with  $u_{y2}$ , given in Equation (33), and the Lyapunov function is defined by

$$V_3(x_9, x_{10}, x_{11}) = \frac{1}{2}x_9^2 + \frac{\beta_3}{2}(x_{10} + \alpha_1x_9)^2 + \frac{\beta_4}{2}\left[\sin x_{11} + \frac{(b_1x_9 + b_2x_{10}) \cos x_{11}}{p}\right]^2.$$

From Theorem 1, the input  $u_{y3}$  is computed as

$$u_{y3} = \frac{\partial\mu_2}{\partial x_9}x_{10} + \frac{\partial\mu_2}{\partial x_{10}}\frac{p \sin x_{11}}{\cos x_{11}} + \frac{\partial\mu_2}{\partial x_{11}}x_{12} - \frac{\partial V_3}{\partial x_{11}} - k_3(x_{12} - \mu_2) - \text{sgn}(x_{12} - \mu_2)\Delta_4.$$

where

$$\begin{aligned} \frac{\partial\mu_2}{\partial x_9} &= -\left(\frac{k_2b_1}{p} + \frac{\beta_3\alpha_1p}{\cos^2 x_{11}}\right) \\ \frac{\partial\mu_2}{\partial x_{10}} &= -\left(\frac{b_1+k_2b_2}{p} + \frac{\beta_3p}{\cos^2 x_{11}}\right) \\ \frac{\partial\mu_2}{\partial x_{11}} &= -\left(\frac{(k_2+b_2)}{\cos^2 x_{11}} + \frac{(\alpha_1x_9+x_{10})2\beta_3p \sin x_7}{\cos^3 x_7}\right) \\ \frac{\partial V_3}{\partial x_{11}} &= \left[\frac{\beta_4}{p}(b_1x_9 + b_2x_{10})\right](2 \cos^2 x_{11} - 1) \\ &+ \left(\beta_4 - \frac{\beta_4(b_1^2x_9^2+b_2^2x_{10}^2)}{p^2} - \frac{2\beta_4b_1b_2x_9x_{10}}{m^2p^2}\right) \sin x_{11} \cos x_{11}. \end{aligned}$$

To assess the effectiveness of the synthesized controllers (13), (16), (26) and (34) in the trajectory tracking task of a quadrotor UAV, experimental tests are conducted as described in the next section.

### 5. Experimental Results

#### 5.1. Experimental Platform Description

The quadrotor is constructed on a plastic frame F450. An autopilot Pixhawk, version 2.4.8, is on board the F450 structure. The Pixhawk exhibits the following performance: a primary clock at 168 MHz, and with a 32-bit processor STM32F427 Cortex M4 core with a floating processor unit. The autopilot has two accelerometers, a gyroscope, and two magnetometers for attitude measurements of the UAV. The Pixhawk is equipped with radio signal input ports compatible with Futaba 10J radio. Furthermore, it has eight pulse width modulation main outputs that are used to control the motors. To pinpoint the longitudinal positions, an external module Ublox NEO-M8N GPS (accuracy of 0.6–0.9 m) is mounted. The yaw angle is estimated via an internal magnetometer located in the GPS. As power supply of the UAV, Lipo technology batteries are employed (capacity of 5200 mAh, discharge rate of 15 C). The quadrotor has four propellers of model 1045, four 2212 920 KV brushless motors and four electronic speed controllers of model SIMONK30A. The trajectory tracking reference was programmed into the Pixhawk (Figure 2).



Figure 2. Quadrotor prototype.

5.2. Experimental Results Applying Synthesized Controllers

In this subsection, for comparison purposes, experimental tests in outdoor environment of UAV are presented for the proposed backstepping controller and a PD controller. For the trajectory tracking task on the spaces  $(x; y; z)$  and  $(\phi, \theta, \psi)$ , the UAV follows three paths: 1. The manual takeoff of the UAV, until the desired altitude is reached, and this altitude is defined by the pilot. 2. The quadrotor tracks parametric circle equations given by

$$\begin{aligned} x_{ref} &= \left(-5 \cos\left(\frac{\pi}{180}t\right) + 5\right)m, \\ y_{ref} &= -5 \sin\left(\frac{\pi}{180}t\right)m, \\ z_{ref} &= 2.3m. \end{aligned}$$

3. At the end, when the trajectory is finished, the pilot regains control of the quadrotor and lands it. The programmed sampling time ( $T$ ) is  $T = 0.01$  s, it was used in all experimental tests. The quadrotor parameters are as follows: mass  $m = 1.3$  kg, distance from the motors to the centre of gravity  $l = 0.3$  m, constant of gravity  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup> and inertia moments  $I_x = I_y = 0.01567$  kgm<sup>2</sup>,  $I_z = 0.028346$  kgm<sup>2</sup>. The gains of controllers (13), (16), (26) and (34) are heuristically proposed in Table 1. The delta values ( $\Delta_i, i = 1, 2, 3, 4$ ) are the maximum values for the matched disturbances that could be adjusted heuristically such that the closed-loop performance is satisfactory.

Table 1. Controller gains.

Subsystems			
$\psi$	$z$	$x - \theta$	$y - \phi$
$k_\psi = 24.2$	$k_z = 7.39$	$k_5 = 0.1$	$k_1 = 0.4$
$\alpha_7 = 5.7$	$\alpha_6 = 12.3$	$k_6 = 0.13$	$k_2 = .27$
$\Delta_1 = 3.2$	$\Delta_2 = 2.5$	$k_7 = 7.3$	$k_3 = 5.3$
		$\Delta_3 = 5$	$\Delta_4 = 2$
		$\alpha_5 = 12$	$\alpha_1 = 0.009$
		$\beta_1 = 0.1$	$\beta_3 = 5.2$
		$\beta_2 = 0.25$	$\beta_4 = 3.64$

To compare the behavior of the proposed controller, a PD controller, which is tuned as is proposed in [35], is employed, obtaining the gains by proposing the following temporal parameters: the maximum overshoot and the settling time. Translational and attitude initial values of the drone are near to the origin.

Figure 3 displays the translational positions recorded during the experiment following the desired trajectory. The figure is divided in three figures: 1. The first shows the trajectory of the vehicle on the X axis, 2. The second displays the trajectory along the Y axis, 3. The last one illustrates the trajectory tracking task on the Z axis. As shown in Figure 3, the trajectory tracking task in  $(X, Y, Z)$  space, in the blue line, displays a reliable performance when it is compared with the reference values in the red line. The position performance of the drone in the  $(X, Y)$  space is displayed in Figures 4 and 5. It is noteworthy that these experimental results were obtained in an outdoor environment.

Figure 6 shows the relative small errors during the trajectory tracking. During the trajectory tracking task, the references are subject to changes in the X, Y axes, then the errors may increase or decrease. Nevertheless, for the altitude, the Set Point is constant, then the error is relatively small. Furthermore, the measurements of the position, provided by the GPS device, present a relatively larger deviations (around 1.4 m to 1.6 m) than other devices employed for indoor environment. This explains the errors in the trajectory-tracking displacement task.

The four control input signals for roll, pitch, altitude and yaw, respectively, are presented in Figure 7. These control inputs are obtained with the proposed backstepping controllers and are sent to the motors in real-time during the tests for desired trajectory tracking.

Figure 8 shows the recorded translational positions, following the desired trajectory, for PD controllers. This figure is divided into three subfigures, representing the trajectory performance along the X, Y and Z axes.

Figure 9 shows the UAV's trajectory performance in three-dimensional space, whereas Figure 10 displays it in two-dimensional space. Figures 11 and 12 show the errors during the trajectory tracking and the control signals for PD controllers, respectively.

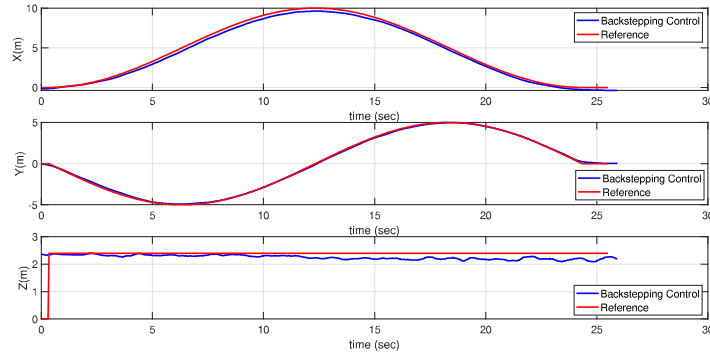


Figure 3. Positions in the X, Y and Z axes; (Backstepping controllers).

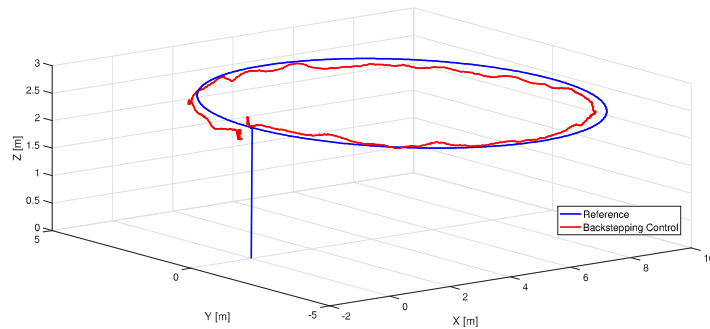


Figure 4. 3D view trajectory tracking; (Backstepping controllers).

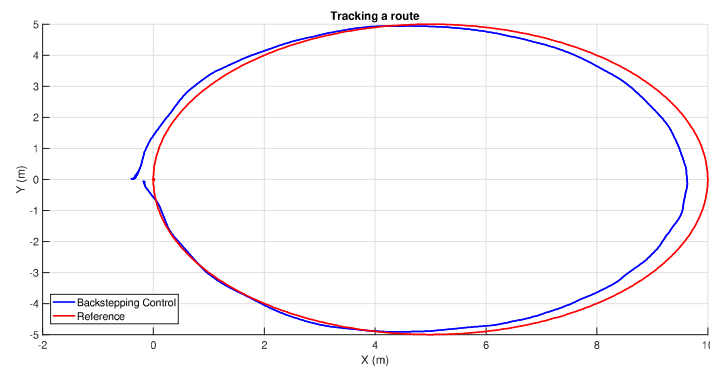


Figure 5. Trajectory tracking; (Backstepping controllers).

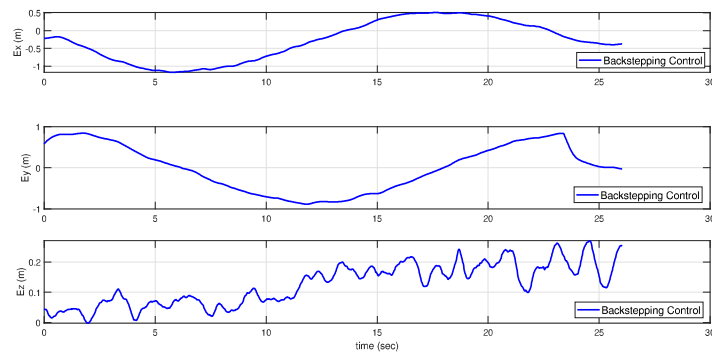


Figure 6. Error signals; (Backstepping controllers).

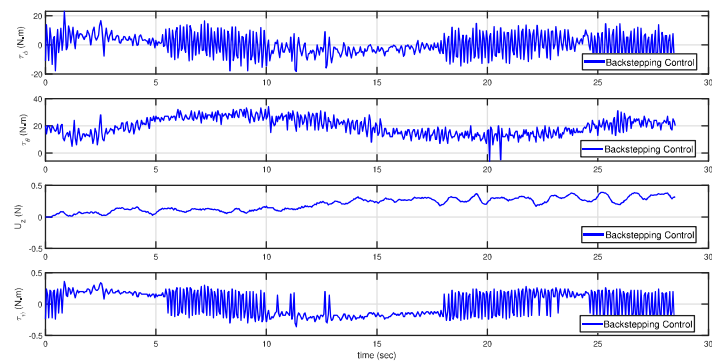


Figure 7. Control signals; (Backstepping controllers).

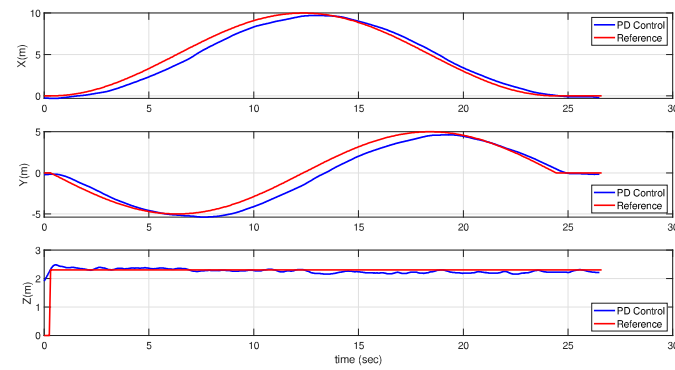


Figure 8. Translational positions in the  $(X, Y, Z)$  space (PD controllers).

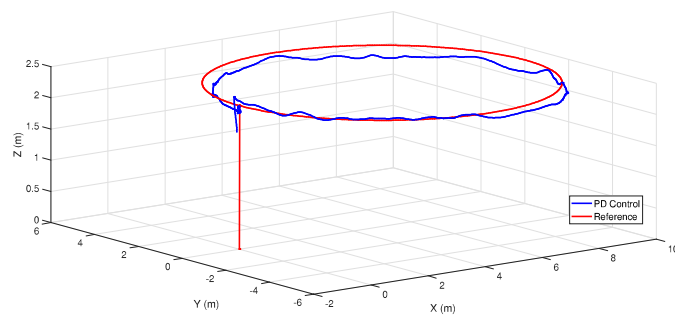


Figure 9. 3D view trajectory tracking (PD controllers).

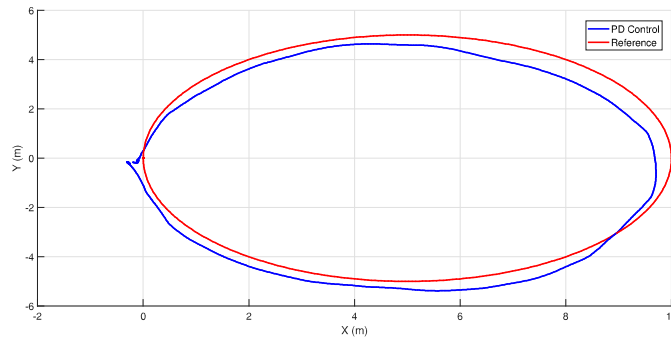


Figure 10. Trajectory tracking (PD controllers).

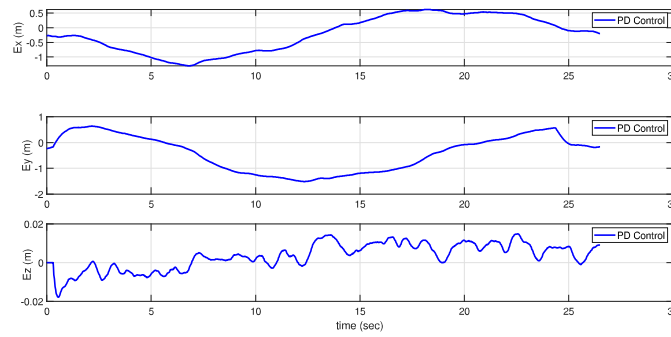


Figure 11. Error signals (PD controllers).

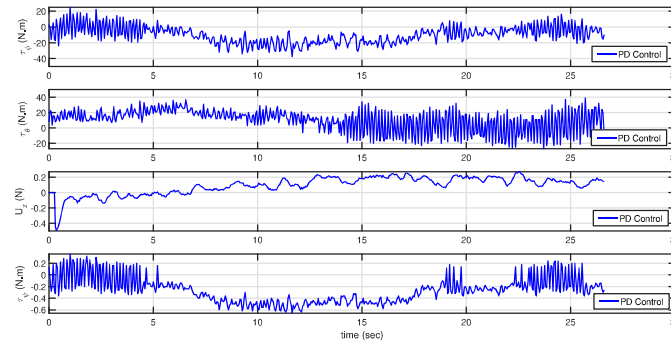


Figure 12. Control signals (PD controllers).

To compare the performances of both controllers, the Integral Absolute Error (IAE) is computed for the robust backstepping (BS) and PD, and these values are reported in Table 2.

Table 2. Comparative analysis of the performance IAE for the trajectory tracking phase.

Trajectory Tracking				
Performance Index	BS	PD	$\sigma_{BS}$	$\sigma_{PD}$
IAEx	674.0325	732.8948	0.3195	0.6095
IAEy	646.48	849.0646	0.5691	0.6949
IAEz	59.96	85.4140	0.06747	0.0678

Table 2 shows that the robust backstepping controller outperforms the PD controller in the trajectory-tracking phase of the quadrotor in the presence of disturbances; additionally, the standard deviation is calculated to analyze the error dispersion, and the mean value of

the 10 conducted experimental tests is calculated and compared with the results obtained using the PD control.

Additionally, Table 3 shows the mean of the integral of the absolute value of the signal control, defined as

$$J_{control} = \sum_{i=0}^N |control(i)|,$$

where  $N$  is the number of samples. The index  $J_{control}$  is related with the energy consumption of the actuators.

**Table 3.** Comparison of absolute control values during the trajectory tracking phase.

Performance Index	Trajectory Tracking	
	BS	PD
$J_{\tau_\phi}$	6051.2	6662
$J_{\tau_\theta}$	7337	8661
$J_{u_s}$	519.647	662.5175
$J_{\tau_\psi}$	802.8	848.2

According to the results showed on Table 3, the energy consumption required by the Robust Backstepping Controller (RBC) is lower than the PD controller. It implies that the control signal of the RBC is smaller and softer than the control signal of PD, which allows the captured images to be less blurred and distorted.

## 6. Detection of Pest in Corn Leaves

In this section, the vision system and the offline images processing are presented, aiming to locate the tar spot complex [27] in the maize fields based on the images taken when the quadcopter flies over the corn crop.

### 6.1. Vision System

The modules of the vision system include the camera and the image processing (a PC and MATLAB software). The natural light illuminates the plants to be inspected. The GoPro HERO8 Black camera [36] is mounted under the UAV frame (see Figure 13).



**Figure 13.** UAV with the GoPro HERO8 Black camera.

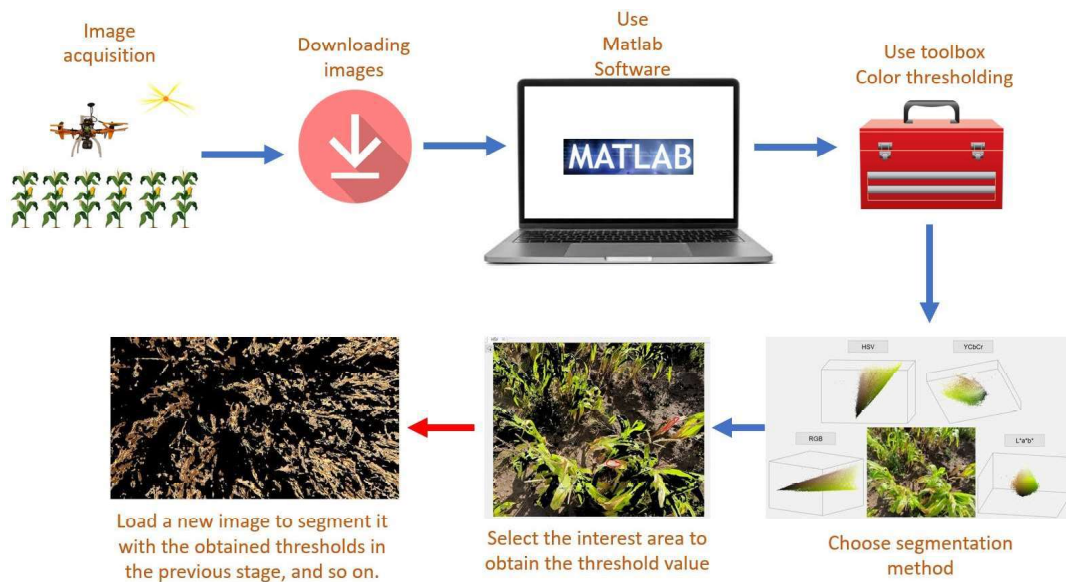
While the quadrotor flies over the crops, the camera lens captures and sends images to the camera sensor in the form of light. This sensor converts this light to a digital image that is then stored in the camera's memory for later analysis. For the image processing, the "Color Thresholding" toolbox is used (included in MATLAB Software), in which the interesting areas in the analyzed images are selected based on the color spaces: Red, Green, Blue (RGB); Hue, Saturation, Value (HSV); Luma, Blue and Red chromaticity (YCbCr) and

Luminosity, Red/Green and Yellow/Blue chromaticity coordinates (CIE-Lab). This is done by applying segmentation methods on the images; in this regard, image segmentation is a processing technique that refers to the extraction of useful information from a frame to facilitate observation and analysis since the rest of the image content is not useful for the purpose, i.e., if within an image the red color is selected, everything that is not red is discriminated by the segmentation method. This toolbox is selected because it allows comparing the intensity level, pixel by pixel, with a certain threshold previously defined by the user. To establish this threshold, it is necessary to analyze the interest region to be isolated, finding a characteristic and exclusive color level.

## 6.2. Image Processing

In computer vision, segmentation processes are of vital importance when it comes to detecting objects in unstructured environments.

In this article, the segmentation process employs the method based on regions [37] due to the specific task (detecting color levels on affected leaves). Methods based on regions aim to determine the areas of an image that have homogeneous properties, and the border of these areas will delimit some objects from others. Regarding the segmentation methods, Figure 14 displays the process of application followed in this work.



**Figure 14.** Scheme for the application of segmentation.

### Segmentation Method

The application process of the segmentation method starts with the images of the corn fields (Figure 15) where the dry leaves of the plants are detected, as this is a symptom that the plant could be ill. For this purpose, first, based on the photograph, the pixels of interest are selected to find the thresholds. Once the pixel values are obtained, a new image is loaded to search for dry leaves in the field.

Figure 16 shows the processed image using different segmentation methods where the dry leaves of the plant are highlighted. It should be mentioned that in the processed image, the areas that are not of interest are colored in black. For the RGB segmentation method, the threshold values are as follows:  $R > 126$ ,  $G > 104$ ,  $B < 80$ . As for the HSV method, the ranges are as follows:  $0.096 < H < 0.153$ ,  $0.243 < S < 0.944$ ,  $0.222 < V < 0.944$ . In the YCbCr method, the following values are obtained:  $70 < Y < 225$ ,  $72 < Cb < 109$ ,  $136 < Cr < 163$ . Finally, from the application of the CIE-Lab segmentation, the values are as follows:  $38.49 < L < 100$ ,  $-10.353 < a < 19.622$ ,  $19.622 < b < 55.531$ .



Figure 15. Image captured by the camera.

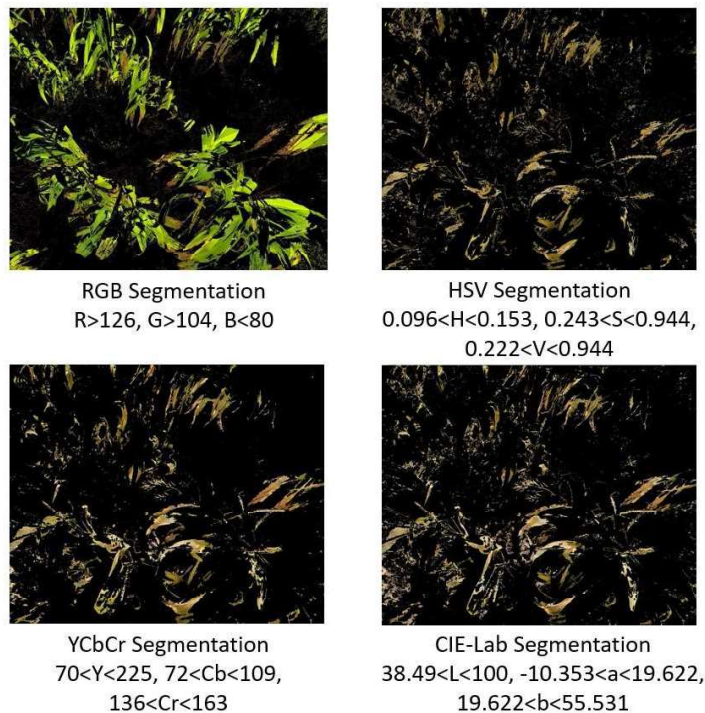


Figure 16. Segmentation methods with thresholds.

With the obtained thresholds, from the segmentation methods, a MATLAB code runs to analyze the images obtained from the flights made over the corn fields. First, an image is selected and then subjected to the thresholds of each method to identify dry leaves in the field.

Figure 17 displays the segmented images using the RGB, HSV, YCbCr and CIE-Lab methods. From the images obtained after applying the segmentation methods with the thresholds proposed in the previous section, it can be seen that using RGB segmentation to detect dry leaves is not very convenient as only some points were highlighted, while in the HSV segmentation method, a greater detection of dry leaves can be noted in the image of the crop; however, these highlighted points look like brush strokes, and the plant is not well distinguished. In the YCbCr segmentation, the dry leaves can be better identified in the plot; however, when it is compared with the original image, there are parts of the dry leaves of the plant that despite being dry, do not appear in the processed image. Finally, the

best detection is obtained when the CIE-Lab segmentation method is applied to the image, although it also detects a little of the soil, which does not represent a relevant issue.

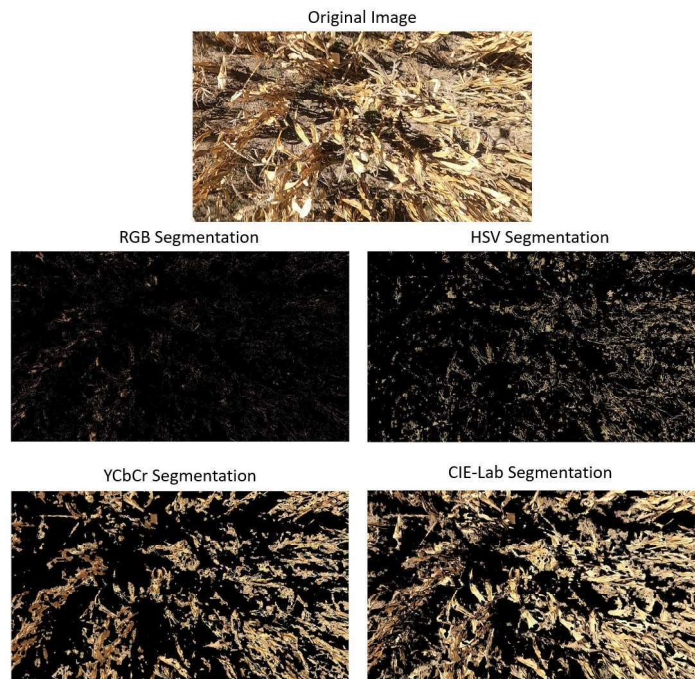


Figure 17. Segmentation methods applied.

The robustness provided to the proposed controller is necessary to improve the closed loop performance of the vehicle in outdoor environment. This improved performance is a crucial issue to the image capturing while the trajectory tracking task is executed by the UAV, allowing reduce distorted capture of the crops. In fact, when a PD controller is used to control the vehicle in order to capture the crop images, from ten experiments only six were satisfactory to stabilize the drone with the mounted camera. In contrast, for the robust backstepping control approach, all the tests were satisfactory, despite a gimbal or extra software not being used.

Furthermore, each processed image has an  $(x, y)$  coordinate, which is obtained with the real-time clock ('Time stamp' function) of the Pixhawk autopilot. Then, when an image with affected leaves is detected, the user obtains the relative position  $(x, y)$  of the chosen reference frame, and then the user can apply a corrective action, programming a trajectory whose final point corresponds to these coordinates.

## 7. Conclusions

The quadrotor trajectory tracking problem, in outdoor environment, is addressed by the proposed robust control scheme. The four controllers are synthesized using the robust backstepping approach, it uses virtual bounded inputs (the function  $\sin(\cdot)$ ), which produce bounded control signals, and it is appropriate to the physical constrains of the UAV. The convergence for altitude, translational and rotational UAV variables is guaranteed when the vehicle is subjected to vanishing disturbances. The proposed control algorithm achieves a higher performance in closed loop when is compared to a linearized model-based PD controller. This improved performance is a crucial issue to the image capturing while a trajectory tracking task is executed by the UAV, allowing to reduce the wrong capture of the crops, despite a gimbal or extra software not being used. In fact, the experimental results validate and confirm the aforementioned higher performance level of the proposed control algorithm. Moreover, the proposal presents a potential advantage in precision agriculture as it can prevent crop losses by identifying crop areas with dry leaves. In contrast to the

most of the reported works, our proposal was tested in a precision agriculture task on a real maize crop. Future work includes onboard image processing and to implement new image segmentation techniques.

**Author Contributions:** Conceptualization, L.R.-G. and O.-J.S.-S.; methodology, L.R.-G., O.-J.S.-S., H.R.-T. and J.-P.O.-O.; software, A.B.-M. and O.G.-P.; validation, A.B.-M., M.-O.O.-O. and O.G.-P.; formal analysis, L.R.-G. and O.-J.S.-S.; investigation, L.R.-G. and O.-J.S.-S.; writing—original draft preparation, writing—review and editing, all authors; project administration, funding acquisition, L.R.-G. and O.-J.S.-S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Data have been included in this paper.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Thanh, H.L.N.N.; Hong, S.K. Quadcopter robust adaptive second order sliding mode control based on PID sliding surface. *IEEE Access* **2018**, *6*, 66850–66860. [[CrossRef](#)]
2. Ononiwu, G.; Onojo, O.; Ozioko, O.; Nosiri, O. Quadcopter design for payload delivery. *J. Comput. Commun.* **2016**, *4*, 1–12. [[CrossRef](#)]
3. Duggal, V.; Sukhwani, M.; Bipin, K.; Syamasundar Reddy, G.; Madhava Krishna, K. Plantation monitoring and yield estimation using autonomous quadcopter for precision agriculture. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden, 16–21 May 2016; pp. 5121–5127.
4. Mogili, U.R.; Deepak, B. Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia Comput. Sci.* **2018**, *133*, 502–509. [[CrossRef](#)]
5. Kuantama, E.; Tarca, R.; Dzitac, S.; Dzitac, I.; Vesselenyi, T.; Tarca, I. The design and experimental development of air scanning using a sniffer Quadcopter. *Sensors* **2019**, *19*, 3849. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Rudin, K.; Hua, M.D.; Ducard, G.; Bouabdallah, S. A robust attitude controller and its application to quadrotor helicopters. *IFAC Proc. Vol.* **2011**, *44*, 10379–10384. [[CrossRef](#)]
7. Ramirez-Rodriguez, H.; Parra-Vega, V.; Sanchez-Orta, A.; Garcia-Salazar, O. Robust backstepping control based on integral sliding modes for tracking of quadrotors. *J. Intell. Robot. Syst.* **2014**, *73*, 55–66. [[CrossRef](#)]
8. Peng, C.; Bai, Y.; Gong, X.; Gao, Q.; Zhao, C.; Tian, Y. Modeling and robust backstepping sliding mode control with Adaptive RBFNN for a novel coaxial eight-rotor UAV. *IEEE/CAA J. Autom. Sin.* **2015**, *2*, 56–64.
9. Zhao, Y.; Sun, X.; Wang, G.; Fan, Y. Adaptive Backstepping Sliding Mode Tracking Control for Underactuated Unmanned Surface Vehicle With Disturbances and Input Saturation. *IEEE Access* **2021**, *9*, 1304–1312. [[CrossRef](#)]
10. Kim, N.S.; Kuc, T.Y. Sliding Mode Backstepping Control for Variable Mass Hexa-Rotor UAV. In Proceedings of the 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Busan, Korea, 13–16 October 2020; pp. 873–878.
11. García, O.; Ordaz, P.; Santos-Sánchez, O.J.; Salazar, S.; Lozano, R. Backstepping and Robust Control for a Quadrotor in Outdoors Environments: An Experimental Approach. *IEEE Access* **2019**, *7*, 40635–40648. [[CrossRef](#)]
12. Colorado, J.D.; Cera-Bornacelli, N.; Caldas, J.S.; Petro, E.; Rebolledo, M.C.; Cuellar, D.; Calderon, F.; Mondragon, I.F.; Jaramillo-Botero, A. Estimation of nitrogen in rice crops from UAV-captured images. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 3396. [[CrossRef](#)]
13. Cabecinhas, D.; Cunha, R.; Silvestre, C. A nonlinear quadrotor trajectory tracking controller with disturbance rejection. *Control Eng. Pract.* **2014**, *26*, 1–10. [[CrossRef](#)]
14. Vallejo-Alarcón, M.A.; Castro-Linares, R. Robust backstepping control for highly demanding quadrotor flight. *Control Eng. Appl. Inform.* **2020**, *22*, 51–62.
15. Aboudonia, A.; El-Badawy, A.; Rashad, R. Active anti-disturbance control of a quadrotor unmanned aerial vehicle using the command-filtering backstepping approach. *Nonlinear Dyn.* **2017**, *90*, 581–597. [[CrossRef](#)]
16. Zhang, J.; Gu, D.; Deng, C.; Wen, B. Robust and adaptive backstepping control for hexacopter UAVs. *IEEE Access* **2019**, *7*, 163502–163514. [[CrossRef](#)]
17. Dhadekar, D.D.; Sanghani, P.D.; Mangrulkar, K.; Talole, S. Robust control of quadrotor using uncertainty and disturbance estimation. *J. Intell. Robot. Syst.* **2021**, *101*, 1–21. [[CrossRef](#)]
18. Xuan-Mung, N.; Hong, S.K.; Nguyen, N.P.; Le, T.L. Autonomous quadcopter precision landing onto a heaving platform: New method and experiment. *IEEE Access* **2020**, *8*, 167192–167202. [[CrossRef](#)]
19. Derrouaoui, S.H.; Bouzid, Y.; Guiatni, M. Nonlinear robust control of a new reconfigurable unmanned aerial vehicle. *Robotics* **2021**, *10*, 76. [[CrossRef](#)]

20. de Morais, G.A.; Marcos, L.B.; Bueno, J.N.A.; de Resende, N.F.; Terra, M.H.; Grassi, V., Jr. Vision-based robust control framework based on deep reinforcement learning applied to autonomous ground vehicles. *Control Eng. Pract.* **2020**, *104*, 104630. [[CrossRef](#)]
21. Castillo, P.; Muñoz, L.; Santos, O. Robust control algorithm for a rotorcraft disturbed by crosswind. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **2014**, *50*, 756–763. [[CrossRef](#)]
22. Li, C.; Zhang, Y.; Li, P. Full control of a quadrotor using parameter-scheduled backstepping method: Implementation and experimental tests. *Nonlinear Dyn.* **2017**, *89*, 1259–1278. [[CrossRef](#)]
23. Mokhtari, M.R.; Cherki, B. A new robust control for minirotorcraft unmanned aerial vehicles. *ISA Trans.* **2015**, *56*, 86–101. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Mejias, L.; Dignet, J.P.; Dezan, C.; Campbell, D.; Kok, J.; Coppin, G. Embedded computation architectures for autonomy in Unmanned Aircraft Systems (UAS). *Sensors* **2021**, *21*, 1115. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. López-Labra, H.A.; Santos-Sánchez, O.J.; Rodríguez-Guerrero, L.; Ordaz-Oliver, J.P.; Cuvas-Castillo, C. Experimental results of optimal and robust control for uncertain linear time-delay systems. *J. Optim. Theory Appl.* **2019**, *181*, 1076–1089. [[CrossRef](#)]
26. Khalil, H.K. *Nonlinear Systems*, 3rd ed.; Prentice Hall: Hoboken, NJ, USA, 1996.
27. Hock, J.; Kranz, J.; Renfro, B. Studies on the epidemiology of the tar spot disease complex of maize in Mexico. *Plant Pathol.* **1995**, *44*, 490–502. [[CrossRef](#)]
28. Velusamy, P.; Rajendran, S.; Mahendran, R.K.; Naseer, S.; Shafiq, M.; Choi, J.G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges. *Energies* **2021**, *15*, 217. [[CrossRef](#)]
29. Kitpo, N.; Inoue, M. Early rice disease detection and position mapping system using drone and IoT architecture. In Proceedings of the 2018 12th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC), Yogyakarta, Indonesia, 12–13 March 2018; Volume 1, pp. 1–5.
30. Görlich, F.; Marks, E.; Mahlein, A.K.; König, K.; Lottes, P.; Stachniss, C. UAV-based classification of cercospora leaf spot using RGB images. *Drones* **2021**, *5*, 34. [[CrossRef](#)]
31. Castillo, P.; Lozano, R.; Dzul, A. *Modelling and Control of Mini-Flying Machines*, 1st ed.; Springer: London, UK, 2005.
32. Lozano, R. *Unmanned Aerial Vehicles: Embedded Control*, 1st ed.; Wiley-ISTE: London, UK, 2010.
33. Bouabdallah, S.; Siegwart, R. Full control of a quadrotor. In Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, 29 October–2 November 2007; pp. 153–158.
34. Svacha, J.; Mohta, K.; Kumar, V. Improving quadrotor trajectory tracking by compensating for aerodynamic effects. In Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, FL, USA, 13–16 June 2017; pp. 860–866.
35. Santos, O.; Romero, H.; Salazar, S.; Garcia, O. Optimized Discrete Control Law for Quadrotor Stabilization: Experimental Results. *J. Intell. Robot. Syst.* **2016**, *84*, 67–81. [[CrossRef](#)]
36. GoPro-Cameras. GoPro Inc. June 2022. Available online: <https://gopro.com/en/us/shop/cameras/hero8-black/CHDHX801-master.html> (accessed on 30 June 2022).
37. Kaganami, H.G.; Beiji, Z. Region-based segmentation versus edge detection. In Proceedings of the 2009 Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, Kyoto, Japan, 12–14 September 2009; pp. 1217–1221.

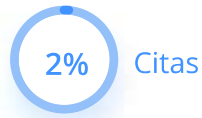
## **Apéndice C**

### **Análisis de similitud**

## Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida



### Coincidencias

Web fuentes 187

1	<b>www.intagri.com</b> <a href="https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-complejo-de-la-mancha-de-asfalto-en-el-cultivo-de-maiz">https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-complejo-de-la-mancha-de-asfalto-en-el-cultivo-de-maiz</a>	0.25%
2	<b>d-nb.info</b> <a href="https://d-nb.info/1019812915/34">https://d-nb.info/1019812915/34</a>	0.21%
3	<b>www.semanticscholar.org</b> <a href="https://www.semanticscholar.org/paper/Embedded-Computation-Architectures-for-Autonomy-in-Alvarez-Diguet/dcc3bcaa61...">https://www.semanticscholar.org/paper/Embedded-Computation-Architectures-for-Autonomy-in-Alvarez-Diguet/dcc3bcaa61...</a>	0.18%
4	<b>www.slideserve.com</b> <a href="https://www.slideserve.com/haruki/curso-taller-de-an-lisis-de-la-enfermedad-mancha-de-asfalto-del-ma-z">https://www.slideserve.com/haruki/curso-taller-de-an-lisis-de-la-enfermedad-mancha-de-asfalto-del-ma-z</a>	0.17%
5	<b>ctrl.cinvestav.mx</b> <a href="http://ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/DoTesACS.pdf">http://ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/DoTesACS.pdf</a>	0.16%
6	<b>repo.lib.tokushima-u.ac.jp</b> <a href="https://repo.lib.tokushima-u.ac.jp/files/public/10/109495/20170929143927783488/LID201602081002.pdf">https://repo.lib.tokushima-u.ac.jp/files/public/10/109495/20170929143927783488/LID201602081002.pdf</a>	0.16%
7	<b>www.yardeni.com</b> <a href="https://www.yardeni.com/pub/sp500margin.pdf">https://www.yardeni.com/pub/sp500margin.pdf</a>	0.16%
8	<b>anyflip.com</b> <a href="https://anyflip.com/rxpn/qmui/basic">https://anyflip.com/rxpn/qmui/basic</a>	0.16%
9	<b>www.oecd.org</b> <a href="https://www.oecd.org/dev/Global-Value-Chain-Development-Report-2019-Technological-Innovation-Supply-Chain-Trade-and...">https://www.oecd.org/dev/Global-Value-Chain-Development-Report-2019-Technological-Innovation-Supply-Chain-Trade-and...</a>	0.15%
10	<b>afu.kiev.ua</b> <a href="https://afu.kiev.ua/getfile.php?page_id=450&amp;num=9">https://afu.kiev.ua/getfile.php?page_id=450&amp;num=9</a>	0.15%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

11	<b>www.ecured.cu</b> <a href="https://www.ecured.cu/Teor%C3%ADa_del_color">https://www.ecured.cu/Teor%C3%ADa_del_color</a>	0.13%
12	<b>www.ngfs.net</b> <a href="https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_guide_for_supervisors.pdf">https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_guide_for_supervisors.pdf</a>	0.12%
13	<b>www.ecb.europa.eu</b> <a href="https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/mb201010_focus01.en.pdf">https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/mb201010_focus01.en.pdf</a>	0.12%
14	<b>humanhealth.iaea.org</b> <a href="https://humanhealth.iaea.org/HHW/Nutrition/Symposium2018/presentations/8.2.Yajnik.pdf">https://humanhealth.iaea.org/HHW/Nutrition/Symposium2018/presentations/8.2.Yajnik.pdf</a>	0.12%
15	<b>essuir.sumdu.edu.ua</b> <a href="https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/78496/1/Serbalyuk_Bachelous_paper_2020.pdf">https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/78496/1/Serbalyuk_Bachelous_paper_2020.pdf</a>	0.12%
16	<b>ro.uow.edu.au</b> <a href="https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=7396&amp;context=engpapers">https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=7396&amp;context=engpapers</a>	0.12%
17	<b>www.inei.gob.pe</b> <a href="https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0892/Libro.pdf">https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0892/Libro.pdf</a>	0.12%
18	<b>www.towerhamlets.gov.uk</b> <a href="https://www.towerhamlets.gov.uk/Documents/Borough_statistics/Labour_market/RB-2014-04-Skills-and-Qualifications-1.0.pdf">https://www.towerhamlets.gov.uk/Documents/Borough_statistics/Labour_market/RB-2014-04-Skills-and-Qualifications-1.0.pdf</a>	0.12%
19	<b>www.adb.org</b> <a href="https://www.adb.org/sites/default/files/publication/706641/financing-clean-energy-developing-asia.pdf">https://www.adb.org/sites/default/files/publication/706641/financing-clean-energy-developing-asia.pdf</a>	0.11%
20	<b>www.stonebarnscenter.org</b> <a href="https://www.stonebarnscenter.org/wp-content/uploads/2017/10/Grassfed_Full_v2.pdf">https://www.stonebarnscenter.org/wp-content/uploads/2017/10/Grassfed_Full_v2.pdf</a>	0.11%
21	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-022-13153-y">https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-022-13153-y</a>	0.1%
22	<b>www.iifc.org</b> <a href="https://www.iifc.org/proceedings/BBFS_2005/Concrete%20Members%20Strengthened%20in%20Shear%20or%20Torsion/D...">https://www.iifc.org/proceedings/BBFS_2005/Concrete%20Members%20Strengthened%20in%20Shear%20or%20Torsion/D...</a>	0.1%
23	<b>research-repository.uwa.edu.au</b> <a href="https://research-repository.uwa.edu.au/files/3236411/Landers_Grant_Justin_2002.pdf">https://research-repository.uwa.edu.au/files/3236411/Landers_Grant_Justin_2002.pdf</a>	0.1%
24	<b>www.medpac.gov</b> <a href="https://www.medpac.gov/wp-content/uploads/import_data/scrape_files/docs/default-source/meeting-materials/medicare-ou...">https://www.medpac.gov/wp-content/uploads/import_data/scrape_files/docs/default-source/meeting-materials/medicare-ou...</a>	0.1%
25	<b>monetary-policy-debates.bank.gov.ua</b> <a href="https://monetary-policy-debates.bank.gov.ua/admin_uploads/artide/White_paper_KS_2020.pdf?v=4">https://monetary-policy-debates.bank.gov.ua/admin_uploads/artide/White_paper_KS_2020.pdf?v=4</a>	0.1%
26	<b>www.cimac.com</b> <a href="https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/Recommendations/Recommendation_22.pdf">https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/Recommendations/Recommendation_22.pdf</a>	0.1%
27	<b>www.rba.gov.au</b> <a href="https://www.rba.gov.au/publications/conf/1997/pdf/conf-vol-1997.pdf">https://www.rba.gov.au/publications/conf/1997/pdf/conf-vol-1997.pdf</a>	0.1%
28	<b>cdn.intechopen.com</b> <a href="https://cdn.intechopen.com/pdfs/34315/InTech-lmc_filter_design_for_pid_controller_tuning_of_time_delayed_processes.pdf">https://cdn.intechopen.com/pdfs/34315/InTech-lmc_filter_design_for_pid_controller_tuning_of_time_delayed_processes.pdf</a>	0.1%
29	<b>iusp.org</b> <a href="https://iusp.org/sites/default/files/event_call_for_papers/Contraceptive%20Failure%20Unintended%20Births%20-%20Bra...">https://iusp.org/sites/default/files/event_call_for_papers/Contraceptive%20Failure%20Unintended%20Births%20-%20Bra...</a>	0.1%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

30	<b>ird.gov.ua</b> <a href="https://ird.gov.ua/irdp/p20190007.pdf">https://ird.gov.ua/irdp/p20190007.pdf</a>	0,1%
31	<b>essuir.sumdu.edu.ua</b> <a href="https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/66650/1/Samusevych_Reformuvannia_podatkovoi_systemy.pdf">https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/66650/1/Samusevych_Reformuvannia_podatkovoi_systemy.pdf</a>	0,1%
32	<b>www.fzt.haw-hamburg.de</b> <a href="https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030_PUB_DLRK_11-09-27.pdf">https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030_PUB_DLRK_11-09-27.pdf</a>	0,1%
33	<b>www.uzhnu.edu.ua</b> <a href="https://www.uzhnu.edu.ua/en/infocentre/get/8877">https://www.uzhnu.edu.ua/en/infocentre/get/8877</a>	0,1%
34	<b>assets.thermofisher.com</b> <a href="https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/Application-Notes/an-73186-lc-results-custom-injector-reduce-solvent-s...">https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/Application-Notes/an-73186-lc-results-custom-injector-reduce-solvent-s...</a>	0,1%
35	<b>www.yardeni.com</b> <a href="https://www.yardeni.com/pub/sp500earnyield.pdf">https://www.yardeni.com/pub/sp500earnyield.pdf</a>	0,1%
36	<b>rurik.com.ua</b> <a href="http://rurik.com.ua/documents/research/bonds_3_kv_2015.pdf">http://rurik.com.ua/documents/research/bonds_3_kv_2015.pdf</a>	0,1%
37	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/2079-9292/10/4/376">https://www.mdpi.com/2079-9292/10/4/376</a>	0,09%
38	<b>scholar.google.com</b> <a href="https://scholar.google.com/citations?user=upQQJgQAAAAJ">https://scholar.google.com/citations?user=upQQJgQAAAAJ</a>	0,09%
39	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-022-09913-3">https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-022-09913-3</a>	0,08%
40	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s41348-022-00612-9">https://link.springer.com/article/10.1007/s41348-022-00612-9</a>	0,08%
41	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-70272-8_26">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-70272-8_26</a>	0,08%
42	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-021-10061-9">https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-021-10061-9</a>	0,08%
43	<b>journals.plos.org</b> <a href="https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0196605">https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0196605</a>	0,08%
44	<b>robomechjournal.springeropen.com</b> <a href="https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-021-00197-2">https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-021-00197-2</a>	0,08%
45	<b>journal-bcs.springeropen.com</b> <a href="https://journal-bcs.springeropen.com/articles/10.1186/s13173-021-00117-7">https://journal-bcs.springeropen.com/articles/10.1186/s13173-021-00117-7</a>	0,07%
46	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s41315-022-00262-y">https://link.springer.com/article/10.1007/s41315-022-00262-y</a>	0,07%
47	<b>jneuroengrehab.biomedcentral.com</b> <a href="https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12984-016-0168-z">https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12984-016-0168-z</a>	0,07%
48	<b>dlnext.acm.org</b> <a href="https://dlnext.acm.org/doi/10.1016/j.compag.2021.106418">https://dlnext.acm.org/doi/10.1016/j.compag.2021.106418</a>	0,07%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

49	<b>www.cambridge.org</b> <a href="https://www.cambridge.org/core/journals/robotica/article/abs/investigating-reduced-path-planning-strategy-for-differential-w...">https://www.cambridge.org/core/journals/robotica/article/abs/investigating-reduced-path-planning-strategy-for-differential-w...</a>	0.07%
50	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s43154-020-00010-9">https://link.springer.com/article/10.1007/s43154-020-00010-9</a>	0.07%
51	<b>www.cs.rutgers.edu</b> <a href="https://www.cs.rutgers.edu/~kb572/pubs/userasasensor.pdf">https://www.cs.rutgers.edu/~kb572/pubs/userasasensor.pdf</a>	0.07%
52	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11721-012-0075-2">https://link.springer.com/article/10.1007/s11721-012-0075-2</a>	0.07%
53	<b>www.hindawi.com</b> <a href="https://www.hindawi.com/journals/ijae/2018/3481328/">https://www.hindawi.com/journals/ijae/2018/3481328/</a>	0.07%
54	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-021-01867-z">https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-021-01867-z</a>	0.07%
55	<b>github.com</b> <a href="https://github.com/yehengchen/Computer-Vision-and-Robotics-Paper-List">https://github.com/yehengchen/Computer-Vision-and-Robotics-Paper-List</a>	0.07%
56	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-020-09943-1">https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-020-09943-1</a>	0.07%
57	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s00371-021-02166-7">https://link.springer.com/article/10.1007/s00371-021-02166-7</a>	0.07%
58	<b>groups.csail.mit.edu</b> <a href="https://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/index.php?title=Soft_Robotics">https://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/index.php?title=Soft_Robotics</a>	0.07%
59	<b>www.ncbi.nlm.nih.gov</b> <a href="https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7160724/">https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7160724/</a>	0.07%
60	<b>www.frontiersin.org</b> <a href="https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.611940/full">https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.611940/full</a>	0.07%
61	<b>plantmethods.biomedcentral.com</b> <a href="https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-019-0490-0">https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-019-0490-0</a>	0.07%
62	<b>patents.google.com</b> <a href="https://patents.google.com/patent/US8208719B2/en">https://patents.google.com/patent/US8208719B2/en</a>	0.07%
63	<b>royalsocietypublishing.org</b> <a href="https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsif.2013.0984">https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsif.2013.0984</a>	0.07%
64	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/2079-9292/10/14/1631/htm">https://www.mdpi.com/2079-9292/10/14/1631/htm</a>	0.07%
65	<b>dspace.nbu.gov.ua</b> <a href="http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/19218/07-Baras.pdf?sequence=1">http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/19218/07-Baras.pdf?sequence=1</a>	0.07%
66	<b>techxplore.com</b> <a href="https://techxplore.com/news/2022-03-b-gap-simulation-method-autonomous-vehicles.html">https://techxplore.com/news/2022-03-b-gap-simulation-method-autonomous-vehicles.html</a>	0.07%
67	<b>sunghoonim.github.io</b> <a href="https://sunghoonim.github.io/">https://sunghoonim.github.io/</a>	0.07%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

68	<b>www.sciencedirect.com</b> <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917308803">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917308803</a>	0.07%
69	<b>pubag.nal.usda.gov</b> <a href="https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7153799/citation">https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7153799/citation</a>	0.06%
70	<b>3dbodyscanning.org</b> <a href="http://3dbodyscanning.org/cap/papers/2016/16286petkovic.pdf">http://3dbodyscanning.org/cap/papers/2016/16286petkovic.pdf</a>	0.06%
71	<b>www.semanticscholar.org</b> <a href="https://www.semanticscholar.org/paper/Quadcopter-Robust-Adaptive-Second-Order-Sliding-on-Thanh-Hong/d6aefc5cfbd57...">https://www.semanticscholar.org/paper/Quadcopter-Robust-Adaptive-Second-Order-Sliding-on-Thanh-Hong/d6aefc5cfbd57...</a>	0.05%
72	<b>www.azorobotics.com</b> <a href="https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=417">https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=417</a>	0.05%
73	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-020-3084-1">https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-020-3084-1</a>	0.05%
74	<b>repiica.iica.int</b> <a href="http://repiica.iica.int/DOCS/B3473E/B3473E.PDF">http://repiica.iica.int/DOCS/B3473E/B3473E.PDF</a>	0.05%
75	<b>dialnet.unirioja.es</b> <a href="https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4557889">https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4557889</a>	0.05%
76	<b>www.uaeh.edu.mx</b> <a href="https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Redes%20inalambricas%20wireless%20LAN.pdf">https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Redes%20inalambricas%20wireless%20LAN.pdf</a>	0.05%
77	<b>www.nmimsindore.org</b> <a href="https://www.nmimsindore.org/docs/2610/B.%20Tech%20CSBS%20Sem-II%202021-22.pdf">https://www.nmimsindore.org/docs/2610/B.%20Tech%20CSBS%20Sem-II%202021-22.pdf</a>	0.05%
78	<b>www.etiquetasenrollo.mx</b> <a href="https://www.etiquetasenrollo.mx/2016/10/propiedades-del-color-luminosidad-o-valor/">https://www.etiquetasenrollo.mx/2016/10/propiedades-del-color-luminosidad-o-valor/</a>	0.05%
79	<b>www.soz.unibe.ch</b> <a href="https://www.soz.unibe.ch/ueber_uns/personen/jann/classes_by_ben_jann/e131539/e131541/ZA08_handout_ger.pdf">https://www.soz.unibe.ch/ueber_uns/personen/jann/classes_by_ben_jann/e131539/e131541/ZA08_handout_ger.pdf</a>	0.05%
80	<b>evercar.pp.ua</b> <a href="https://evercar.pp.ua/jaki-buvajut-vidi-pedagogichnogo-eksperimentu/">https://evercar.pp.ua/jaki-buvajut-vidi-pedagogichnogo-eksperimentu/</a>	0.05%
81	<b>es.slideshare.net</b> <a href="https://es.slideshare.net/ccordjim/como-elegir-estrategias">https://es.slideshare.net/ccordjim/como-elegir-estrategias</a>	0.05%
82	<b>www.ctrl.cinvestav.mx</b> <a href="http://www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/MaTesAG.pdf">http://www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/MaTesAG.pdf</a>	0.05%
83	<b>dspace.wunu.edu.ua</b> <a href="http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/3208/1/dis%20Burdenyk%20T.G..doc.pdf">http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/3208/1/dis%20Burdenyk%20T.G..doc.pdf</a>	0.05%
84	<b>en.wikipedia.org</b> <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Oxidation_state">https://en.wikipedia.org/wiki/Oxidation_state</a>	0.05%
85	<b>www.icet.ac.in</b> <a href="http://www.icet.ac.in/Uploads/Downloads/machine%20learning%20cs467-converted.pdf">http://www.icet.ac.in/Uploads/Downloads/machine%20learning%20cs467-converted.pdf</a>	0.05%
86	<b>economics.harvard.edu</b> <a href="https://economics.harvard.edu/files/economics/files/bar_talk_3_20.pdf">https://economics.harvard.edu/files/economics/files/bar_talk_3_20.pdf</a>	0.05%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

87	<b>documents1.worldbank.org</b> <a href="https://documents1.worldbank.org/curated/en/650851468288636753/pdf/Indus-basin-of-Pakistan-impacts-of-climate-risks-...">https://documents1.worldbank.org/curated/en/650851468288636753/pdf/Indus-basin-of-Pakistan-impacts-of-climate-risks-...</a>	0.05%
88	<b>ukutabs.com</b> <a href="https://ukutabs.com/Mouis-armstrong/what-a-wonderful-world/">https://ukutabs.com/Mouis-armstrong/what-a-wonderful-world/</a>	0.05%
89	<b>desarrolloweb.com</b> <a href="https://desarrolloweb.com/articulos/1503.php">https://desarrolloweb.com/articulos/1503.php</a>	0.05%
90	<b>deepblue.lib.umich.edu</b> <a href="https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/45313/10979_2005_Article_BF01499374.pdf?sequence=1">https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/45313/10979_2005_Article_BF01499374.pdf?sequence=1</a>	0.05%
91	<b>coloresclaritos.tumblr.com</b> <a href="https://coloresclaritos.tumblr.com/post/188564154199/caracter%C3%ADsticas-de-color-brillo-luminosidad-o">https://coloresclaritos.tumblr.com/post/188564154199/caracter%C3%ADsticas-de-color-brillo-luminosidad-o</a>	0.05%
92	<b>ocw.innova.uned.es</b> <a href="http://ocw.innova.uned.es/matematicas-industriales/contenidos/pdf/tema6.pdf">http://ocw.innova.uned.es/matematicas-industriales/contenidos/pdf/tema6.pdf</a>	0.05%
93	<b>aleph.org.mx</b> <a href="https://aleph.org.mx/que-es-el-brillo-o-luminosidad">https://aleph.org.mx/que-es-el-brillo-o-luminosidad</a>	0.05%
94	<b>www.ingenieros.es</b> <a href="https://www.ingenieros.es/files/proyectos/REE_Renovables_2016.pdf">https://www.ingenieros.es/files/proyectos/REE_Renovables_2016.pdf</a>	0.05%
95	<b>8disosvita.blogspot.com</b> <a href="https://8disosvita.blogspot.com/">https://8disosvita.blogspot.com/</a>	0.05%
96	<b>www.proyectacolor.cl</b> <a href="http://www.proyectacolor.cl/teoria-de-los-colores/propiedades-de-los-colores/">http://www.proyectacolor.cl/teoria-de-los-colores/propiedades-de-los-colores/</a>	0.05%
97	<b>ukutabs.com</b> <a href="https://ukutabs.com/s/shiloh-dynasty/losing-interest/">https://ukutabs.com/s/shiloh-dynasty/losing-interest/</a>	0.05%
98	<b>www.ncbi.nlm.nih.gov</b> <a href="https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7724774/">https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7724774/</a>	0.05%
99	<b>www.educba.com</b> <a href="https://www.educba.com/integer-formula/">https://www.educba.com/integer-formula/</a>	0.05%
100	<b>ukutabs.com</b> <a href="https://ukutabs.com/b/billie-eilish/ocean-eyes/">https://ukutabs.com/b/billie-eilish/ocean-eyes/</a>	0.05%
101	<b>softmath.com</b> <a href="https://softmath.com/">https://softmath.com/</a>	0.05%
102	<b>mylibrary.org</b> <a href="https://mylibrary.org/exam/interval-notation-worksheet-answer-key">https://mylibrary.org/exam/interval-notation-worksheet-answer-key</a>	0.05%
103	<b>ukutabs.com</b> <a href="https://ukutabs.com/a/ajr/worlds-smallest-violin/">https://ukutabs.com/a/ajr/worlds-smallest-violin/</a>	0.05%
104	<b>www.dalalinstitute.com</b> <a href="https://www.dalalinstitute.com/wp-content/uploads/Books/A-Textbook-of-Inorganic-Chemistry-Volume-1/ATOICV1-8-0-Elec...">https://www.dalalinstitute.com/wp-content/uploads/Books/A-Textbook-of-Inorganic-Chemistry-Volume-1/ATOICV1-8-0-Elec...</a>	0.05%
105	<b>journal.r-project.org</b> <a href="https://journal.r-project.org/archive/2010-2/RJournal_2010-2_Soetaert-et-al.pdf">https://journal.r-project.org/archive/2010-2/RJournal_2010-2_Soetaert-et-al.pdf</a>	0.05%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

106	<b>www.educacion.gob.es</b> <a href="https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=5FBWEZdQ9yQ%3D">https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=5FBWEZdQ9yQ%3D</a>	0.05%
107	<b>ukutabs.com</b> <a href="https://ukutabs.com/t/tears-for-fears/everybody-wants-to-rule-the-world/">https://ukutabs.com/t/tears-for-fears/everybody-wants-to-rule-the-world/</a>	0.05%
108	<b>www.bea.gov</b> <a href="https://www.bea.gov/sites/default/files/papers/defining-and-measuring-the-digital-economy.pdf">https://www.bea.gov/sites/default/files/papers/defining-and-measuring-the-digital-economy.pdf</a>	0.05%
109	<b>journals.ametsoc.org</b> <a href="https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/2/BAMS-D-18-0341.1.xml">https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/2/BAMS-D-18-0341.1.xml</a>	0.04%
110	<b>www.sciencedirect.com</b> <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016452808">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016452808</a>	0.04%
111	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/2072-4292/14/22/5820/htm">https://www.mdpi.com/2072-4292/14/22/5820/htm</a>	0.04%
112	<b>chembioagro.springeropen.com</b> <a href="https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-021-00217-8">https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-021-00217-8</a>	0.04%
113	<b>ingenieros.es</b> <a href="http://ingenieros.es/files/proyectos/REE_Renovables_2016.pdf">http://ingenieros.es/files/proyectos/REE_Renovables_2016.pdf</a>	0.04%
114	<b>dgsa.uaeh.edu.mx:8080</b> <a href="http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/biblioteca/digital/bitstream/handle/231104/2038/AT18477.pdf">http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/biblioteca/digital/bitstream/handle/231104/2038/AT18477.pdf</a>	0.04%
115	<b>psicologiyamente.com</b> <a href="https://psicologiyamente.com/desarrollo/diagnostico-psicopedagogico">https://psicologiyamente.com/desarrollo/diagnostico-psicopedagogico</a>	0.04%
116	<b>pdfs.semanticscholar.org</b> <a href="https://pdfs.semanticscholar.org/0506/c25682b9ff87b6694aa22817f7ef3dc7107d.pdf">https://pdfs.semanticscholar.org/0506/c25682b9ff87b6694aa22817f7ef3dc7107d.pdf</a>	0.04%
117	<b>aufop.blogspot.com</b> <a href="https://aufop.blogspot.com/2013/07/nuevas-referencias-de-la-revista.html">https://aufop.blogspot.com/2013/07/nuevas-referencias-de-la-revista.html</a>	0.04%
118	<b>www.uaeh.edu.mx</b> <a href="https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icea/LI_ComOrga/Dolores_Nava/ponencia.pdf">https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icea/LI_ComOrga/Dolores_Nava/ponencia.pdf</a>	0.04%
119	<b>dergipark.org.tr</b> <a href="https://dergipark.org.tr/en/pub/ejosat/issue/43603/507222">https://dergipark.org.tr/en/pub/ejosat/issue/43603/507222</a>	0.04%
120	<b>www.geniolandia.com</b> <a href="https://www.geniolandia.com/13070992/como-averiguar-la-energia-de-un-mol-de-un-foton">https://www.geniolandia.com/13070992/como-averiguar-la-energia-de-un-mol-de-un-foton</a>	0.04%
121	<b>www.ecb.europa.eu</b> <a href="https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/pp47-60_mb200504en.pdf">https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/pp47-60_mb200504en.pdf</a>	0.04%
122	<b>ukutabs.com</b> <a href="https://ukutabs.com/b/bryant-oden/the-duck-song/">https://ukutabs.com/b/bryant-oden/the-duck-song/</a>	0.04%
123	<b>www.theccc.org.uk</b> <a href="https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/06/CCC-2018-Progress-Report-to-Parliament.pdf">https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/06/CCC-2018-Progress-Report-to-Parliament.pdf</a>	0.03%
124	<b>xpertscientific.com</b> <a href="https://xpertscientific.com/journal-abbreviations/">https://xpertscientific.com/journal-abbreviations/</a>	0.03%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

125	<b>wikicars.org</b> <a href="https://wikicars.org/en/Motor_oil">https://wikicars.org/en/Motor_oil</a>	0.03%
126	<b>dspace.tnpu.edu.ua</b> <a href="http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/11457/1/Tsys_diser.pdf">http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/11457/1/Tsys_diser.pdf</a>	0.03%
127	<b>www.mnau.edu.ua</b> <a href="https://www.mnau.edu.ua/files/spec_vchen_rad/k_38_806_03/aref_lytovchenko.pdf">https://www.mnau.edu.ua/files/spec_vchen_rad/k_38_806_03/aref_lytovchenko.pdf</a>	0.03%
128	<b>www.policia.gov.co</b> <a href="https://www.policia.gov.co/sites/default/files/24-TUBERCULOSIS.pdf">https://www.policia.gov.co/sites/default/files/24-TUBERCULOSIS.pdf</a>	0.03%
129	<b>www.jmir.org</b> <a href="https://www.jmir.org/2021/11/e26522">https://www.jmir.org/2021/11/e26522</a>	0.03%
130	<b>criminnet.ugr.es</b> <a href="http://criminnet.ugr.es/recpc/13/recpc13-03.pdf">http://criminnet.ugr.es/recpc/13/recpc13-03.pdf</a>	0.03%
131	<b>seap.taylors.edu.my</b> <a href="https://seap.taylors.edu.my/file/remspublication/109566_7215_1.pdf">https://seap.taylors.edu.my/file/remspublication/109566_7215_1.pdf</a>	0.03%
132	<b>zagan.unizar.es</b> <a href="https://zagan.unizar.es/record/61053/files/TAZ-TFG-2016-4580.pdf">https://zagan.unizar.es/record/61053/files/TAZ-TFG-2016-4580.pdf</a>	0.03%
133	<b>www.sciencedirect.com</b> <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271622000934">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271622000934</a>	0.03%
134	<b>www2.mdpi.com</b> <a href="https://www2.mdpi.com/1996-1073/13/1/243/htm">https://www2.mdpi.com/1996-1073/13/1/243/htm</a>	0.03%
135	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/13998/html">https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/13998/html</a>	0.03%
136	<b>udhtu.edu.ua</b> <a href="https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/08/MB_1964_PZ_9TM_kinetika.pdf">https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/08/MB_1964_PZ_9TM_kinetika.pdf</a>	0.03%
137	<b>www.yourmechanic.com</b> <a href="https://www.yourmechanic.com/article/how-the-engine-lubrication-system-works">https://www.yourmechanic.com/article/how-the-engine-lubrication-system-works</a>	0.03%
138	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/1424-8220/22/22/8791/htm">https://www.mdpi.com/1424-8220/22/22/8791/htm</a>	0.03%
139	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/8219/htm">https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/8219/htm</a>	0.03%
140	<b>www.skeptic.in.ua</b> <a href="https://www.skeptic.in.ua/wp-content/uploads/HRH-situational-analysis-2019.pdf">https://www.skeptic.in.ua/wp-content/uploads/HRH-situational-analysis-2019.pdf</a>	0.03%
141	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/13998/htm">https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/13998/htm</a>	0.03%
142	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/2072-4292/14/22/5635/htm">https://www.mdpi.com/2072-4292/14/22/5635/htm</a>	0.03%
143	<b>www.un.org</b> <a href="https://www.un.org/en/development/desa/policy/mdg_gap/mdg_gap_archive/mdg8report2010_ruw.pdf">https://www.un.org/en/development/desa/policy/mdg_gap/mdg_gap_archive/mdg8report2010_ruw.pdf</a>	0.03%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

144	<b>www.ucipfg.com</b> <a href="https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-1/presentaciones/CORRELACION_LIN...">https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-1/presentaciones/CORRELACION_LIN...</a>	0.03%
145	<b>www.slideshare.net</b> <a href="https://www.slideshare.net/amitkapoor/jammu-and-kashmir-15007683">https://www.slideshare.net/amitkapoor/jammu-and-kashmir-15007683</a>	0.03%
146	<b>storage.googleapis.com</b> <a href="https://storage.googleapis.com/storage-cweb/annual-report/2018/file-2019-07-10-66554454-aca3-4b32-bdfa-f79a9f638e37.pdf">https://storage.googleapis.com/storage-cweb/annual-report/2018/file-2019-07-10-66554454-aca3-4b32-bdfa-f79a9f638e37.pdf</a>	0.03%
147	<b>www.mdpi.com</b> <a href="https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/115210/htm">https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/115210/htm</a>	0.03%
148	<b>eprints.rclis.org</b> <a href="http://eprints.rclis.org/22623/1/NinaShrestha.pdf">http://eprints.rclis.org/22623/1/NinaShrestha.pdf</a>	0.03%
149	<b>razumkov.org.ua</b> <a href="https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_LUD_KAPITAL.pdf">https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_LUD_KAPITAL.pdf</a>	0.03%
150	<b>inmad.vntu.edu.ua</b> <a href="http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/98920D5B-A7CB-40F6-9C77-1A5A69EC00B1.pdf">http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/98920D5B-A7CB-40F6-9C77-1A5A69EC00B1.pdf</a>	0.03%
151	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-76876-2_8">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-76876-2_8</a>	0.03%
152	<b>dfrieds.com</b> <a href="https://dfrieds.com/math/spearmans-correlation.html">https://dfrieds.com/math/spearmans-correlation.html</a>	0.03%
153	<b>www.brandsworld.co.th</b> <a href="https://www.brandsworld.co.th/content/dam/brands/thailand/whats-new/Events/BRANDSHealth_ConferenceDay1/9%20%E...">https://www.brandsworld.co.th/content/dam/brands/thailand/whats-new/Events/BRANDSHealth_ConferenceDay1/9%20%E...</a>	0.03%
154	<b>dl.acm.org</b> <a href="https://dl.acm.org/doi/10.1145/3310194">https://dl.acm.org/doi/10.1145/3310194</a>	0.03%
155	<b>mmgh.kname.edu.ua</b> <a href="https://mmgh.kname.edu.ua/images/pdf/_---.pdf">https://mmgh.kname.edu.ua/images/pdf/_---.pdf</a>	0.03%
156	<b>list.gr.ssr.upm.es</b> <a href="https://list.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/rdpr/apuntes/apuntes_tema2.pdf">https://list.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/rdpr/apuntes/apuntes_tema2.pdf</a>	0.03%
157	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-7067-0_39">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-7067-0_39</a>	0.03%
158	<b>elprivod.nmu.org.ua</b> <a href="https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds_matlab.pdf">https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds_matlab.pdf</a>	0.03%
159	<b>repositorij.erf.unizg.hr</b> <a href="https://repositorij.erf.unizg.hr/islandora/object/erf:437/datastream/PDF/download">https://repositorij.erf.unizg.hr/islandora/object/erf:437/datastream/PDF/download</a>	0.03%
160	<b>link.springer.com</b> <a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-58811-3_62">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-58811-3_62</a>	0.03%
161	<b>encontraruniversidad.mx</b> <a href="https://encontraruniversidad.mx/universidad-autonoma-del-estado-de-hidalgo/ingenieria-civil">https://encontraruniversidad.mx/universidad-autonoma-del-estado-de-hidalgo/ingenieria-civil</a>	0.03%
162	<b>es.wikipedia.org</b> <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Tono_(color)">https://es.wikipedia.org/wiki/Tono_(color)</a>	0.03%



# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

182	<b>asmedigitalcollection.asme.org</b> <a href="https://asmedigitalcollection.asme.org/appliedmechanicsreviews/article/70/1/010802/443694/Redundancy-in-Parallel-Mech...">https://asmedigitalcollection.asme.org/appliedmechanicsreviews/article/70/1/010802/443694/Redundancy-in-Parallel-Mech...</a>	0.03%
183	<b>www.grawe.ua</b> <a href="https://www.grawe.ua/fileadmin/grawe_ua/Downloads/Booklets_new_2021/Programmy_i_pravila.pdf">https://www.grawe.ua/fileadmin/grawe_ua/Downloads/Booklets_new_2021/Programmy_i_pravila.pdf</a>	0.03%
184	<b>www.gov.bm</b> <a href="https://www.gov.bm/sites/default/files/2022%20EW%2045%20Surveillance%20Summary%20Report%20%286%20Novembe...">https://www.gov.bm/sites/default/files/2022%20EW%2045%20Surveillance%20Summary%20Report%20%286%20Novembe...</a>	0.03%
185	<b>openaccess.thecvf.com</b> <a href="https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2021W/AVision/papers/Chen_Visual_Reasoning_Using_Graph_Convolutiona...">https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2021W/AVision/papers/Chen_Visual_Reasoning_Using_Graph_Convolutiona...</a>	0.03%
186	<b>dl.acm.org</b> <a href="https://dl.acm.org/profile/99659373601">https://dl.acm.org/profile/99659373601</a>	0.03%
187	<b>www.sciencedirect.com</b> <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003442570100342X">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003442570100342X</a>	0.02%

# Tesis Alejandro Benitez

Cargado: 11/21/2022 | Verificado: 11/21/2022

● Coincidencias ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

## Citas

Citas incluidas

7

- 1 La matriz de rotación  $R$ , se define conforme a las matrices de rotación de cada eje; primero se define a la matriz de rotación con respecto al eje  $x(R_x, \varphi)$ , a continuación, la matriz de rotación del eje  $y$  ( $R_y, \theta$ ) y para finalizar la matriz la correspondiente al eje  $z(R_z, \psi)$   
 $R_x, \varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\varphi & S\varphi \\ 0 & -S\varphi & C\varphi \end{bmatrix}$   $R_y, \theta = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix}$   $R_z, \psi = \begin{bmatrix} C\psi & S\psi & 0 \\ -S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , donde  $C\varphi = \cos(\varphi)$ ,  $C\theta = \cos(\theta)$ ,  $C\psi = \cos(\psi)$ ,  $S\varphi = \sin(\varphi)$ ,  $S\theta = \sin(\theta)$ ,  $S\psi = \sin(\psi)$ .
- 2 Despejando a  $\varphi$ ,  $\theta$ , y  $\psi$  de (2.12) se obtiene  $\varphi = \arctan\left(\frac{\tau\psi}{(y-l_z)}\right)$   $\theta = \arctan\left(\frac{\psi(l_x-l_z)}{l_x+l_y}\right)$   $\psi = \arctan\left(\frac{\tau\theta}{(l_y-l_x)}\right)$   $\tau\psi$ .
- 3 2.5.1. Modelo de color HSV El modelo de color HSV ("Hue, Saturation, Value") o HSB ("Hue, Saturation, Brightness") caracteriza al color en términos de Matiz (Hue) que representa la esencia del color, Saturación (Saturation) que representa la pureza del color y la Intensidad (Value, Brightness) que representa el brillo del color [54].
- 4 2.8. Descripción de la plataforma La plataforma es un cuadricóptero (Fig. 2.6), el cual, entra en la clasificación de los VANTS, el cual funciona debido a unas hélices acopladas a motores sin escobillas que les permite mantenerse y propulsarse en el aire.
- 5 Todos estos movimientos se controlan ajustando la propulsión de cada propela mediante un dispositivo electrónico programable denominado controlador de vuelo o autopiloto (Pixhawk), cuya función principal es que el cuadricóptero mantenga un vuelo lo más estable posible.
- 6 Para este procesamiento se utiliza la librería de segmentación del color (Color Thresholding) de Matlab, con la que se pueden seleccionar las áreas de interés en la imágenes a analizar con base en los espacios de color (RGB, HSV, YCbCr y CIE-Lab), esto se realiza aplicando la segmentación en imágenes.
- 7 Antes de empezar a realizar las simulaciones en el sistema, se deben proponer y probar valores para las constantes de los controladores en el sistema para ver si estabilizan el sistema (Tablas A.1 y A.2).

## Referencias

- 1 [1] O. García, P. Ordaz, O.-J. Santos-Sánchez, S. Salazar, and R. Lozano. Backstepping and robust control for a quadrotor in outdoors environments: An experimental approach. *IEEE Access*, 7(1):40636, February 2019. [2] Konica Minolta. Medición de color de una fuente de luz. *Sensing Americas*, Jan 2021. Accedido 18-08-2021. [3] W. Urueña, J. Cortes, and J. Vargas. Técnicas alternativas para la conversión de imágenes a color a escala de grises en el tratamiento digital de imágenes. *Scientia et Technica*, 1(47), Abril 2011. [4] Beatrizxe. La teoría del color. *beatrizxe.com*, Oct 2021. Accedido 22-11-2021. [5] Konica Minolta. Entendiendo el espacio de color cie-lab. *Sensing Americas*, Feb 2021. Accedido 25-03-2021. [6] Ardupilot. *ardupilot.org*. <https://ardupilot.org/copter/docs/>, Jan 2019. Accedido 30-01-2020. [7] McCormick Power Technology. Todos los datos sobre la producción del maíz en el mundo. <https://mccormick.it/mx>, May 2020. Accedido 14-12-2021. [8] Secretaría de Agricultura. Maíz el cultivo de México. [url:http://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-el-cultivo-de-mexico?idiom=es](http://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-el-cultivo-de-mexico?idiom=es), 2020. Accedido 10-05-2021. [9] Intagri. El complejo de la mancha de asfalto en el cultivo de maíz. Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura, Jan 2020. Accedido 15-02-2020. [10] CIMMYT. Enfermedades del maíz: una guía para su identificación en el campo. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 4 edition, 2004. Accedido 11-05-2021. [11] S. Sindhuja, A. Mishra, R. Ehsani, and C. Davis. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Comput. Electron. Agric.*, 72:1–13, 2010. 73 74 Bibliografía [12] M. Mirik, D.C. Jones, J.A. Price, F. Workneh, R.J. Ansley, and C.M. Rush. Satellite remote sensing of wheat infected by wheat streak mosaic virus. *Plant Dis*, 1(95):4–12, 2011. [13] L. Han, M. Salman-Haleem, and M. Taylor. Automatic detection and severity assessment of crop diseases using image pattern recognition. Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016. [14] M. Borengasser, W.S. Hungate, and R. Watkins. *Hyperspectral Remote Sensing: Principles and Applications*. CRC Press, Florida, USA, 2008. [15] Parrot Sequoia. Parrot sequoia+ multispectral sensor. [www.dronenersds.com](http://www.dronenersds.com), May 2021. [16] P4Multispectral. [godron.mx](https://tienda.godron.mx). <https://tienda.godron.mx>, May 2022. [17] C.H. Bock, G.H. Poole, P.E. Parker, and T.R. Gottwald. Plant disease severity estimated visually, by digital photography and image analysis, and by hyperspectral imaging. *Critical Reviews in Plant sciences*, 29(2):59–107, March 2010. [18] J.H. Lenhe, E.-C. Oerke, and H.-W. Dehne. Digital infrared thermography for monitoring canopy health of wheat. *Precision Agriculture*, 8:15–26, March 2007. [19] H.G. Jones, M. Stoll, T. Santos, and C. Sousa. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53(378):2249–2260, November 2002. [20] A.K. Mahlein. Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2):241–251, February 2016. [21] P.J. Zarco-Tejada, J.A.J. Berni, and L. Suarez. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 113(6):1262–1275, June 2009. [22] S. Cogliati, M. Rossini, and M. Meroni. Continuous and long-term measurements of reflectance and sun-induced chlorophyll fluorescence by using novel automated field spectroscopy systems. *Remote Sensing of Environment*, 164(6):270–281, July 2015. [23] T. Adao, J. Hruska, L. Padua, J. Bessa, and E. Perez. Hyperspectral imaging: A review on uav-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sensing*, 9(110):1–30, October 2017. Bibliografía 75 [24] T. Hilker, N.C. Coops, M.A. Wulder, T.A. Black, and R.D. Guy. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. *Science of The Total Environment*, 404(2–3):411–423, October 2008. [25] E. Boegh, H. Dpegaard, N. Broge, N.O. Jensen, K. Schelde, and A. Thomsen. Airborne multispectral data for quantifying leaf area