



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO

**PROGRAMA DE SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN
AÉREA Y SUBMARINA**

**“Sistema de control robusto adaptable para un multirroto
aplicado en el monitoreo de estrés hídrico de
vegetación usando termografía”**

T E S I S

QUE PRESENTA

CAMILA SOFIA SANCHEZ GARCIA

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN
SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN
AÉREA Y SUBMARINA**

DIRECTORES DE LA TESIS

**DR. JORGE SAID CERVANTES ROJAS
DR. EDUARDO STEED ESPINOZA QUESADA**

Agradecimientos

A mis padres, que fueron un pilar fundamental en mi formación y me motivan a seguir mis sueños y a creer en ellos, no hay palabras para agradecerles por todo el apoyo incondicional en todo momento. A mi hermano por estar para mí en los momentos difíciles.

Quiero agradecer a mis abuelitos, por ser un pilar demasiado importante en mi vida e inspirarme en todo momento, a pesar de la distancia. Agradezco cada una de sus palabras de aliento y su presencia en mi vida personal y profesional.

A Horus, por siempre acompañarme en esas noches de desvelo, por siempre transmitirme su alegría y a su manera siempre motivarme a continuar.

Agradezco a mis asesores, el Dr. Jorge Said Cervantes Rojas y el Dr Eduardo Steed Espinoza Quesada por todas las enseñanzas brindadas y el tiempo dedicado en el desarrollo de este trabajo de investigación y por creer en mí.

A Rigel, por sus consejos a lo largo de la maestría, por la paciencia a la hora de hacer trabajos en equipo y por su apoyo. Gracias por brindarme su amistad sincera y por estar en los momentos de alegría y no tanta alegría durante este tiempo.

A Erick, por su participación y aportes fundamentales en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos y compañeros de laboratorio, por sus consejos y apoyo brindado durante este tiempo de maestría, por todas las anécdotas vividas.

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada para continuar con mis estudios de posgrados.

Mi más sincero agradecimiento al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) por abrirme sus puertas y permitirme continuar con mi formación académica.

Gracias al Laboratorio de Sistemas Autónomos de Navegación Aérea y Submarina (SANAS) por la oportunidad brindada de continuar con mi formación académica.

Finalmente, quiero agradecerme por no desistir y siempre creer en mí en todo momento.

Dedicatorias

Este trabajo quiero dedicárselo mis abuelitos Bibis y Paquis y a mis padres.

“El peor enemigo del conocimiento no es la ignorancia, es la ilusión del conocimiento.”

– Stephen Hawking

Resumen

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT o del inglés *Unmanned Aircraft Vehicle*, UAV), han tenido un papel crucial en la agricultura de precisión, facilitando diversas actividades dentro del campo al combinar e integrar diferentes tecnologías como la inteligencia artificial, Internet de las Cosas (IoT) y visión artificial. Algunas de sus aplicaciones más destacadas son el monitoreo, riego y mapeo de cultivos. El índice de estrés hídrico (del inglés *Crop Water Stress Index*, abreviado CWSI), es de las formas más efectivas de conocer si un cultivo se encuentra en buen estado. Se basa en las mediciones de temperatura de la planta y del entorno a partir de imágenes termográficas, que pueden obtenerse por medio de satélites o de cámaras termográficas. Debido a que las zonas a monitorear son pequeñas y específicas, el uso de satélites daría imágenes de baja resolución, lo que alteraría los cálculos del CWSI. Por lo anterior, se optó por el uso de cámaras termográficas, que ofrecen mayor precisión y resolución al poder acercarse más a los árboles a monitorear. Sin embargo, perturbaciones externas como ráfagas de viento pueden afectar el desempeño del vuelo del UAV, el seguimiento de la trayectoria y la calidad de las fotografías capturadas.

Para abordar estos temas, el presente trabajo de investigación se enfocó en el diseño de un controlador que estima y rechaza perturbaciones que puedan afectar el vuelo de un UAV, además de la captura de imágenes termográficas y procesamiento de las mismas para conocer su nivel de estrés hídrico. La ley de control se conforma por dos componentes, uno nominal y otro no lineal. El control discontinuo se diseñó como un control por modos deslizantes integrales (del inglés *Integral Sliding Mode Control*, ISMC), en donde la superficie de deslizamiento pasa por medio de un filtro pasa-bajas adaptable. Lo anterior fue simulado de manera numérica para verificar que el cuadricóptero siguiera correctamente las trayectorias de vuelo a pesar de la presencia de perturbaciones externas. Los resultados experimentales implementan el cuadirrotor y el sistema de visión artificial y se emplea el seguimiento de puntos junto con el controlador predeterminado del Pixhawk. El sistema de visión artificial para tratar la captura de imágenes termográficas, emplea la cámara termográfica FLIR junto con la computadora embebida y se programa un contador para ir capturando fotografías de los árboles a monitorear de manera continua.

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), also referred to as drones, have played a crucial role in precision agriculture, facilitating various activities in the field by integrating and combining different technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and computer vision. Among their most notable applications are monitoring, irrigation, and crop mapping. The Crop Water Stress Index (CWSI) is one of the most effective methods for determining the health of a crop. It is based on temperature measurements of the plant and its environment, obtained from thermographic images. These images can be captured using satellites or thermal cameras. Since the areas to be monitored are small and specific, the use of satellites would result in low-resolution images, which would affect CWSI calculations. For this reason, thermal cameras are preferred, as they offer greater precision and resolution by being able to get closer to the trees being monitored. However, external disturbances, such as wind gusts, can affect the UAV's flight performance, trajectory tracking, and the quality of the captured photographs.

To address these issues, this research focused on the design of a controller that estimates and rejects disturbances affecting UAV flight, thermographic image capture, and processing to determine water stress levels. The control law has two components: nominal and nonlinear. Discontinuous control was designed as an Integral Sliding Mode Control (ISMC), with the sliding surface passing through an adaptive low-pass filter. This was numerically simulated to ensure accurate trajectory tracking despite disturbances. Experimental results included implementing the quadrotor and artificial vision system, using point tracking combined with the Pixhawk's default controller. The vision system processes thermographic images with a FLIR thermal camera and an embedded computer, using a programmed counter to capture continuous photographs of the monitored trees.

Índice general

Agradecimientos	2
Dedicatorias	4
Resumen	6
Abstract	8
Lista de Acrónimos	14
1 Introducción	16
1.1 Justificación	16
1.2 Planteamiento del problema	17
1.3 Propuesta de solución	18
1.4 Preguntas de investigación	18
1.5 Hipótesis	19
1.6 Objetivo general	19
1.6.1 Objetivos específicos	19
1.7 Publicaciones	20
1.8 Organización de la tesis	21
2 Antecedentes	22
2.1 Marco teórico	22
2.1.1 Agricultura sustentable y agricultura de precisión	22
2.1.2 Robótica agrícola	25
2.1.3 Medición de temperatura en cultivos agrícolas y vegetación	27
2.1.4 Monitoreo termográfico usando robótica aérea	28
2.1.5 Índices de vigor de vegetación en la agricultura de precisión	30
2.1.6 Índice de estrés hídrico de cultivos agrícolas	31
2.2 Estado del arte	33
2.2.1 Sistemas de control para el vuelo autónomo	33
2.2.2 Sistemas de visión artificial para monitoreo en AP	38
3 Diseño de la ley de control	40
3.1 Descripción de la tarea de monitoreo autónomo	40
3.2 Control de modos deslizantes integrales adaptables.	41

3.2.1	Modelo dinámico del cuadrirrotor	41
3.2.2	Control de traslación	48
3.2.3	Control de orientación	52
3.2.4	Sistema de sintonización difusa del control equivalente	56
3.3	Resultados Numéricos	59
3.3.1	Seguimiento del perfil de vuelo con perturbaciones externas	61
3.3.2	Control equivalente contra perturbación agrupada	62
4	Plataforma experimental	68
4.1	Controladores electrónicos de velocidad	68
4.2	Motores eléctricos sin escobillas	69
4.3	Autopiloto Pixhawk 6x Mini Set	70
4.3.1	Plataforma de vuelo PX4	71
4.3.2	Estación en tierra QGroundControl	72
4.3.3	Selección de configuración en PX4	72
4.3.4	Diagrama de conexión del Pixhawk	72
4.4	Radio comunicación	74
4.4.1	Control Spektrum DX7	74
4.4.2	Receptor Spektrum AR7000	74
4.5	Alimentación eléctrica	75
4.5.1	Batería LiPo Turnigy Graphene para el Pixhawk	75
4.5.2	Batería LiPo Turnigy 9XR para la RPI	76
4.6	Computadora embebida Raspberry Pi 4B	77
4.7	Cámara termográfica Lepton FLIR	77
5	Pruebas de la cámara termográfica	80
5.1	Configuración Experimental	80
5.2	Trayectoria de vuelo para la toma de imágenes	81
5.3	Procesamiento de las imágenes termográficas aéreas	83
5.3.1	Monitoreo del Árbol 1	83
5.3.2	Monitoreo del Árbol 2	85
6	Conclusiones y Trabajo Futuro	88
6.1	Conclusiones	88
6.1.1	Limitaciones del Estudio	89
6.2	Trabajo Futuro	89
A	Desarrollo de la ley de control para dinámica de x	90
B	Desarrollo del sistema de monitoreo basado en visión termográfica	94
B.1	Comunicación de RPI a Lepton FLIR	94
B.2	Configuración de la RPI para operar la Lepton FLIR	97
B.3	Compilación y captura de imágenes termográficas	100
B.4	Procesamiento de imágenes y cálculo del índice estrés hídrico	101
C	Código de Matlab para el procesamiento de imágenes	104

Índice de figuras

1.1	Diagrama de flujo de los objetivos del trabajo de tesis.	20
2.1	Agricultura Sustentable.	23
2.2	Distribución de la agricultura de precisión.	24
2.3	Etapas de la agricultura de precisión.	25
2.4	Aplicaciones de la robótica agrícola.	26
2.5	Robot dispensador de feromonas para el biocontrol de plagas.	27
2.6	Medición de temperatura de cultivos a través de una cámara termográfica.	28
2.7	Factores que intervienen en la medición termográfica.	29
2.8	UAV's en tareas de PA.	29
2.9	Mapa CWSI de un cultivo de tomates.	32
2.10	Diferencias entre la trayectoria optimizada y no optimizada.	35
2.11	Diagrama del sistema en lazo cerrado del control de modos deslizantes integrales.	37
3.1	Tarea del UAV.	41
3.2	Movimiento del cuadricóptero sobre el eje x	42
3.3	Movimiento del cuadricóptero sobre el eje y	43
3.4	Movimiento del cuadricóptero sobre el eje z	43
3.5	Movimiento del cuadricóptero en yaw.	44
3.6	Vehículo con respecto al marco del cuerpo y el marco inercial.	46
3.7	Diagrama del sistema en lazo cerrado para la dinámica de altura.	52
3.8	Diagrama del sistema en lazo cerrado para la dinámica de guiñada.	56
3.9	Estructura de las funciones de membresía del sistema de inferencia Mam- dani.	58
3.10	Diagrama de control para la dinámica de Z con sistema difuso.	58
3.11	Diagrama de control para la dinámica de yaw con sistema difuso.	59
3.12	Misión del UAV.	60
3.13	Seguimiento de trayectorias en las dinámicas de traslación.	61
3.14	Seguimiento de trayectorias en las dinámicas de orientación.	62
3.15	Señales de control para las dinámicas traslacionales.	63
3.16	Señales de control para las dinámicas rotacionales.	63
3.17	Control equivalente contra las perturbaciones agrupadas traslacionales $f_v(\dot{\zeta}, t)$	64
3.18	Control equivalente contra las perturbaciones agrupadas rotacionales $f_v(\eta, \dot{\eta}, t)$	65
3.19	Adaptación dinámica de la constante de tiempo τ para la dinámica tras- lacional.	66

4.1	Plataforma Experimental.	68
4.2	Turnigy.	69
4.3	Multistar 4220-880.	70
4.4	Pixhawk 6X Mini.	71
4.5	Selección de marco del vehículo.	72
4.6	Periféricos del Pixhawk 6x mini empleados.	73
4.7	Radio-control Spektrum DX7.	74
4.8	Receptor Spektrum AR7000.	75
4.9	Batería Turnigy Graphene.	75
4.10	Batería Lipo Turnigy 9XR.	76
4.11	Raspberry Pi 4B.	77
4.12	Cámara Lepton Flir.	78
5.1	Configuración experimental	81
5.2	Misión cargada	82
5.3	Configuración de los parámetros del punto de referencia	82
5.4	UAV durante la misión de captura de imágenes autónoma.	83
5.5	Árbol 1 desde la vista anterior	84
5.6	Mapa del CWSI del árbol 1 vista anterior.	84
5.7	Árbol 1 desde vista posterior	85
5.8	Mapa del CWSI del árbol 1 vista posterior.	85
5.9	Árbol 2 desde vista anterior	86
5.10	Mapa del CWSI del árbol 2 vista anterior.	86
5.11	Árbol 2 desde vista posterior.	87
5.12	Mapa del CWSI del árbol 2 vista posterior.	87
B.1	Diagrama de conexión de tarjeta Raspberry con módulo de cámara FLIR	95
B.2	Pines enumerados de la RPI.	95
B.3	Pines enumerados del tablero de conexión de la cámara FLIR.	96
B.4	Habilitación de interfaces	98
B.5	Fotografía Original	101
B.6	Selección de la carpeta a procesar	102
B.7	Fotografía a escala de grises	102
B.8	Fotografía mapeada con el CWSI	103

Lista Acrónimos

- **AP** Agricultura de Precisión.
- **CWSI** Crop Water Stress Index.
- **GNSS** Gobal Navigation Satellite System.
- **GPS** Global Positionning System.
- **END** Evaluación No Destructiva.
- **EID** Equivalent-Input-Disturbance
- **FPA** Focal Play Array.
- **FPB** Filtro pasa-bajas.
- **GNDVI** Green Normalized Difference Vegetation Index.
- **IISMC** Improved Sliding Mode Control.
- **NDVI** Normalized Difference Vegetatin Index.
- **ISMC** Integral Sliding Mode Control.
- **ODS** Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- **RC-EID** Repetitive Control-Equivalent-Input-Disturbance
- **RCS** Repetitive Control System.
- **RPI** Raspberry Pi.
- **SAVI** Soil Adjusted Vegetation Index.
- **SMC** Sliding Mode Control.
- **UAV** Unmanned Aircraft Vehicle.
- **VANT** Vehículos Aéreos No Tripulados.
- **VI** Vegetation Index.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Justificación

Dentro de la agricultura de precisión una de las tareas más importantes es el monitoreo constante de los cultivos agrícolas, con el objetivo de medir variables espaciales y temporales de los mismos y determinar el estado de salud durante todo su proceso de crecimiento. Una de las tareas de monitoreo que pueden ser utilizadas para determinar el estado de los cultivos está relacionada con su nivel de hidratación, lo cual es importante para su correcto desarrollo. Una de las estrategias comúnmente utilizadas para la determinación de esta característica, se basa en la medición de la temperatura de las plantas. Esta medición es realizada principalmente en las hojas de los cultivos, ya que la temperatura de la hoja se ve afectada por la estructura fisiológica de la planta y por factores externos como lo son el aire, la radiación solar, la humedad y la velocidad del viento. En consecuencia, esto afecta a la fotosíntesis de la planta y al mismo tiempo al estado de estrés hídrico de la planta y/o cultivo. Para la medición de la temperatura de la hoja, se pueden emplear métodos de contacto o métodos sin contacto. Para los métodos de contacto se hace uso de termistores y termopares, mientras que en los métodos sin contacto se utilizan cámaras termográficas y termómetros infrarrojos. Una desventaja de los métodos de contacto es que al realizar la medición en la hoja se presenta una perturbación, generada por una transferencia de energía térmica por conducción, provocando así que existan errores en la medición de la temperatura de la hoja. Por otra parte, existen herramientas tecnológicas basadas en el infrarrojo, dentro de los que destacan las cámaras termográficas y los termómetros infrarrojos, con lo cual se tienen ventajas como una mayor precisión en la medición, así como un menor costo de implementación. Uno de los índices de vigor que puede ser utilizado para conocer el nivel de hidratación de las plantas y/o cultivos es el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (del inglés *Crop Water Stress Index*, abreviado CWSI) que se basa en las mediciones de temperatura de la planta y de su entorno. Por lo que en este trabajo de tesis se utilizará este índice de medición para aproximar dicha característica en una zona de cultivo a pequeña escala.

Una de las tecnologías en el campo de la robótica que ha demostrado ser útil en

tareas de monitoreo son los vehículos aéreos no tripulados (VANTs). Específicamente, los vehículos aéreos de tipo multirrotor poseen capacidades de vuelo estacionario y de aterrizaje y despegue que son convenientes para realizar tareas en entornos agrícolas reducidos. Del mismo modo pueden realizar tareas de sobrevuelo a baja altura y realizar tareas de inspección sin importar las condiciones del terreno. Por este motivo se propone implementar un vehículo UAV (del inglés *Unmanned Aerial Vehicle*) que esté equipado con una cámara termográfica para recopilar imágenes térmicas del cultivo y así poder aproximar los niveles de estrés hídrico presentes en el mismo.

Con el fin de garantizar características de vuelo estable, bajo condiciones de vuelo en donde existan perturbaciones externas, principalmente las ráfagas de viento, es necesario el diseño e implementación de estrategias de control que consideren el efecto de estas perturbaciones en su diseño. En el presente trabajo de tesis, el diseño del algoritmo de control se basará en una técnica robusta de modos deslizantes a través del método del control equivalente. Los modos deslizantes han sido ampliamente utilizados en la literatura para el control de vehículos aéreos, sin embargo, en el presente estudio se utilizará el método del control equivalente que puede ser utilizado para reconstruir la perturbación desconocida. Este proceso de sintonización normalmente se realiza por prueba y error. En este sentido se propone un sistema de sintonización inteligente basado en un proceso de inferencia difusa para garantizar que el sistema de control en lazo cerrado cumpla con las características de desempeño necesarias en el esquema de vuelo planteado anteriormente en la tarea de monitoreo.

1.2. Planteamiento del problema

En los entornos agrícolas y de vegetación, el CWSI tiene relevancia dentro de la producción agrícola y la calidad de las cosechas que se obtienen, además del cuidado del estado de la vegetación silvícola. La ausencia de agua por factores como sequías, falta de lluvias o riego insuficiente, genera un factor de estrés el cual llega a afectar de manera negativa el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los árboles.

Debido a que la temperatura foliar está relacionada con la tasa de transpiración de los cultivos, cuando un cultivo se encuentra en una situación de estrés hídrico, la tasa de transpiración disminuye a causa del cierre estomático, a su vez, se produce un aumento en la temperatura foliar y en la mayoría de las veces, una reducción en la actividad fotosintética.

Conocer el índice de estrés hídrico de los cultivos resulta crucial, para así identificarlo, contrarrestarlo y mejorar la calidad de las cosechas, puesto que, de no ser tratado, el estrés hídrico provocará que los cultivos comiencen a morir.

Para solucionar la ausencia de lluvias o el sobre riego, se pueden implementar soluciones como la detección del CWSI a través de vehículos aéreos o por medio de satélites. No obstante, las imágenes por satélite cuentan con una baja resolución dependiendo de las condiciones climáticas además de tener una baja resolución espacial. Por otro lado, el uso de cuadrirrotos conlleva a fotografías con mejor precisión, permitiendo tener información detallada del área a estudiar, lo que resulta mejor opción para el cálculo

del índice. El CWSI representa un gran impacto en la producción agrícola, además de tomar relevancia en el contexto global de la sostenibilidad agrícola. Con la medición de este índice se presenta una alternativa para coadyuvar al desarrollo de los objetivos *Hambre cero* y *Vida de ecosistemas terrestres* principalmente, los cuales forman parte de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por la ONU [1].

1.3. Propuesta de solución

Se desarrollará un helicóptero multirrotores que tenga la capacidad de sobrevolar de manera autónoma realizando un seguimiento de puntos para la captura de imágenes termográficas de cultivos frutícolas. Una vez capturadas las imágenes termográficas éstas se analizarán utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes para el cálculo de una aproximación del CWSI. Aunado a esto, a causa de perturbaciones externas, el desempeño del vuelo se puede ver afectado. Con el objetivo de erradicar esto, se diseñará y simulará un sistema de control robusto para compensar el efecto de las perturbaciones externas (ráfagas de viento) utilizando un esquema de control basado en la técnica de modos deslizantes mediante el método de control equivalente para reconstruir dichas perturbaciones y compensarlas a través de retroalimentación de estado. El cálculo del control equivalente se realizará implementando un sistema de inferencia difusa, utilizando la información del estado del sistema.

1.4. Preguntas de investigación

- ¿Es relevante realizar tareas de agricultura de precisión?

En la actualidad la agricultura inteligente está teniendo un gran auge debido al crecimiento de la producción de alimentos, además de buscar una mayor calidad de los mismos para el consumo humano.

- ¿Los vehículos aéreos son adecuados para realizar tareas de agricultura de precisión?

Un vehículo aéreo tiene ventajas sobre uno terrestre, debido a que sobrevuela el área de los cultivos y no daña las mismas, además de que los vehículos aéreos no dependen de las condiciones del terreno para poder realizar este tipo de tareas.

- ¿Cómo se pueden mitigar las perturbaciones externas en UAVs mediante control por modos deslizantes?

Mediante un esquema de rechazo de perturbaciones basado en un esquema de modos deslizantes integrales y el esquema de control equivalente para la reconstrucción de dichas perturbaciones y su compensación a través de una retroalimentación de estado no lineal.

- ¿Qué tan preciso es el cálculo del CWSI utilizando cámaras termográficas en comparación con otros métodos?

A comparación del método que se basa en el uso de satélites, el cual cubre una mayor área, no permite realizar un análisis cercano de los cultivos como se podría realizar con cámaras termográficas, que ofrecen una mayor precisión al tener mejor calidad en las imágenes empleadas para el análisis del CWSI, además de mayor acercamiento en los cultivos.

1.5. Hipótesis

- A través del diseño de un controlador por modos deslizantes utilizando el método de control equivalente, es posible rechazar perturbaciones externas como ráfagas de viento sin afectar el desempeño del controlador y que realice un seguimiento de trayectorias deseadas .
- Mediante el uso de técnicas de procesamiento de imágenes, de visión artificial y teoría para el cálculo de índices de vigor es posible realizar un análisis fuera de línea de las imágenes termográficas aéreas para determinar un aproximado del índice CWSI de los entornos agrícolas o de zonas de vegetación.

1.6. Objetivo general

Desarrollar un sistema autónomo de captura de imágenes termográficas utilizando un multirrotor para determinar el CWSI de árboles mediante el diseño y simulación de un esquema de rechazo de perturbaciones usando la técnica de modos deslizantes integrales y el control equivalente con un ajuste adaptable difuso para el vuelo regulado y técnicas de visión artificial.

1.6.1. Objetivos específicos

- Diseñar un algoritmo de control robusto adaptable para simular un vuelo regulado de un multirrotor ante ráfagas de viento mediante un esquema de rechazo de perturbaciones usando la técnica de modos deslizantes integrales basada en el control equivalente ajustado por un sistema de inferencia difusa.
- Proponer una forma alternativa de calcular el control equivalente a través de un filtrado adaptable pasa-bajas.
- Desarrollar un sistema de visión artificial integrando una cámara termográfica FLIR y una computadora embebida para la captura, almacenamiento y procesamiento de imágenes termográficas de entornos agrícolas o de zonas de vegetación para la determinación del CWSI.

- Realizar un sistema unificado para la obtención de imágenes termográficas de manera autónoma y el seguimiento de puntos en tiempo real.

Con el fin de mostrar una mejor relación entre los objetivos, la metodología y los resultados, en la Figura 1.1 se muestra un diagrama de flujo en donde se puede apreciar.

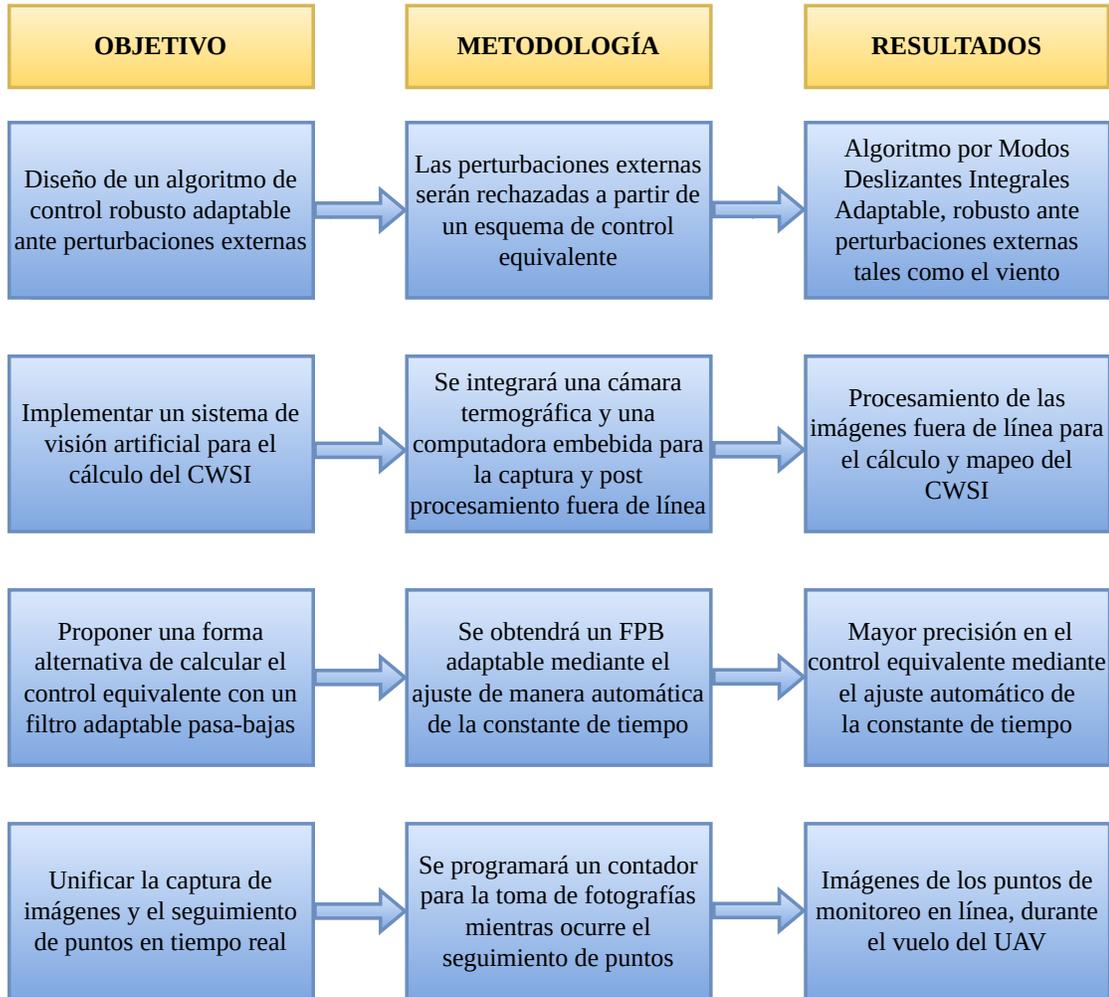


Figura 1.1: Diagrama de flujo de los objetivos del trabajo de tesis.

1.7. Publicaciones

Derivado del presente trabajo de investigación, se publicó el siguiente artículo de congreso internacional:

- **C. S. Sánchez**, J. S. Cervantes-Rojas and E. S. Espinoza, "Fuzzy-Based Disturbance Rejection Control via Integral Sliding Mode for a Quadrotor Aerial Vehicle", 21st IEEE International Conference on Electrical Engineering, Computing

1.8. Organización de la tesis

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera. En el segundo capítulo se desarrollan los antecedentes y el estado del arte, para el tercer capítulo se explica acerca del diseño de la ley de control. En el cuarto capítulo se habla sobre la plataforma experimental. En el quinto se muestran los resultados experimentales. Finalmente, en el sexto capítulo se presentan las conclusiones y los trabajos a futuro.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Marco teórico

En este capítulo, se desglosan los temas que abarca la agricultura de precisión con el propósito de sentar las bases conceptuales y teóricas actuales acerca de este campo de aplicación. Además, se presenta el estado del arte, dividido en dos secciones: la primera se centra en los sistemas de control, mientras que la segunda se enfoca en los sistemas de visión artificial. Dentro de este análisis, se visualizan las diversas tecnologías que se han incorporado en respuesta a las demandas específicas de cada actividad de agricultura de precisión.

2.1.1. Agricultura sustentable y agricultura de precisión

La agricultura sustentable surge como una alternativa que busca mejorar la calidad del medio ambiente, puesto que tiene como objetivo contrarrestar los efectos causados por el calentamiento global. Cada día se vuelve más eficiente debido a los avances en la ciencia y a las herramientas digitales brindadas. De acuerdo con la *American Society of Agronomy*, este tipo de agricultura busca promover la calidad del medio ambiente y los recursos básicos que dependen de la agricultura, en un periodo a largo plazo. Se vuelve viable ya que provee los alimentos necesarios para el ser humano. Una de sus objetivos es mejorar la calidad de vida de los agricultores y ser económicamente viable.



Figura 2.1: Agricultura Sustentable. *Imagen recuperada de [2]*

La Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes menciona en [3] las siguientes prácticas para la agricultura sustentable:

- Prácticas para la conservación del suelo. Para minimizar la compactación del suelo, se ha implementado los sistemas de labranza y el control de tráfico de maquinarias.
- Fertilización. Realizar practicas sustentables de fertilización asegura que se tendrá una reposición de los fertilizantes extraídos, ya sea que se extraigan a partir de los cultivos o de la ganadería.
- Rotación de cultivos. Esta práctica permite tener una diversificación, sumado a esto, también potencia el funcionamiento de los agroecosistemas.
- Policultivos
- Fomento de la diversidad. Una forma de llevar a cabo esto es alternar la agricultura y la ganadería, siempre y cuando las condiciones sean favorables para esto.
- Propulsar técnicas de manejo que potencien la sanidad vegetal. Para que las plantas puedan cultivarse sin plagas, se debe de tener un manejo integrado de plagas, con el fin de proteger los cultivos de enfermedades e insectos.
- Cultivos de cobertura. También conocidos como abonos verdes, dichos cultivos tienen como beneficios controlar la propagación de malezas, evitar la erosión y aumentar la capacidad de retención de humedad disminuyendo la evaporación.

Una de las maneras en las que se ha logrado dicha sustentabilidad, es a través de la agricultura de precisión, ya que al implementar ciertas tecnologías dentro del campo agrícola, facilita diversas tareas, mejorando así la calidad de vida de los trabajadores y al mismo tiempo economizando recursos.

Agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP) conocida también como agricultura inteligente, tiene sus orígenes en la década de 1970, y se define como el conjunto de tecnologías cuyo propósito es mejorar la producción en campos de cultivo mediante el uso de factores de variabilidad espacial y temporal presentes en dicho proceso de producción. Esto, para tener un manejo eficiente del suelo, del medio ambiente y de las necesidades de las plantas, dependiendo de las condiciones que se tengan en cada área de sembrado. En otras palabras, consiste en aplicar una acción correctiva en la cantidad correcta, en el momento correcto y en el lugar adecuado. Para la obtención de datos del cultivo, esta tecnología hace uso del sistema de posición global (del inglés *Global Positioning System*, abreviado GPS) y de otros datos electrónicos.



Figura 2.2: Distribución de la agricultura de precisión. *Imagen original obtenida de [4]*

Desde el punto de vista de actividad, la agricultura de precisión toma en cuenta tres temas, la productividad, la rentabilidad y los efectos del medio ambiente. Una de sus ventajas es que se tiene la posibilidad de dar tratamientos de manera local de un cultivo, teniendo como respuesta una mayor producción junto con un menor costo. En el trabajo [5], presentado por Bongiovanni, se menciona que la AP implica más que simplemente cuantificar la variabilidad presente en una zona; también conlleva la implementación de enfoques de gestión que se basan en esa variabilidad. En la Figura 2.3 se observan las etapas de la agricultura de precisión.

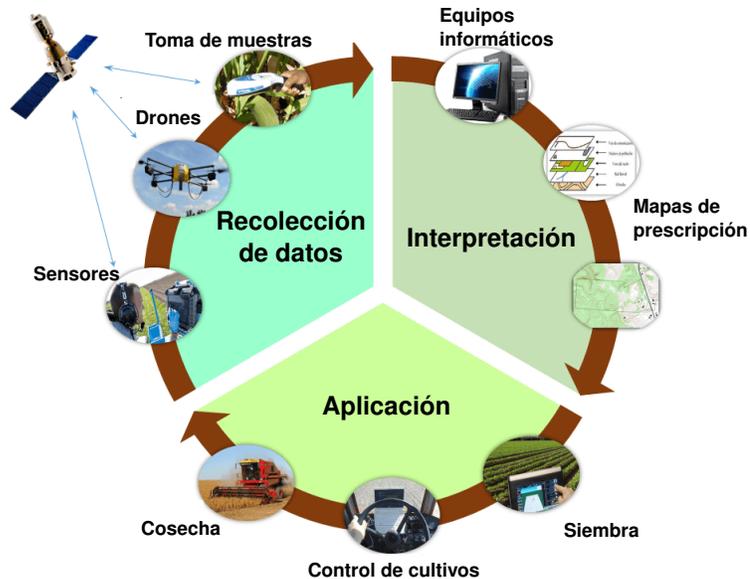


Figura 2.3: Etapas de la agricultura de precisión. *Imagen original obtenida de [6].*

La AP y la robótica agrícola en conjunto están transformando la forma en la que se realizan las tareas agrícolas. Mientras que la AP permite optimizar cada fase del proceso agrícola, la robótica agrícola ofrece soluciones autónomas que realizan tareas específicas de manera eficiente y precisa. Se encuentra la robótica agrícola, la cual incluye robots terrestres, aéreos y brazos manipuladores con el fin de cubrir la mayoría de tareas en el sector agrícola que pueden resultar. La combinación de ambas tecnologías no solo aumenta la eficiencia operativa, sino que también reduce el uso de recursos al mínimo necesario.

2.1.2. Robótica agrícola

La introducción de robots en la agricultura abre paso a cambios en la productividad laboral, ya que al imitar tareas humanas y/o expandirlas, éstos pueden realizar tareas en ambientes complejos que pudiesen resultar difíciles para los trabajadores. La robótica agrícola tiene como objetivo mejorar la eficiencia, reducir los costes de producción, reducir la dependencia del trabajo manual y mejorar la sustentabilidad ambiental. Su incorporación en la agricultura ha dejado como resultados el mejoramiento de la productividad y las condiciones laborales de los agricultores. Los robots agrícolas al ser considerados como sistemas inteligentes, se emplean frecuentemente dentro del campo de la AP para lograr los objetivos que se plantean en este esquema tecnológico.

Algunas de las aplicaciones de la robótica en la agricultura son:

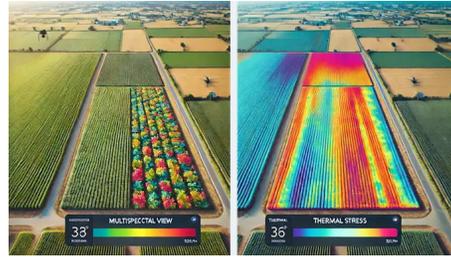
- Aplicación de pesticidas de manera selectiva
- Identificación del estado del cultivo.
- Manipulación móvil de brazos colaborativos.

- Selección del tratamiento correcto para el cultivo.

En la Figura 2.4 se muestran las aplicaciones ya mencionadas a través de imágenes ilustrativas.



(a) UAV rociador de pesticida [7].



(b) Identificación del estado del cultivo [8].



(c) Brazo robótico recolector de kiwi [9].



(d) Selección de tratamiento correcto [10].

Figura 2.4: Aplicaciones de la robótica agrícola.

De acuerdo con el estudio en [11], un robot agrícola debe de contar con las siguientes capacidades:

- El robot debe de poder configurarse en tamaño y forma, dependiendo del diseño de campo, además de poder adaptarse a los diferentes parámetros de cultivo y suelo del lugar en donde vaya a realizar las tareas.
- Debe de proteger el medio ambiente de la degradación del capital natural, como lo es la compactación del suelo.
- En el caso de sistemas robóticos utilizados en el manejo de cultivos, sus capacidades para manipular objetos deben de ser adecuadas con relación a la sensibilidad de los productos. Esto es, en términos de nivel de fuerzas que pueden actuar sobre estos y sus capacidades de percepción deben de adaptarse a la variabilidad del producto, en cuestión de color, tamaño y suavidad, entre otras características.

Monitoreo agrícola usando la robótica móvil

El monitoreo de cultivo es importante y esencial para una óptima producción, no obstante, la realización de esta tarea por parte de los trabajadores requiere de mucho tiempo y esfuerzo, lo que ha llevado a utilizar sistemas robóticos para la detección de enfermedades y/o plagas y la detección de rendimiento, en la Figura 2.5 se puede

apreciar un robot encargado de biocontrolar plagas de insectos en las viñas. El monitoreo de cultivos usando sistemas robóticos, específicamente UAVs, es una opción viable ya que representa un costo bajo, no dependen de las condiciones de terreno y es posible recolectar información de variabilidad temporal del cultivo para posteriormente poder determinar algún VI de interés del mismo.



Figura 2.5: Monitoreo realizado con un robot. *Imagen obtenida de [12].*

Navegación basada en señal GPS en entornos agrícolas

El GNSS (del inglés *Global Navigation Satellite System*) es un sistema de navegación y localización basado en sensores receptores a través del uso de satélites, con lo cual se conoce la ubicación del UAV. El sistema de posicionamiento global (del inglés *Global Positioning System*, abreviado GPS) es la tecnología central para la localización de los UAV's. Un UAV con una cámara montada puede volar de manera autónoma sin un piloto, solamente basándose en el GPS.

2.1.3. Medición de temperatura en cultivos agrícolas y vegetación

El conocer la temperatura de los cultivos es un indicativo para conocer aspectos fisiológicos del mismo, como lo es la tasa de evaporación y el nivel de estrés hídrico. Por otro lado también es útil para indicar el grado de sequía o agua. La temperatura foliar depende de la apertura de los estomas, ésta disminuye a medida que los estomas se abren y que la tasa de evaporación aumenta. Por el contrario se presenta un aumento de la misma cuando el cultivo se somete a un estrés hídrico, ya que las estomas se cierran y la tasa de vaporación decrece. Adicionalmente, también afecta la fotosíntesis y la transpiración de la planta. La tasa de crecimiento y la producción de cultivo de igual manera pueden verse afectadas por la misma. Existen diferentes métodos para la medición de temperatura foliar, los más comunes son: métodos de contacto, métodos sin contacto y modelado de la planta. En los métodos de contacto se hace uso de termistores y de termopares, no obstante, al entrar en contacto con las hojas esto presenta una perturbación, provocando así un error en la medición, sin embargo una de las ventajas que estos métodos presentan es que son de fácil instalación y de alta precisión.

Los métodos sin contacto emplean cámaras termográficas, como se puede observar en la Figura 2.6 y termómetros infrarrojos, una ventaja que éstos presentan es su bajo costo y una mayor precisión que con los métodos de contacto.

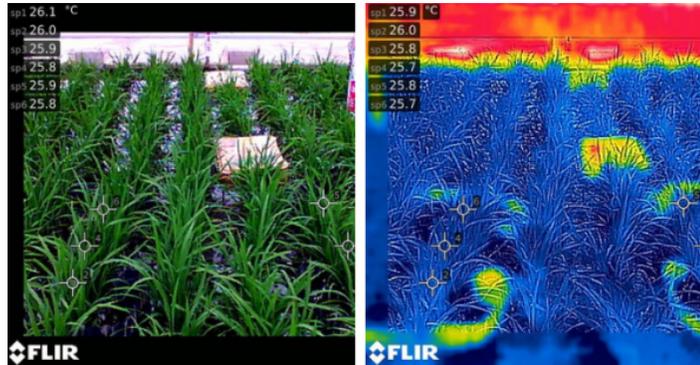


Figura 2.6: Medición de temperatura de cultivos a través de una cámara termográfica. Imagen recuperada de [13].

Por último, en el modelado de la planta será necesario tomar diversos factores, como la radiación solar, la humedad relativa y las propiedades de las hojas y la temperatura del aire. Si se desea utilizar un modelo, será necesario obtener especificaciones de la planta, así como los datos ambientales previamente mencionados.

2.1.4. Monitoreo termográfico usando robótica aérea

Termografía. La vista humana no puede detectar la longitud de onda infrarroja, con el fin de visualizar dichas ondas se deben emplear otros métodos, como la termografía infrarroja, la cual es un procedimiento para poder visualizar el calor que emiten los cuerpos, a través de una imagen obtenida a la distancia. [14] señala que esta técnica es bastante utilizada para la "Evaluación No Destructiva (END)". Las cámaras termográficas, pueden capturar y graficar las imágenes, así con respecto al color graficado, se conocerá el nivel de calor que tenga cada objeto.

En la medición intervienen tres factores, los cuales son:

1. El operador y las características de la cámara a utilizar.
2. Conocer acerca del sistema a observar.
3. El entorno.

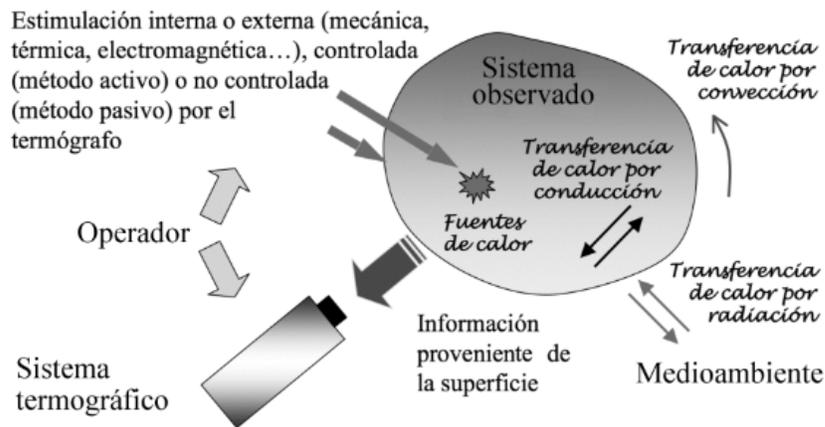


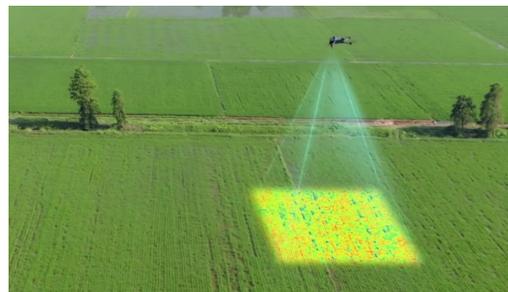
Figura 2.7: Factores que intervienen en la medición termográfica. *Imagen recuperada de [14].*

Estos tres factores que ocurren en la acción de la medición termográfica también pueden visualizarse en la Figura 2.7.

El uso de una cámara termográfica en combinación con una planificación avanzada de rutas y la captura de imágenes usando sistemas robóticos basados UAVs se presenta como una opción viable para obtener imágenes aéreas que recopilen información esencial de los cultivos, que difícilmente podría obtenerse de formas convencionales. La mayoría de las cámaras infrarrojas cuentan con detectores denominados FPA (del inglés *Focal Plane Array*), por lo que el tamaño de las imágenes irá definido por el número de detectores que se tengan. En la Figura 2.8 se muestran tareas de monitoreo realizadas con cuadrirrotores y cámaras termográficas.



(a) Monitoreo de cultivo[15]



(b) Mapeo de cultivo [16]

Figura 2.8: UAV's en tareas de PA.

En el caso particular que se aborda en el presente trabajo de tesis, se determinará una aproximación del índice de vigor CWSI de cultivos agrícolas utilizando un sistema de sensado basado en una cámara termográfica para la captura de imágenes térmicas de cultivos a pequeña escala. Aunque el monitoreo de cultivo se puede realizar a través de imágenes obtenidas vía satélite, para el caso que se tratará en este trabajo de tesis

no representa una opción adecuada para obtener la precisión requerida en la tarea de monitoreo que se realizará. Además que la disponibilidad de las imágenes satelitales se encuentra condicionada por las condiciones climáticas, a la disponibilidad de imágenes actualizadas (ya que esto depende del paso del satélite por dicha zona), y sobretodo al costo elevado de imágenes de superficie mínima con una alta resolución. Aunado a lo anterior las capacidades de percepción de la cámara que se utilizará son limitadas por la resolución de la imagen que ésta puede sensar. Esta condición, restringe la distancia a la cual pueden tomarse las imágenes para poder obtener una definición adecuada del cultivo y en consecuencia de su temperatura. Es por lo anterior, que dadas las capacidades de vuelo estacionario y de baja altura de los UAVs de tipo multirrotor, éstos se presentan como el sistema robótico adecuado para resolver esta tarea de monitoreo requerida de forma eficiente. Además, dado que el UAV que se utilizará en este trabajo, es de escala micro (menor o igual a 2 kg) según la Norma Oficial Mexicana 107 STC3 2019, este es de bajo peso y su instrumentación de bajo costo, lo que lo hace viable económicamente.

2.1.5. Índices de vigor de vegetación en la agricultura de precisión

Para programar el riego en los cultivos, es necesario conocer algunos factores importantes, lo cuales se contestan con las preguntas clave [17]: cuándo regar, cuánto regar y en donde aplicar el agua. Esta última pregunta se puede responder realizando una evaluación del estado hídrico de la planta, por lo que es necesario calcular el índice de vigor del cultivo.

Los índices de vigor o índices de vegetación se encuentran relacionados con el estudio de la cobertura vegetal. Se le conoce como un resultado obtenido a partir del cálculo de una o más bandas del espectro electromagnético y tiene como objetivo resaltar alguna característica concreta del cultivo, como la salud o la vigorosidad del mismo. Para el cálculo de estos índices se llegan a emplear tanto con cámaras multispectrales como con cámaras termográficas.

El índice de vigor a utilizar dependerá del tipo de cámara empleada, ya que trabajan diferentes partes del espectro electromagnético. Los índices de vigor (del inglés *Vigor Index*, abreviado VI) que se pueden calcular con una cámara multispectral son:

- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (del inglés *Normalized Difference Vegetation Index*, abreviado NDVI). Es de los índices más importantes y usados. Permite calcular el vigor de una planta en estado fenológico concreto y utiliza las bandas del rojo y del infrarrojo cercano
- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (del inglés *Green Normalized Difference Vegetation Index*, abreviado GNDVI). Siendo una variación del NDVI, en lugar de utilizar la banda del rojo, utiliza la banda del verde, como consecuencia, se tienen mejores resultados en ciertas ocasiones, como en la predicción del rendimiento de cosecha.

- Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (del inglés *Soil Adjusted Vegetation Index*, abreviado SAVI). Este índice compensa el "efecto suelo", ya que cuando se tiene una cobertura vegetal demasiado pobre en los índices NDVI y GNDVI, estos valores se descompensa por dicho efecto.

Por otra parte, a partir de una cámara termográfica es:

- Índice de Vegetación de Estrés Hídrico (del inglés *Crop Water Stress Index*, abreviado CWSI). A partir de la obtención de la temperatura superficial del cultivo, este índice calcula el potencial hídrico foliar, con el cual se determinará su estrés hídrico.

2.1.6. Índice de estrés hídrico de cultivos agrícolas

En el trabajo [18], presentado por Capraro, se explica que este índice es utilizado con la finalidad de monitorear y cuantificar el estrés hídrico, lo que permite programar e identificar problemáticas en los sistemas de riego. También conocido por sus siglas CWSI, este es uno de los métodos más utilizados. Consiste en precisar la tasa de transpiración del cultivo en cuestión por medio de la toma de temperatura y del déficit de presión de vapor del mismo. El CWSI tiene un rango de 0 a 1, donde 0 indica que la planta está transpirando y su temperatura foliar es de 1 a 4°C menos que la temperatura ambiente. Cuando la planta disminuye en su tasa de transpiración y presenta una diferencia de 4 a 6°C respecto a la temperatura ambiente, significa que el estrés hídrico ha aumentado. Si la planta deja de transpirar por un periodo prolongado, el valor del CWSI llega a 1. La Figura 2.9 muestra el mapeo del CWSI de un cultivo de tomates, aquí se observa como varían los valores en toda la zona, siendo las zonas rojas aquellas que cuentan con un alto índice de estrés hídrico, mientras que las verdes representan a las áreas que se encuentran correctamente regadas. Para calcular del CWSI, se realizan balances energéticos, por lo que es necesario obtener la temperatura del cultivo, para lo cual se pueden utilizar cámaras termográficas montadas sobre UAV.

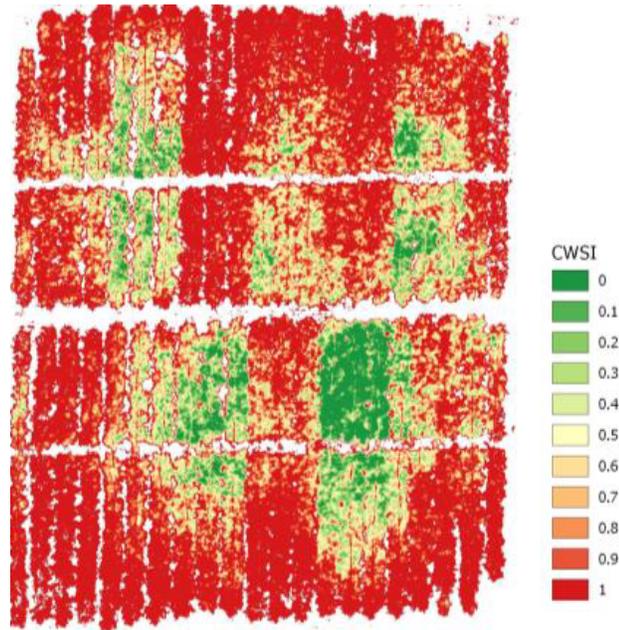


Figura 2.9: Mapa CWSI de un cultivo de tomates. *Imagen obtenida de [18].*

Métodos para el cálculo de índices de estrés hídrico

Aunado a lo anterior, es necesario conocer la manera en la que se deberá de calcular el índice de estrés hídrico en el cultivo, por lo que a continuación se presentan dos métodos diferentes para realizar este cálculo, donde el primero está definido por Idso y Jackson et al y el segundo método es propuesto por H. C. Jones. Idso[19] y Jackson et al[20] definen el cálculo del CWSI como

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{li}]}{[(T_c - T_a)_{ls} - (T_c - T_a)_{li}]} \quad (2.1)$$

donde

- T_c es la temperatura del cultivo
- T_a es la temperatura ambiente
- m es el subíndice de la diferencia medida entre las dos temperaturas.
- li es el límite inferior, el cual señala la diferencia entre las dos temperaturas cuando los estomas se encuentran abiertos.

- l_s es el límite superior, marca la diferencia de ambas temperaturas cuando los estomas se encuentran totalmente cerrados.

De acuerdo con [21], Jones presenta otra manera de calcular el CWSI, ésta es la diferencia entre la temperatura máxima (límite superior) y la temperatura mínima (límite inferior). Representando en una hoja un estado de no transpiración T_{dry} y de transpiración absoluta T_{wet} .

$$CWSI = \frac{T_c - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (2.2)$$

El valor obtenido determinará el estado de riego del cultivo. Si el valor es 0, se considera que el cultivo está bien regado; en cambio, si el valor es 1, indica que el cultivo está bajo estrés hídrico.

2.2. Estado del arte

La agricultura de precisión se ha vuelto una herramienta sumamente importante ya que sus tecnologías permiten acatar una de las demandas que se presentan en la agricultura actual. Su implementación en esta área ha permitido una reducción de costos en la producción, así como la optimización de las condiciones laborales de los trabajadores. Sus aplicaciones van desde el monitoreo de un cultivo por medio de UAVs, hasta la aplicación de fertilizantes y/o pesticidas sobre éstos por medio de visión artificial. No obstante, para que un UAV pueda realizar una correcta ejecución del viaje, es necesario contar con una planeación de ruta y un algoritmo de control lo suficientemente robusto ante las condiciones de vuelo en exteriores, principalmente las perturbaciones externas producidas por ráfagas de viento. La presencia de los UAVs cada vez predomina más en el sector agrícola, el trabajo presentado en [7] menciona que se espera que el mercado de este tipo de sistemas robóticos aéreos en la agricultura siga creciendo. Asimismo, señala las diversas aplicaciones que se pueden llevar a cabo con diferentes modelos de UAVs dentro de las que destacan los vehículos de ala fija y los de ala rotativa, como lo son: cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros. También, este trabajo menciona que la tecnología de construcción de mapas y localización simultánea (del inglés *Simultaneous Localization and Mapping*, abreviado SLAM) se implementa en los cuadrirrotos con el objetivo de que puedan navegar sin la necesidad de usar sistemas de posicionamiento basados en tecnología GPS.

2.2.1. Sistemas de control para el vuelo autónomo

Como ya se mencionó anteriormente, para resolver el problema de garantizar un vuelo estable sujeto a perturbaciones externas, como las ráfagas de viento, es necesario el diseño de algoritmos de control que sean capaces de cumplir con ciertos requerimientos de desempeño como la respuesta dinámica, garantizar una estabilidad y control de la actitud del UAV y la robustez del mismo algoritmo de control. En este sentido, existen diferentes enfoques de control basados en técnicas robustas, adaptables o robusto adaptables que pueden utilizarse para abordar esta problemática.

Dentro de las técnicas de control de tipo robusto, unas de las que han demostrado ser efectivas para el control de vuelo de UAVs afectados por perturbaciones son las basadas en la teoría de control por modos deslizantes (del inglés *Sliding Mode Control*, abreviado SMC). En el trabajo [22] presentado por Zhiwei et al, se aborda un control robusto para un UAV que presente una falla total de un rotor, el control presentado es un control por modos deslizantes terminal no singular. El método que propone es un enfoque de posición y actitud en tiempo finito con una gran solidez, dicho control considera las perturbaciones externas como el viento y las incertidumbres.

Xiang et al en [23] combina el enfoque de una perturbación de entrada equivalente (del inglés *equivalent-input-disturbance*, abreviado EID) con el control por modos deslizantes. Xiang presenta un método para diseñar la ganancia de conmutación. Para esto menciona que fue necesario extraer la perturbación restante y posteriormente calcular la influencia en el estado del sistema por medio de una función de transformación y la norma 1 del sistema. A partir de la norma 1 que se calcula, se presenta un método de diseño para la ganancia de conmutación. Dicha ganancia es pequeña, por lo que da como resultado que el chattering del SMC basado en el enfoque EID sea más pequeño que el chattering resultante del SMC convencional. De acuerdo con [24], Qicheng presenta un enfoque extendido del EID al control de repeticiones (del inglés *Repetitive Control-Equivalen-Input-Disturbance*, abreviado RC-EID), en el cual se estima y se compensa la perturbación del periodo y es utilizado para superar las limitaciones de un sistema de control repetitivo (del inglés *Repetitive Control System*, abreviado RCS) convencional. Aunado a lo anterior, al ser un control repetitivo, este estimador garantiza que se desprece la perturbación periódica sin tener el error en estado estacionario.

Un monitoreo de cultivos a gran escala se muestra en [25], en donde se presenta una optimización de seguimiento de ruta con el objetivo de reducir el consumo de batería durante la realización de las tareas de seguimiento. Aquí la arquitectura de la optimización de ruta se realiza en cuatro módulos, en donde el primer módulo es la optimización de energía, la segunda es la optimización de ruta, la tercera la planeación de trayectoria y por último se tiene la simulación de la trayectoria. En la Figura 2.10 se puede visualizar la diferencia entre una trayectoria optimizada en la cual se podrá reducir el consumo de la batería y una trayectoria en la que no se reduce este consumo.

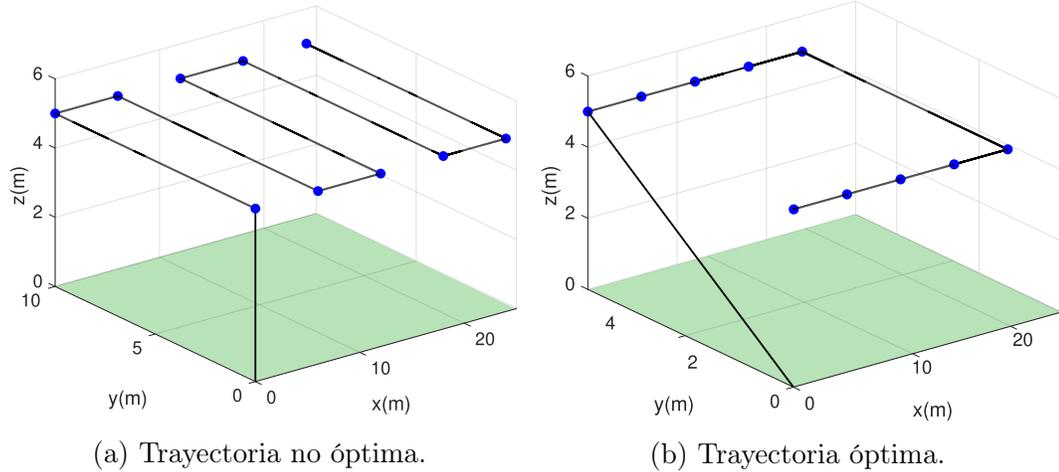


Figura 2.10: Diferencias entre la trayectoria optimizada y no optimizada. *Imagen obtenida de [25].*

Elyateb et al en [26] implementa un control por modos deslizantes integrales aplicado a un cuadirrotor. Esto con el objetivo de proponer un algoritmo de control que a pesar de presentarse perturbaciones, este sea inmune a las mismas. La ley de control que presentan, se encuentra conformada por tres partes, la primera es la sección del control equivalente con la que se van a manejar las perturbaciones y las dinámicas no modeladas, la segunda parte es la ganancia adaptativa de conmutación, con la cual se va a ir variando dicha ganancia dependiendo de la perturbación y finalmente se tiene la función de conmutación. El ISMC puede modificarse para trabajar con diversos métodos, lo que garantiza robustez. Omid et al en [27], presentan un diseño para la actitud y un control de seguimiento de posición de una cuadirrotor, el cual se encuentra bajo incertidumbres paramétricas y perturbaciones externas, el cual propones como un modo deslizante terminal de tipo integral adaptativo. En [28], Ziqiang et al presentan un control de actitud para un vehículo submarino autónomo, el cual se realiza por un control por modos deslizantes integral mejorado (del inglés *Improved Integral Sliding Mode Control*, abreviado IISMIC), el cual busca mejorar la capacidad de seguimiento de actitudes a pesar de tener presente perturbaciones externas.

Modos deslizantes integrales para rechazo de perturbaciones

El objetivo de la ley de control es que el sistema entre desde el primer momento en la fase de alcanzabilidad y que elimine las perturbaciones externas y dinámicas no modeladas. Al ser un control de seguimiento, se deberá estabilizar la dinámica del error de orientación y de altitud del cuadirrotor. La ley de ISMC estará conformada por una sección nominal y otra no lineal.

$$u = u_0 + u_1 \quad (2.3)$$

donde u_0 representa a la parte nominal y u_1 a la discontinua, la cual se encargará de eliminar las perturbaciones que se presenten, dejando que el control que actúe sobre la planta sea el nominal. Cerrando el lazo con la ley de control de la ecuación (2.3), se

obtiene

$$\dot{x} = f(x) + B(x)u_0 + B(x)u_1 + \xi(x, t), \quad (2.4)$$

donde la ecuación (2.4) observamos que $x(t)$ es el vector de estado, u_0 y u_1 es el vector de entrada, mientras que f es la matriz de transición y B la matriz de entrada. Por ultimo, se observa que se tiene el término $\xi(x, t)$, el cual será el término que represente las perturbaciones externas en las dinámicas. Para el algoritmo de control no lineal (u_1) se deberá definir primero una superficie de deslizamiento

$$s = s_0(x) + r \quad (2.5)$$

se observa que s consta de dos partes, la primera es $s_0(x)$, la cual se diseña a través de una combinación lineal de los estados del sistema, mientras que la segunda parte r será una variable auxiliar, encargada de introducir el término integral.

Para que el estado $x(t)$ converja a x_0 en todo momento $t > 0$, el ISMC busca que el control equivalente de u_1 , definido como u_{1eq} , cumpla que

$$B(x)u_{1eq} = -\xi(x, t) \quad (2.6)$$

donde a $\xi(x, t)$, se puede renombrar como u_ξ , por lo que la ecuación (2.6) queda

$$u_{1eq} = -u_\xi \quad (2.7)$$

de manera que hace que se satisfaga la condición de acoplamiento en la ecuación (2.7) se muestra que u_{1eq} es igual a menos la perturbaciones y las dinámicas desconocidas. El control equivalente caracteriza a las trayectorias del sistema que se tienen a través de la superficie $s = 0$.

Retomando la ecuación (2.5) se deben definir correctamente s_0 y $r(x, t)$, con el propósito de que \dot{s} sea igual a cero. Por lo que una manera de calcular su derivada es

$$\dot{s} = \dot{s}_0(x) + \dot{r} \quad (2.8)$$

$$= \frac{\partial(s_0)}{\partial x} \{f(x) + B(x)u_0(x) + B(x)u_{1eq}(x) + B(x)u_\xi\} + \dot{r} \quad (2.9)$$

$$= 0 \quad (2.10)$$

por lo tanto, \dot{r} , se define como

$$\dot{r} = -\frac{\partial s_0}{\partial x} \{f(x) + B(x)u_0(x)\} \quad (2.11)$$

por lo que (2.11) debe de cumplir la siguiente condición

$$r(0) = -s_0(x(0)) \quad (2.12)$$

La variable auxiliar $r(x, t)$ será la encargada de aproximar la perturbación externa y eliminarla del mismo, para así, tener un sistema no perturbado que se controlará con la parte nominal. No obstante, para que esto suceda, la señal del control no lineal deberá de filtrarse previamente.

Por último, debido a que el ISMC se empleará para reconstruir las perturbaciones externas y las dinámicas no modeladas, se retoma la ecuación (2.3), y se reescribe

$$u = u_0 + u_{1eq} \quad (2.13)$$

sin embargo, el control que aparece en la ecuación (2.13) aún no es apto para alimentar la planta, ya que debe filtrarse la señal para tener un promedio de la señal de control, dando lugar a u_{av} , que eliminará el castaño de la ley de control. Ahora, se tiene que el control u_1 , previo al filtrado, se construye de la siguiente manera:

$$u_1 = M \operatorname{sgn}(s) \quad (2.14)$$

donde, M es la ganancia, la cual será la mayorización de la perturbación y s la superficie de deslizamiento.

En la Figura 2.11 se muestra el esquema de control en lazo cerrado, usando la estrategia de control propuesta.

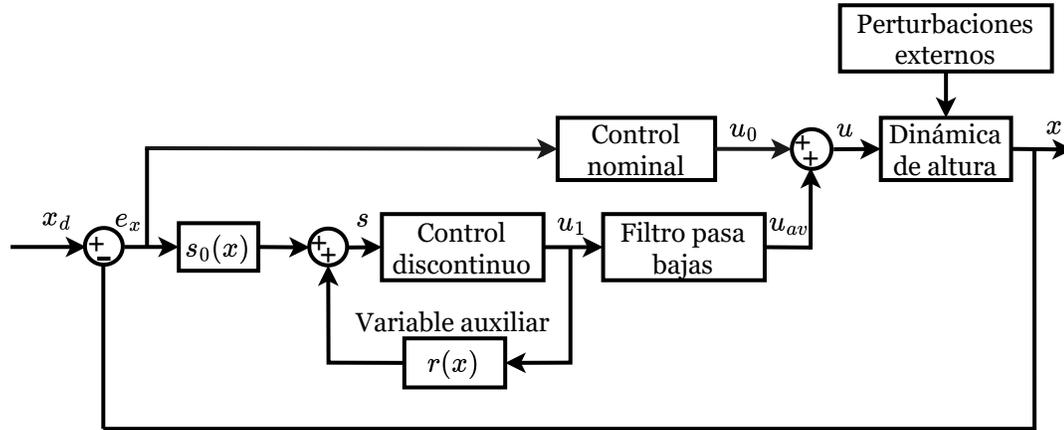


Figura 2.11: Diagrama del sistema en lazo cerrado del control de modos deslizantes integrales.

Retomando de la ecuación (2.3), sabemos que $u_0 = u - u_1$, quedando la variable auxiliar como

$$\dot{r} = -\frac{\partial s_0}{\partial x} \{f(x) + B(x)u - B(x)u_1\} \quad (2.15)$$

Ahora, será necesario que la señal pase por el filtro pasa-bajas, que cuenta con la siguiente estructura

$$\tau \dot{u}_{1av} + u_{1av} = u_x, 1 \quad (2.16)$$

donde u_{1av} es el promedio de la señal discontinua y $\tau > 0$ es la constante de tiempo del filtro. Con el fin de tener una aproximación correcta al filtro, τ debe seleccionarse lo suficientemente grande para eliminar los componentes de alta frecuencia, pero lo suficientemente pequeña para dejar pasar los de baja frecuencia.

2.2.2. Sistemas de visión artificial para monitoreo en AP

En [17] se puede encontrar un ejemplo del uso de los UAV'S en el área de la agricultura, ya que con ayuda de ellos se obtienen imágenes multiespectrales con el objetivo de conocer su índice de vegetación para después comparar los resultados índices ya calculados.

En el estudio abordado en [18], se presenta un análisis del CWSI de un cultivo de olivo para diferentes niveles de potencial hídrico, para esto se recopilaron dos conjuntos de imágenes, uno con una cámara FLIR VueProR 640 y otro con una cámara multiespectral MicaSense RedEdge, ambas montadas sobre un UAV de tipo multirrotores para la obtención de dichas imágenes. Una vez obtenidos los datos se realizaron mapas termográficos del cultivo y se calculó un mapa de CWSI, con lo que se concluyó que el índice calculado fue adecuado para conocer el estrés hídrico del olivo. Este trabajo también menciona que a través de un algoritmo de procesamiento desarrollado en Python se procesó el mapa de temperatura para apreciar los efectos de distorsión de las imágenes térmicas debido a que depende del cultivo y de la sombra del mismo.

En el estudio desarrollado en [29], se propone un método nuevo para el cálculo del CWSI, este se basa en las curvas de distribución de la temperatura del dosel (T_c), con el fin de mejorar el desempeño en el diagnóstico del déficit hídrico de los cultivos. Una vez que obtiene dicha temperatura a partir de imágenes térmicas, se determinan diferentes cuantiles estadísticos de T_c para después emplear un promedio de los mismos sobre diferentes cuantiles estadísticos.

A pesar de que existen métodos que utilizan sensores de humedad y porómetros de difusión foliar ¹ con el objetivo de obtener la humedad del suelo, no son viables si se desea tener un monitoreo automatizado del estrés hídrico del cultivo debido a la demanda de [31] se llevó a cabo un estudio para detectar el estrés hídrico en el cultivo de sésamo que se encuentran en invernadero, calculando dos índices, el primero que fue el CWSI y el segundo que fue el índice de conductancia estomática. Aquí se concluye que el CWSI resulta bastante efectivo y se puede realizar una detección de estrés hídrico que no es destructiva, además de tener una estimación del agua en sésamo.

Ahora que se mencionaron las diferentes técnicas de control para vuelos afectados por perturbaciones externas, es importante mencionar que esta investigación aborda las limitaciones de los métodos actuales al integrar un sistema de control robusto con capacidades adaptativas en UAVs para mejorar la precisión del monitoreo agrícola. En

¹El porómetro evalúa la Conductancia Estomática (g) de las hojas mediante la aplicación de la técnica de Estado Estacionario. Este método cuantifica tanto la presión de vapor como el flujo de vapor en la superficie de la hoja. [30]

el siguiente capítulo se explicará a detalle el modelado del cuadirrotor, la ley de control propuesta y el desarrollo de la misma.

Capítulo 3

Diseño de la ley de control

En este capítulo, se introducirá el modelo matemático del cuadrirrotor, y los parámetros del sistema. También se desarrollará el diseño del control de altura y de guiñada, que se encargará de rechazar las perturbaciones externas. Finalmente se analizarán los resultados numéricos para evaluar el desempeño del seguimiento de trayectoria a pesar de la presencia de ráfagas de viento.

3.1. Descripción de la tarea de monitoreo autónomo

Se realizará una tarea de monitoreo de un conjunto de árboles para determinar el índice de estrés hídrico. Para esta tarea será necesario llevar a cabo la captura de imágenes termográficas de cada uno de los árboles de manera autónoma utilizando un UAV de tipo multirrotor de cuatro rotores. Para realizar un cálculo efectivo del CWSI, será necesario obtener imágenes de buena calidad, es decir, la distancia a la que se tomarán, deberá de ser lo suficientemente cercana para obtener un buen registro de la temperatura del follaje y al mismo tiempo capturar una región significativa de la estructura del árbol. Asimismo, debe garantizarse un nivel de nitidez suficiente en la imagen para facilitar el post procesamiento de la misma y aproximar de mejor forma el CWSI.

Con el fin de obtener dicha calidad, será necesario ejecutar un vuelo regulado del UAV siguiendo una trayectoria deseada planeada para que la cámara quede localizada frente a cada uno de los árboles. La misión propuesta se muestra en la Figura 3.1.

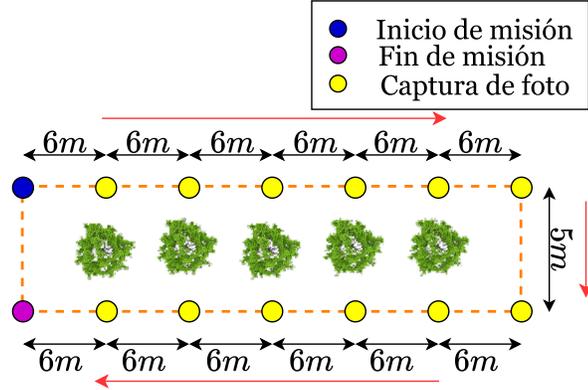


Figura 3.1: Tarea del UAV.

Como se observa en la Figura 3.1, esta trayectoria está planeada para poder realizar la captura del follaje de cada árbol desde dos perspectivas, anterior y posterior.

Dado que el seguimiento de la trayectoria deseada se realizará en un ambiente exterior, el cuadróptero estará sujeto al efecto de perturbaciones externas producidas por ráfagas de viento. Además, el modelo matemático del UAV contiene dinámicas no modeladas e incertidumbre paramétrica, además de incluir también acoplamiento no lineal, esto dificulta el diseño de la ley de control, por lo que en esta propuesta de tesis, se propone el uso de una estrategia de control robusto basado en modos deslizantes integrales con el objetivo de poder hacer la aproximación de todos los efectos desconocidos que influyen en la dinámica del UAV.

La implementación del ISMC presenta varios beneficios a comparación de otros controles robustos. Algunas ventajas que se encuentran son el asegurar la robustez desde el primer momento, reconstruir las perturbaciones y dinámicas no modeladas para eliminar las mismas, el control nominal que se aplica a la planta es del mismo orden. Finalmente, este control no cuenta con chattering debido a que el término discontinuo, antes de introducirse a la planta, primero pasa por un filtro pasa bajas.

Adicional a este, se propone que el ISMC cuente con un sistema de sintonización inteligente que se encargue de realizar un ajuste para eliminar las perturbaciones, dicho sistema será difuso de tipo Mamdani, garantizando así que se cumplan las características de desempeño del vuelo.

3.2. Control de modos deslizantes integrales adaptables.

3.2.1. Modelo dinámico del cuadrirrotor

Se seleccionó la configuración en X para diseñar el cuadrirrotor, ya que cuenta con una capacidad para representar de manera precisa el acoplamiento que está presente en la dinámica de orientación. Esta configuración permite modelar de manera detallada los efectos de Coriolis, además de reducir los efectos giroscópicos generados por los rotores,

lo anterior juega un papel fundamental para la simulación y el desarrollo de algoritmos de control. Pese a que existen muchas ventajas de usar esta configuración, también se tienen limitaciones como ser propensos a ser afectados con facilidad ante perturbaciones externas y tener un mayor consumo energético.

El vehículo cuenta con cuatro rotores fijos al marco de manera simétrica y dependiendo de la velocidad de rotación de cada motor, el UAV podrá desplazarse sobre los ejes x , y o z . En la Figura 3.2, se muestra como se obtiene el desplazamiento sobre el eje x . Si se desea desplazarse sobre el eje x , se deberá aumentar los dos la velocidad de rotación de los motores ubicados en la parte trasera del cuadrirrotor y disminuir la velocidad de los rotores delanteros, por lo que se obtendrá un movimiento en cabeceo. Por otra parte, si se desea desplazarse en dirección a $-x$, la velocidad de los rotores delanteros deberá de aumentar y la de los rotores traseros disminuirá.

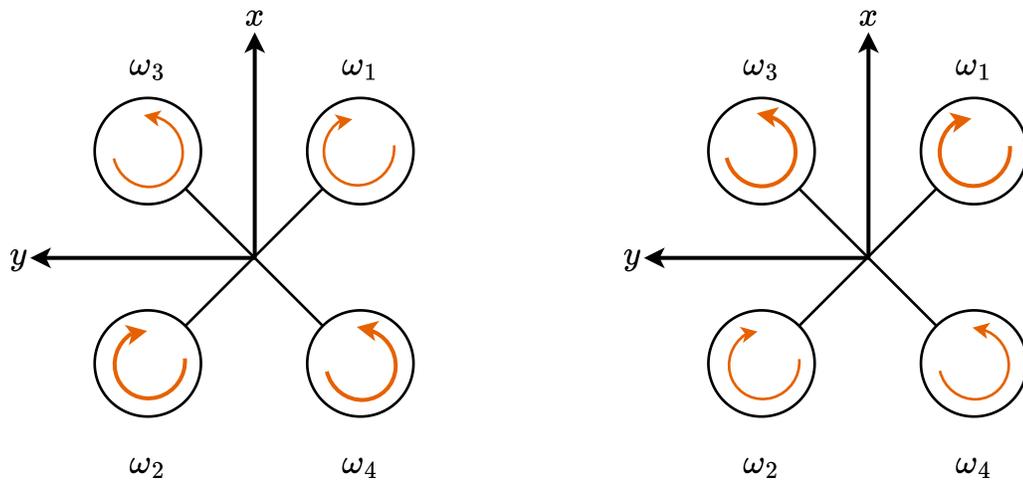


Figura 3.2: Movimiento del cuadrirrotor sobre el eje x .

Para desplazarse sobre el eje y , se deberá de girar en alabeo, para esto será necesario aumentar la velocidad de los rotores del lado derecho y disminuir la velocidad de los del lado izquierdo. En caso de desplazarse en $-y$, ahora los rotores izquierdos deberán aumentar su velocidad y los derechos, reducirla. Esto puede visualizarse en la Figura 3.3.

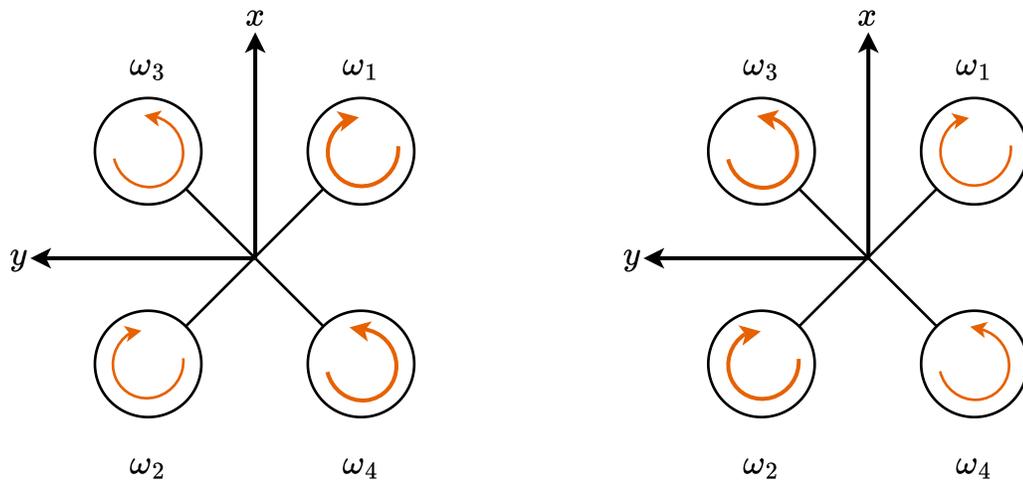


Figura 3.3: Movimiento del cuadrirrotor sobre el eje y .

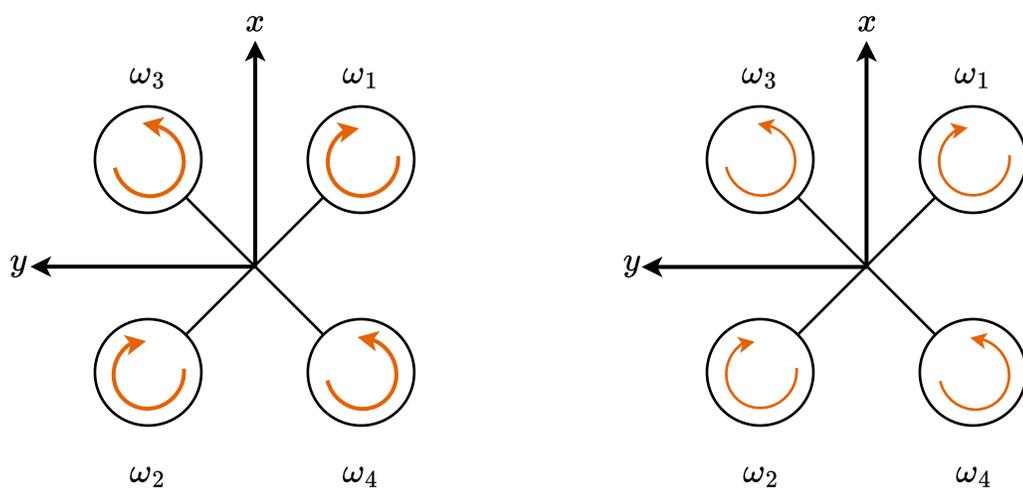


Figura 3.4: Movimiento del cuadrirrotor sobre el eje z .

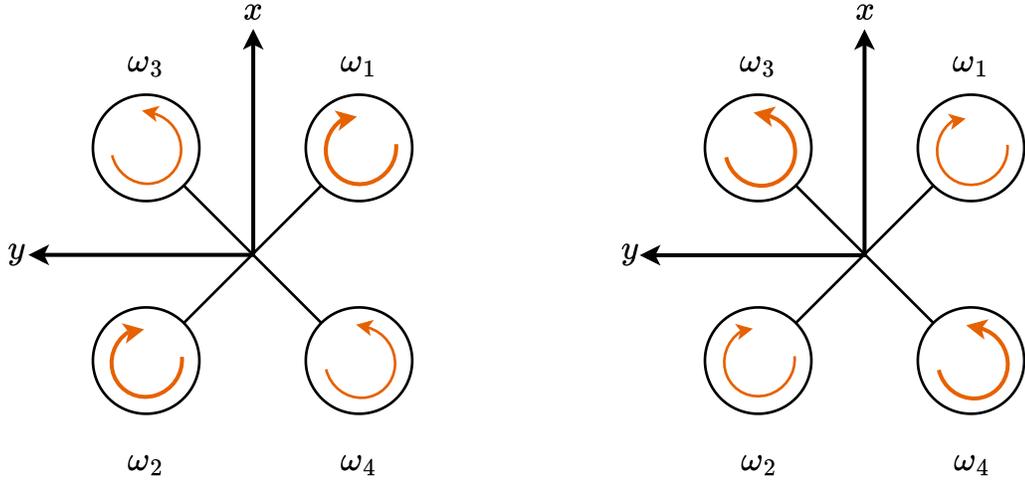


Figura 3.5: Movimiento del cuadrirrotor en yaw.

El cuadrirrotor es un cuerpo rígido que se mueve en un espacio tridimensional y cuya pose se representan con seis coordenadas, tres traslacionales y tres angulares. El vehículo cuadrirrotor es un sistema subactuado con seis grados de libertad y solo cuatro entradas de control. Es decir para modificar la posición traslacional es necesario modificar la orientación del vehículo. El comportamiento dinámico se puede representar por un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales altamente acopladas. Además se considera que dichas ecuaciones son afectadas por perturbaciones externas desconocidas pero acotadas, en principio el efecto aerodinámico externo introducido por ráfagas de viento.

A continuación, se presentan las ecuaciones dinámicas del cuadrirrotor (3.1) - (3.6). Las ecuaciones de traslación (3.1) - (3.3) se tomaron del artículo de Cervantes et al en [32] y las ecuaciones de orientación (3.4) - (3.6) del artículo de Eltayeb et al en [33].

$$\ddot{x} = (c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi)(u_1/m) - (1/2)C_x A \rho \dot{x} |\dot{x}| + \xi_x(t) \quad (3.1)$$

$$\ddot{y} = (s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi)(u_1/m) - (1/2)C_y A \rho \dot{y} |\dot{y}| + \xi_y(t) \quad (3.2)$$

$$\ddot{z} = -g + (c_\theta c_\phi)(u_1/m) + \xi_z(t) \quad (3.3)$$

$$\ddot{\phi} = a_1 \dot{\theta} \dot{\psi} + a_2 \dot{\theta} \Omega_d + a_\phi u_\phi + \xi_\phi(t) \quad (3.4)$$

$$\ddot{\theta} = a_3 \dot{\phi} \dot{\psi} + a_4 \dot{\phi} \Omega_d + a_\theta u_\theta + \xi_\theta(t) \quad (3.5)$$

$$\ddot{\psi} = a_5 \dot{\phi} \dot{\theta} + a_\psi u_\psi + \xi_\psi(t) \quad (3.6)$$

donde

$$a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \quad a_2 = \frac{Jr}{I_x} \quad (3.7)$$

$$a_3 = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \quad a_4 = \frac{Jr}{I_y} \quad (3.8)$$

$$a_5 = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \quad a_\phi = \frac{1}{I_x} \quad (3.9)$$

$$a_\theta = \frac{1}{I_y} \quad a_\psi = \frac{1}{I_z} \quad (3.10)$$

Además, $s_\phi = \sin \phi$, $c_\phi = \cos \phi$, $s_\theta = \sin \theta$, $c_\theta = \cos \theta$, $s_\psi = \sin \psi$, $c_\psi = \cos \psi$. Se define al vector $\delta = [x \ y \ z]^\top \in \mathbb{R}^3$, como la posición traslacional en el espacio tridimensional del centro de masa del cuadrirrotor (ubicado en el origen del marco \mathcal{B}) relativo al marco inercial \mathcal{I} , esto puede observarse en la Figura 3.6. En esta figura se muestra que el eje x está la dirección del frente del vehículo, y será la dirección perpendicular al eje x y z es el eje vertical. La dinámica de orientación del vehículo se describe utilizando los ángulos de Euler, donde, ϕ denota el ángulo de alabeo, θ denota el ángulo de cabeceo y ψ denota el ángulo de guiñada. La masa del vehículo se denota por el parámetro m y g denota la aceleración debida a la gravedad. Los parámetros I_x , I_y e I_z son los momentos de inercia alrededor de los ejes $x_{\mathcal{B}}$, $y_{\mathcal{B}}$, $z_{\mathcal{B}}$, mientras que J_r es el momento de inercia del rotor. La entrada de control u_1 es el empuje total. Los torques de control para las dinámicas rotacionales alrededor de los ejes $x_{\mathcal{B}}$, $y_{\mathcal{B}}$, $z_{\mathcal{B}}$, son dados por u_ϕ , u_θ y u_ψ . Los términos $\xi_v(\cdot)$, $v=x,y, z$, representan las perturbaciones externas que actúan sobre las dinámicas traslacionales y para las dinámicas rotacionales, los términos que actuarán sobre dichas dinámicas, serán $\xi_\sigma(\cdot, \cdot)$, $\sigma=\phi, \theta, \psi$, lo cuales además de integrar las perturbaciones externas, también tienen dinámicas no modeladas en las ecuaciones de orientación. Estas perturbaciones son consideradas como desconocidas pero acotadas. Los términos $-\frac{1}{2}C_x A \rho \dot{x} |\dot{x}|$ y $-\frac{1}{2}C_y A \rho \dot{y} |\dot{y}|$ representan los efectos de arrastre aerodinámico que afectará el movimiento del vehículo y que dependen de la velocidad del mismo. Para el análisis se considerará que estos dos últimos términos son desconocidos pero acotados. C_x y C_y denotan los coeficientes de arrastre aerodinámico respecto al eje x e y , respectivamente, A el área de la sección transversal que es la misma para ambos ejes por simetría, y ρ es la densidad de aire.

Las entradas de control para un vehículo en configuración X, están dadas como

$$u_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.11)$$

$$u_\phi = bl \sin(\pi/4)(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.12)$$

$$u_\theta = bl \sin(\pi/4)(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.13)$$

$$u_\psi = d(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \quad (3.14)$$

donde b es el factor de empuje, d es el factor de arrastre y l es la distancia entre el centro del UAV y el centro del rotor. La velocidad del rotor Ω_d se calcula como

$$\Omega_d = -\Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4.$$

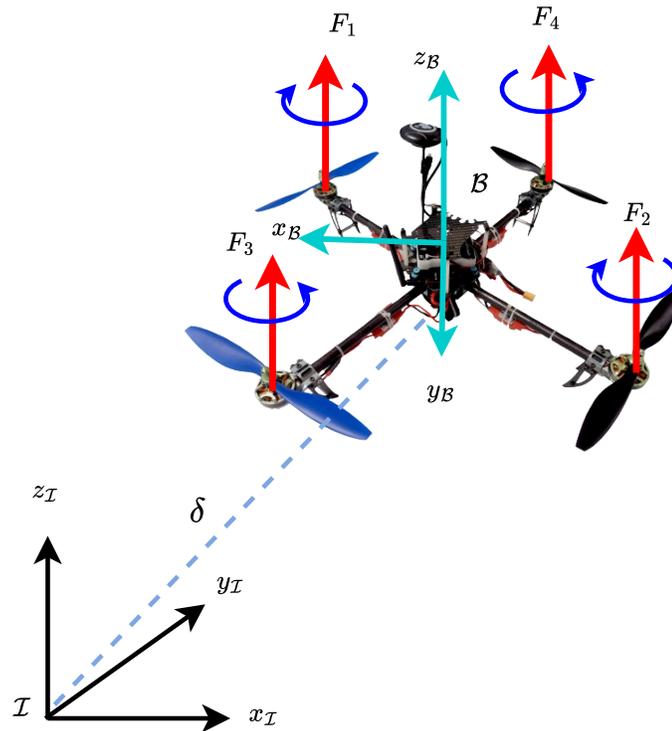


Figura 3.6: Vehículo con respecto al marco del cuerpo y el marco inercial.

Como puede observarse el modelo dinámico (3.1) - (3.6) se ve afectado por dinámicas no modeladas, incertidumbres paramétricas así como perturbaciones externas. Este hecho dificulta el diseño del algoritmo de control para fines de estabilización o seguimiento. Es decir, una estrategia basada en una ley de control lineal o no lineal, ambas presentarán problemas para llevar al sistema a la condición deseada, dado que, su estructura no está diseñada para poder compensar estos efectos de perturbación. El problema de la compensación de dichas perturbaciones puede solucionarse a través del uso técnicas de control de tipo adaptable y/o robusto. Una de las técnicas de control que ha demostrado ser efectiva para compensación de perturbaciones es el llamado SMC. Sin embargo, los modos deslizantes convencionales tienen ciertas desventajas en la implementación sobre sistemas mecánicos, como lo son el desgaste de los actuadores el consumo energético y la condición de robustez condicionada al alcance de la superficie de deslizamiento. Es por esto que en el presente trabajo se propone el uso de la técnica de ISMC. Las principales diferencias entre el SMC y el ISMC, es que el segundo elimina la fase de alcanzabilidad, haciendo que el modo deslizante este presente en todo momento en la respuesta del sistema, garantizando la condición de deslizamiento (o condición de robustez) del sistema a partir de cualquier condición inicial. Por otro lado, el SMC es una técnica de control que utiliza una señal de control discontinuo que entra directamente a la planta haciendo la conmutación de alta frecuencia provoque que el efecto de las dinámicas no modeladas del sistema se incremente afectando el desempeño

del sistema. Además, como ya se menciona, para el SMC convencional primero es necesario pasar por la fase de alcanzabilidad antes de llegar a la fase de deslizamiento, lo que provoca que en el transcurso entre estas dos fases, el sistema pueda ser afectado por las perturbaciones. Es por esto que en este trabajo de tesis se diseñará un algoritmo de control basado en la técnicas ISMC, el cual está compuesto por una parte continua (o nominal) y un control equivalente. Es necesario aclarar que la estrategia ISMC en este caso es utilizada principalmente para la estimación de las perturbaciones que afectan al sistema. Esta estimación es resultado de la filtración de una señal discontinua a través de un filtro pasa-bajas, la señal de salida promedio es el control equivalente, posteriormente el control total es alimentado al sistema para compensar las perturbaciones y que el control nominal sea el que garantice la condición de estabilidad o seguimiento de trayectoria sin importar cuales sean las condiciones iniciales del sistema.

Ahora bien, para el diseño de la leyes de control basadas en ISMC, es necesario reescribir las ecuaciones (3.1)- (3.6) en una representación de espacio de estado, como sigue

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = f_x(\dot{\zeta}, t) + u_x \quad (3.15)$$

$$\dot{y}_1 = y_2, \quad \dot{y}_2 = f_y(\dot{\zeta}, t) + u_y \quad (3.16)$$

$$\dot{z}_1 = z_2, \quad \dot{z}_2 = f_z(\dot{\zeta}, t) + u_z \quad (3.17)$$

$$\dot{\phi}_1 = \phi_2, \quad \dot{\phi}_2 = f_\phi(\eta, \dot{\eta}, t) + u_\phi \quad (3.18)$$

$$\dot{\theta}_1 = \theta_2, \quad \dot{\theta}_2 = f_\theta(\eta, \dot{\eta}, t) + u_\theta \quad (3.19)$$

$$\dot{\psi}_1 = \psi_2, \quad \dot{\psi}_2 = f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t) + u_\psi \quad (3.20)$$

donde $\zeta = [x_1 \ y_1 \ z_1]^\top$, $\eta = [\phi_1 \ \theta_1 \ \psi_1]^\top$. También se consideran las siguientes entradas de control virtual $u_x = (c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi)(u_1/m)$, $u_y = (s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi)(u_1/m)$ para las dinámicas de x y y . Además, para la dinámica de altura (z) se define el control auxiliar $u_z = (c_\theta c_\phi)(u_1/m)$. Los elementos $f_x(\dot{\zeta}, t)$, $f_y(\dot{\zeta}, t)$, $f_z(\dot{\zeta}, t)$, $f_\phi(\dot{\eta}, t)$, $f_\theta(\dot{\eta}, t)$ y $f_\psi(\dot{\eta}, t)$ representan las perturbaciones agrupadas que afectan a las dinámicas traslacionales y rotacionales, dichas perturbaciones se asumen desconocidas pero acotadas. Las expresiones de dichos términos se muestran a continuación:

$$f_x(\dot{\zeta}, t) = -(1/2)C_x A \rho x_2 |x_2| + \xi_x(t) \quad (3.21)$$

$$f_y(\dot{\zeta}, t) = -(1/2)C_y A \rho y_2 |y_2| + \xi_y(t) \quad (3.22)$$

$$f_z(\dot{\zeta}, t) = -g + \xi_z(t) \quad (3.23)$$

$$f_\phi(\eta, \dot{\eta}, t) = a_1 \theta_2 \psi_2 + a_2 \theta_2 \Omega_d + \xi_\phi(\dot{\eta}, t) \quad (3.24)$$

$$f_\theta(\eta, \dot{\eta}, t) = a_3 \phi_2 \psi_2 + a_4 \phi_2 \Omega_d + \xi_\theta(\dot{\eta}, t) \quad (3.25)$$

$$f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t) = a_5 \phi_2 \theta_2 + \xi_\psi(\dot{\eta}, t) \quad (3.26)$$

Como parte del planteamiento del problema de control se consideran las siguientes suposiciones:

Suposición 1. Suponiendo que se cumplen las siguientes condiciones de acotamiento

$$|f_v(\dot{\zeta}, t)| \leq f_v^+, \quad |f_\sigma(\eta, \dot{\eta}, t)| \leq f_\sigma^+ \quad (3.27)$$

donde f_v^+ y f_σ^+ son constantes positivas, $v = x, y, z$ y $\sigma = \phi, \theta$ y ψ .

Suposición 2. La condición de acoplamiento se debe de satisfacer para las perturbaciones agrupadas (3.21)- (3.26), que son

$$f_v(\dot{\zeta}, t) = u_{v_f}, \quad f_\sigma(\eta, \dot{\eta}, t) = a_\sigma u_{\sigma_f} \text{ con } u_{v_f}, u_{\sigma_f} \in \mathbb{R} \quad (3.28)$$

esto significa que las entradas u_v y u_σ influyen en las perturbaciones agrupadas $f_v(\dot{\zeta}, t)$ y $f_\sigma(\eta, \dot{\eta}, t)$, respectivamente.

El objetivo de control es realizar una tarea de seguimiento de trayectoria con trayectorias previamente definidas $\bar{p}^d = [x_1^d \ y_1^d \ z_1^d \ \phi_1^d \ \theta_1^d \ \psi_1^d]^\top$, esto considerando un cuadrirrotor afectado por incertidumbres, dinámicas no modeladas y perturbaciones externas. Las perturbaciones externas son consideradas como ráfagas de viento. Las trayectorias deseadas (z_1^d, ψ_1^d) pueden establecerse de manera independiente, sin embargo ϕ_1^d y θ_1^d se calculan a través de la siguiente transformación:

$$\phi_1^d = \arcsin\left(\frac{m[u_x s_{\psi_1^d} - u_y c_{\psi_1^d}]}{u_1}\right), \quad \theta_1^d = \arcsin\left(\frac{m[u_x c_{\psi_1^d} + u_y s_{\psi_1^d}]}{u_1 c_{\phi_1^d}}\right) \quad (3.29)$$

en donde u_x y u_y son los controles para x_1^d y y_1^d y para las trayectorias reales del vehículo x_1 y y_1 .

A continuación, se presenta el desarrollo matemático de la ley de control para la dinámica de altura (z) y para la dinámica de guiñada (ψ). Debido a que las ecuaciones que describen las dinámicas traslacionales y rotacionales tienen la misma forma, se puede aplicar la misma estrategia para el diseño de sus leyes.

3.2.2. Control de traslación

A continuación, se muestran las entradas de control diseñadas a través de la estrategia ISMC basada en el control equivalente para controlar las dinámicas traslacionales del cuadrirrotor en los ejes x , y y z :

$$u_x = [m/u_1][(\dot{x}_2^d + K_x^\top \bar{e}_x) + u_{x,1eq}] \quad (3.30)$$

$$u_y = [m/u_1][(\dot{y}_2^d + K_y^\top \bar{e}_y) + u_{y,1eq}] \quad (3.31)$$

$$u_z = \dot{z}_2^d + K_z^\top \bar{e}_z + g + u_{z,1eq} \quad (3.32)$$

En esta subsección, a manera de ejemplo sólo se desarrollará la ley de control (3.32) para la dinámica de altura. Lo anterior considerando que el mismo desarrollo matemático puede aplicarse a las dinámicas de traslación en los ejes x e y , obteniéndose los correspondientes controladores mostrados en (3.30) y (3.31).

Nota: El desarrollo completo del controlador (3.30) se encuentra en el Apéndice A

Desarrollo para la dinámica de altura

Primero, retomamos el sistema (3.17):

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (3.33a)$$

$$\dot{z}_2 = f_z(\dot{\zeta}, t) + u_z \quad (3.33b)$$

Se define el vector del error de seguimiento como:

$$\bar{e}_z = [e_{z_1}, e_{z_2}]^\top \quad (3.34)$$

donde

$$e_{z_1} = z_1^d - z_1 \quad (3.35a)$$

$$e_{z_2} = z_2^d - z_2 \quad (3.35b)$$

y z_1^d, z_2^d son la posición y la velocidad deseada respectivamente. Por lo tanto, la dinámica del error en espacio de estado resulta en

$$\dot{e}_{z_1} = e_{z_2} \quad (3.36a)$$

$$\dot{e}_{z_2} = \dot{z}_1^d - f_z(\dot{\zeta}, t) - u_z \quad (3.36b)$$

Primero, se diseña una ley de control nominal con la finalidad de estabilizar las dinámicas del error considerando que no existe la influencia de la perturbación agrupada, es decir $f_z = 0$. Esta estructura de control tiene la siguiente forma

$$u_{z,0} = z_2^d + K_z^\top \bar{e}_z \quad (3.37)$$

en donde $K_z = [c_{z_1}, c_{z_2}]^\top$ con c_{z_1}, c_{z_2} como constantes positivas. Basándose en el esquema de rechazo de perturbaciones del ISMC, la entrada de control u_z está formada por la siguiente estructura

$$u_z = u_{z,0} + u_{z,1} \quad (3.38)$$

donde el primer componente ($u_{z,0}$) representa el control nominal calculado en (3.37), mientras que el segundo componente ($u_{z,1}$) se encarga de rechazar las perturbaciones agrupadas $f_z(\dot{\zeta}, t)$. Por lo tanto, el lazo cerrado queda como

$$\dot{e}_{z_1} = e_{z_2} \quad (3.39a)$$

$$\dot{e}_{z_2} = \dot{z}_2^d - f_z(\dot{\zeta}, t) - u_{z,0} - u_{z,1} \quad (3.39b)$$

Ahora, se define la variable de deslizamiento integral como

$$s = s_0(\bar{e}_z) + r \quad (3.40)$$

El término $s_0(\bar{e}_z)$ tiene la estructura lineal de una variable deslizante de un SMC estándar $s_0(\bar{e}_z) = me_{z_1} + e_{z_2}$. El término r representa a la variable auxiliar, la cual introduce el término integral en la expresión (3.40). La derivada temporal de (3.40) queda como

$$\dot{s} = me_{z_2} + \dot{z}_2^d - f_z(\zeta, t) - u_{z,0} - u_{z,1} + \dot{r} \quad (3.41)$$

La derivada temporal de la variable auxiliar r se diseña para compensar los elementos conocidos de la dinámica de s

$$\dot{r} = -me_{z_2} - \dot{z}_2^d + u_{z,0} \quad (3.42)$$

La condición inicial para la variable auxiliar es $r(0) = -s_0(\bar{e}_z(0))$, la cual garantiza que la variable de deslizamiento inicie en la superficie $s = 0$. Se procede a sustituir (3.42) en (3.41), se obtiene

$$\dot{s} = -f_z(\zeta, t) - u_{z,1} \quad (3.43)$$

Debido a que el modo deslizante se encuentra en todo momento presente, es decir $s(t) = \dot{s}(t) = 0$ para toda $t \geq 0$, de (3.43), se puede obtener el control equivalente como

$$u_{z,1eq} = -f(\zeta, t) \quad (3.44)$$

Es por esto, que el movimiento deslizante queda como

$$\dot{e}_{z_1} = e_{z_2} \quad (3.45a)$$

$$\dot{e}_{z_2} = \dot{z}_2^d - u_{z,0} \quad (3.45b)$$

con esto se observa que esta ecuación tiene el mismo orden que el sistema original, además de ser idéntico al sistema nominal. Esto significa que la perturbación agrupada es cancelada desde el inicio del movimiento deslizante, haciendo que teóricamente el sistema nunca sea afectado por la perturbación.

Por otro lado, es necesario proponer una entrada de control u_1 que mantenga el modo deslizante a lo largo de la superficie $s = 0$. Esto se puede lograr a través de la siguiente ley de control discontinua

$$u_{z,1} = M_z \text{sgn}(s) \quad (3.46)$$

donde M_z representa una ganancia positiva y

$$\text{sgn}(s) := \begin{cases} 1 & \text{si } s > 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \\ \in [-1; 1] & \text{si } s = 0 \end{cases} \quad (3.47)$$

La ganancia de control M_z se elige para garantizar que el modo deslizante cumpla con la condición de $s = 0$. Para esto se utilizará la siguiente función candidata de Lyapunov $V = s^2/2$. Calculando la derivada de V a lo largo de la trayectoria (3.43) y considerando (3.43) y (3.46) y la Suposición 1, se tiene:

$$\dot{V} = -s f_z(\dot{\zeta}, t) - M_z s \text{sgn}(s) \leq \bar{M}_z |s| \quad (3.48)$$

en donde $\bar{M}_z = f_z^+ - M_z$. Para comprobar que \dot{V} es definida negativa, la condición $M_z > f_z^+$ debe de satisfacerse, haciendo que el modo deslizante se mantenga en $s = 0$ desde el primer instante. Debido a que la condición de deslizamiento siempre se cumple, entonces (3.32) puede reescribirse en términos del control equivalente como:

$$u_z = u_{z,0} + u_{z,1eq} \quad (3.49)$$

Obteniéndose la expresión del controlador de la ecuación (3.32).

De acuerdo con [34], aplicando un filtro pasa-bajas (FPB) al control discontinuo $u_{z,1}$ es posible obtener el control equivalente en (3.44), en donde se tiene componentes de baja frecuencia en el control discontinuo $u_{z,1}$. La estructura del filtro está dada por [35], [36]:

$$\tau \dot{u}_{z,1av} + u_{z,1av} = u_{z,1} \quad (3.50)$$

donde $u_{z,1av}$ es el promedio de la señal de control discontinua ($u_{z,1av} \approx u_{z,1eq}$) y $\tau > 0$ es la constante de tiempo del filtro.

Para obtener una correcta aproximación del control equivalente a través de FPB, la constante del tiempo debe de ser lo suficientemente grande para eliminar los elementos de alta frecuencia pero lo suficientemente pequeña para preservar los componentes de baja frecuencia. De acuerdo con [37], debido a que la función discontinua (3.46) es filtrada en la línea de control directo, se requiere colocar el control discontinuo $u_{z,1}$ en el sistema dinámico interno (3.42) en lugar de alimentarlo a la entrada de la planta. Por lo tanto, esta modificación queda de la siguiente manera:

$$\dot{s} = m e_{z_1} + \dot{z}_2^d - f_z(\zeta, t) - u_z + \dot{r} \quad (3.51)$$

$$\dot{r} = -m e_{z_1} - \dot{z}_2^d + u_z - u_{z,1} \quad (3.52)$$

en donde la entrada de control u_z en la ruta de control directa está definida en (3.49).

Este cambio tiene como propósito garantizar que el modo deslizante es generado, así

como también el control equivalente elimina el término de las perturbaciones agrupadas de la expresión (3.44). La ecuación (3.52) puede entenderse como un proceso dinámico que evoluciona internamente para generar el modo deslizante establecido para (3.40). Es importante mencionar que la estructura en (3.51)- (3.52) evita el efecto castaño debido a que la discontinuidad solamente aparece en el proceso interno (3.52), esto debido a que las dinámicas no modeladas no son excitadas en la línea de control directo. En la Figura 3.7 se observa el diagrama del sistema en lazo cerrado para el diseño de la ley de control.

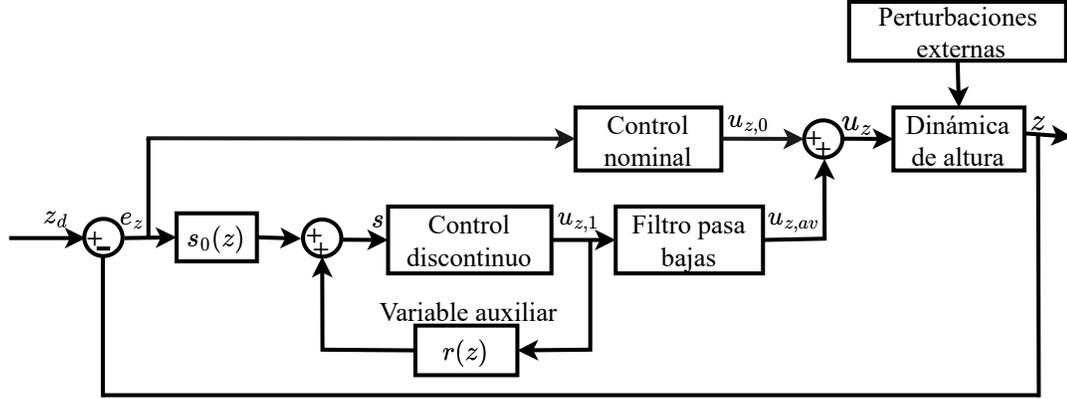


Figura 3.7: Diagrama del sistema en lazo cerrado para la dinámica de altura.

3.2.3. Control de orientación

En esta subsección, se desarrolla el control de orientación del vehículo aéreo. Dado que el sistema del cuadrirrotor es un sistema subactuado, es decir no cuenta con entradas de control directas en la dinámica de x y y , éste no puede desplazarse en traslación en el plano horizontal si no existe un cambio de orientación del vehículo; es decir para moverse sobre el eje x , primero se deberá de cambiar el ángulo de cabeceo (θ), mientras que para moverse sobre el eje y , es necesario modificar el ángulo de alabeo (ϕ) para desplazarse de forma traslacional en dichos ejes. En el caso de la dinámica del ángulo de guiñada ésta se encuentra directamente actuada por su propia entrada de control. Debido a que se trata de un sistema subactuado, las dinámicas deseadas para las dinámicas de cabeceo y alabeo, están definidas a partir de las dinámicas de traslación x e y .

A continuación, se muestran las entradas de control diseñadas a través de la estrategia ISMC basada en el control equivalente para controlar las dinámicas angulares de alabeo, cabeceo y guiñada del cuadrirrotor:

$$u_\phi = (\dot{\phi}_2^d/a_\phi) + (K_\phi^\top \bar{e}_\phi/a_\phi) + u_{\phi,1eq} \quad (3.53)$$

$$u_\theta = (\dot{\theta}_2^d/a_\theta) + (K_\theta^\top \bar{e}_\theta/a_\theta) + u_{\theta,1eq} \quad (3.54)$$

$$u_\psi = (\dot{\psi}_2^d/a_\psi) + (K_\psi^\top \bar{e}_\psi/a_\psi) + u_{\psi,1eq} \quad (3.55)$$

En esta subsección, a manera de ejemplo de las dinámicas de orientación, sólo se desarrollará la ley de control para la dinámica de guiñada (3.55). Lo anterior considerando que el mismo desarrollo matemático puede aplicarse a las dinámicas de orientación de alabeo y cabeceo, obteniéndose los correspondientes controladores mostrados en (3.53) y (3.54).

Desarrollo para la dinámica de guiñada

Partiendo de (3.20)

$$\dot{\psi}_1 = \psi_2 \quad (3.56a)$$

$$\dot{\psi}_2 = f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t) + u_\sigma \quad (3.56b)$$

Se define el vector del error del seguimiento de trayectoria en espacio de estado, como

$$\bar{e}_{\psi_1} = [e_{\psi_1} \ e_{\psi_2}]^\top \quad (3.57)$$

donde

$$e_{\psi_1} = \psi_1^d - \psi_1 \quad (3.58a)$$

$$e_{\psi_2} = \dot{\psi}_2^d - \dot{\psi}_2 \quad (3.58b)$$

y ψ_1^d , $\dot{\psi}_2^d$ representan la posición y la velocidad deseada, por lo que el error en espacio de estado queda como

$$\dot{e}_{\psi_1} = \dot{\psi}_2 \quad (3.59a)$$

$$\dot{e}_{\psi_2} = \dot{\psi}_2^d - f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t) - u_\psi \quad (3.59b)$$

Se procede a diseñar el control nominal, con el fin de estabilizar a (3.59), considerando las perturbaciones agrupadas como $f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t) = 0$. La estructura de la ley de control se presenta de la siguiente manera

$$u_{\psi,0} = \dot{\psi}_2^d + K_\psi^\top \bar{e}_\psi \quad (3.60)$$

en donde K_ψ representa un vector de constantes positivas

$$K_\psi = [c_{\psi_1}, c_{\psi_2}]^\top \quad (3.61)$$

con c_{ψ_1} , c_{ψ_2} como constantes positivas. De acuerdo al esquema de rechazo de perturbaciones del ISMC, la entrada de control u_ψ se conforma por la siguiente estructura

$$u_\psi = u_{\psi,0} + u_{\psi,1} \quad (3.62)$$

en donde se observa que (3.62) está conformada por dos partes, siendo $(u_{\psi,0})$ la parte de control nominal, previamente calculado en (3.60), y $(u_{\psi,1})$ la parte discontinua, la

cual rechaza las perturbaciones agrupadas $f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t)$. Obteniendo el siguiente sistema en lazo cerrado

$$\dot{e}_{\psi_1} = e_{\psi_2} \quad (3.63a)$$

$$\dot{e}_{\psi_2} = \dot{\psi}_2^d - f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t) - u_{\psi,0} - u_{\psi,1} \quad (3.63b)$$

Debido a que se trata de un control de seguimiento, en (3.63) se observa que la dinámica del error en lazo cerrado, se vuelve el nuevo estado del sistema. Se define la variable de deslizamiento integral como

$$s = s_0(\bar{e}_\psi) + r \quad (3.64)$$

en el que el término $s_0(\bar{e}_\psi)$ tiene la estructura lineal de la variable deslizante de un SMC convencional $s_0(\bar{e}_\psi) = me_{\psi_1} + e_{\psi_2}$. En cuanto al término r , representa a la variable auxiliar, la cual se encarga de introducir el término integral en la expresión (3.64), cuya derivada temporal es

$$\dot{s} = me_{\psi_2} + \dot{\psi}_2^d - f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t) - \frac{1}{I_z}(u_{\psi,0} + u_{\psi,1}) + \dot{r} \quad (3.65)$$

A continuación, se diseña la derivada temporal de la variable auxiliar \dot{r} , para compensar los elementos conocidos de la dinámica de s

$$\dot{r} = -me_{\psi_2} - \dot{\psi}_2^d + \frac{1}{I_z}u_{\psi,0} \quad (3.66)$$

Con el objetivo de garantizar que la variable de deslizamiento inicie en la superficie $s = 0$, la condición inicial para la variable auxiliar es $r(0) = -s_0(\bar{e}_\psi(0))$. Por lo que se sustituye (3.66) en (3.65)

$$\dot{s} = -f_\psi(\eta, \dot{\eta}, t) - u_{\psi,1} \quad (3.67)$$

Puesto que el modo deslizante está en todo momento presente, $s(t) = \dot{s}(t) = 0$ para toda $t \geq 0$, de (3.67), es posible obtener el control equivalente como

$$u_{\psi,1eq} = -f(\eta, \dot{\eta}, t) \quad (3.68)$$

Finalmente, el movimiento deslizante queda como

$$\dot{e}_{\psi_1} = e_{\psi_2} \quad (3.69a)$$

$$\dot{e}_{\psi_2} = \dot{z}_2^d - u_{\psi,0} \quad (3.69b)$$

con lo que se observa en (3.69), que la ecuación de movimiento tiene el mismo orden que el sistema original, además de ser igual al sistema nominal. Lo anterior significa que la perturbación agrupada quedará cancelada desde que inicie el movimiento deslizante, demostrando que teóricamente la perturbación nunca afectará al sistema.

Se propone una entrada de control $u_{\psi,1}$, para mantener el modo deslizante a lo

largo de la superficie $s = 0$. Por lo que la ley de control discontinua para lograrlo es la siguiente.

$$u_{\psi,1} = M_{\psi} \text{sgn}(s) \quad (3.70)$$

donde M_{ψ} representa una ganancia positiva y

$$\text{sgn}(s) := \begin{cases} 1 & \text{si } s > 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \\ \in [-1; 1] & \text{si } s = 0 \end{cases} \quad (3.71)$$

se elige con el fin de garantizar que el modo deslizante cumpla con la condición de $s = 0$, es por esto, que se utiliza la función candidata de Lyapunov $V = s^2/2$. Obteniendo la derivada de V a lo largo de la trayectoria (3.67) y considerando (3.70) y la Suposición 1, se tiene la siguiente ecuación

$$\dot{V} = -sf(\eta, \dot{\eta}, t) - M_{\psi} s \text{sgn}(s) \leq \bar{M}_{\psi} |s| \quad (3.72)$$

donde $\bar{M}_{\psi} = f_{\psi}^{+} - M_{\psi}$. Con el fin de comprobar que \dot{V} es definida negativa, la condición de $M_{\psi} > f_{\psi}^{+}$ debe de satisfacerse, con lo cual el modo deslizante se mantendrá en $s = 0$ desde el primer instante de tiempo. Debido a que la condición de deslizamiento siempre se cumple, (3.62) se puede reescribir con términos del control equivalente:

$$u_{\psi} = u_{\psi,0} + u_{\psi,1eq} \quad (3.73)$$

obteniéndose la expresión del controlador de la ecuación (3.55).

Sobre la base de [34], al aplicar un filtro pasa-bajas (FPB) al control discontinuo $u_{\psi,1}$ se puede obtener el control equivalente en (3.68), en donde se encuentran componentes de baja frecuencia en el control discontinuo $u_{\psi,1}$. El filtro tiene una estructura dada por [35], [36] y se presenta a continuación

$$\tau \dot{u}_{\psi,1av} + u_{\psi,1av} = u_{\psi,1} \quad (3.74)$$

donde $u_{\psi,1av}$ representa el promedio de la señal discontinua ($u_{\psi,1av} \approx u_{\psi,1eq}$) y $\tau > 0$ es la constante de tiempo del filtro.

Para una correcta aproximación del control equivalente a través del FPB, la constante del tiempo debe seleccionarse para que sea lo suficientemente grande para eliminar los componentes de alta frecuencia y lo suficientemente pequeña para conservar los componentes de baja frecuencia. Acorde a [37], es necesario colocar el control discontinuo $u_{\psi,1}$ en el sistema dinámico interno (3.66) en lugar de alimentarlo a la entrada de la planta. Obteniendo así, la siguiente modificación:

$$\dot{s} = me_{\psi_1} + \dot{\psi}_2^d - f_{\psi}(\eta, \dot{\eta}, t) - u_{\psi} + \dot{r} \quad (3.75)$$

$$\dot{r} = -me_{\psi_1} - \dot{\psi}_2^d + u_{\psi} - u_{\psi,1} \quad (3.76)$$

donde u_ψ en la ruta de control directa se define en (3.73).

El propósito de realizar este cambio es garantizar que el modo deslizante se genera y que el control equivalente elimina el término de las perturbaciones agrupadas de la expresión (3.68). En la ecuación (3.76) se muestra un proceso dinámico que evoluciona internamente para generar el modo deslizante establecido para (3.64). La estructura en (3.75)- (3.76) evita el efecto de castaño, ya que la discontinuidad solamente está presente en el proceso interno (3.76), esto es debido a que las dinámicas no modeladas no son excitadas en la línea de control directo.

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama del sistema en lazo cerrado para el diseño de la ley de control.

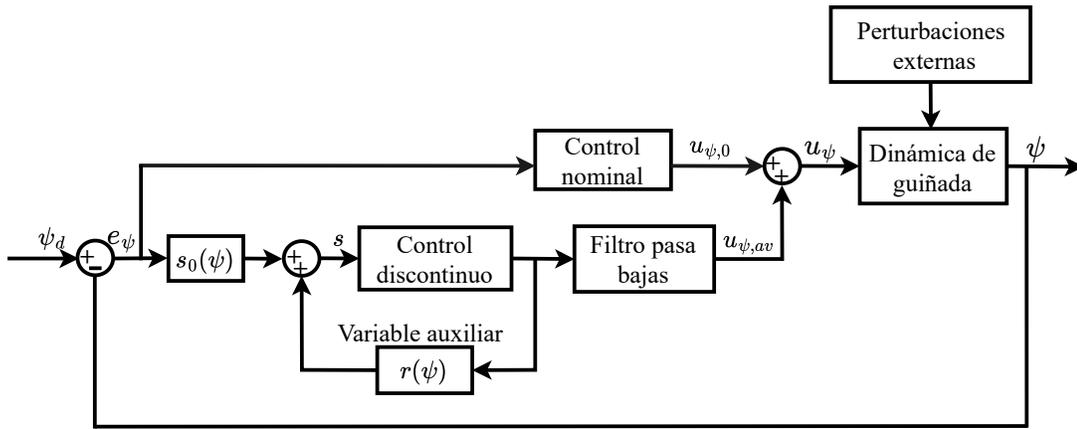


Figura 3.8: Diagrama del sistema en lazo cerrado para la dinámica de guiñada.

3.2.4. Sistema de sintonización difusa del control equivalente

En esta sección, se presenta la contribución más relevante del presente trabajo de tesis. Ésta se basa en el diseño de un sistema de inferencia difusa (FIS, por sus siglas en inglés, *Fuzzy Inference System*) de tipo Mamdani [38] para ajustar en línea la constante de tiempo τ del FPB (3.74), y poder obtener el control equivalente de forma dinámica a partir del error de seguimiento, estimando de forma adaptable, las perturbaciones desconocidas que afectan al cuadricóptero.

El diseño de este FIS se realiza a través de un procedimiento heurístico, ya que se basa en el marco de conocimiento obtenido al realizar el ajuste de esta constante de tiempo y observando el efecto que causa en la magnitud del error de seguimiento dentro del esquema de control de rechazo ISMC.

El sistema en lazo cerrado es controlado por el ISMC, el cual es ajustado por el FIS, lo que puede visualizarse en las Figuras 3.10 y 3.11, que son modificaciones de las Figuras 3.7 y 3.8. Dicho esquema de control diseñado se basa en la estructura propuesta en [34] y [38], incorporando el ajuste adaptable del FPB, mediante el FIS. Se puede notar que la adaptación difusa de τ depende del valor actual del error de seguimiento.

La constante de tiempo se calcula a partir de la frecuencia de corte del filtro ω_c , es

decir $\tau = 1/\omega_c$. Este ajuste dinámico aproxima de mejor manera el valor promedio de la función discontinua (3.70), que representa una mejor aproximación del control equivalente. En ese sentido, el cálculo dinámico del control equivalente conlleva la corrección dinámica de las perturbaciones agrupadas en el lazo de control.

Con base en la experiencia obtenida durante el proceso de sintonización del controlador ISMC, se puede concluir que si el valor de τ decrece (o bien ω_c crece), también incrementará la influencia de las altas frecuencias en la entrada de control, reduciendo el desfase entre $u_{z,1eq}$ y la perturbación agrupada, además de que disminuye el error de seguimiento. Por otro lado, si el valor de τ crece (o bien ω_c decrece), se obtiene un comportamiento opuesto, lo que significa que se incrementa el error de seguimiento. Por lo tanto, existe una relación inversa entre la magnitud de error de seguimiento y la magnitud de ω_c del FPB. Esta información representa el marco de conocimiento que incorpora la experiencia adquirida en el ajuste de τ o su equivalente ω_c . Este conocimiento puede ser utilizado para diseñar un sistema difuso de tipo Mamdani, capaz de determinar dinámicamente una frecuencia de corte, dependiendo de la calidad del error de seguimiento. El FIS propuesto está conformado por un universo de discurso de entrada, esto es la variable del universo de discurso se escoge como la magnitud del error de seguimiento $|\bar{e}_{z_1}(t)|$ en metros, y cuenta con un universo de discurso de salida, que corresponde a ω_c , en Hz. La arquitectura del FIS consiste de cinco funciones de membresía gaussianas, de la forma $e^{-(x-c)^2/2\sigma^2}$ donde x es el valor nitido, con una desviación estándar $\sigma = 0.3$ y centros de $c = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ metros, el rango de la entrada del universo de discurso está limitado al intervalo $[0, 1]$. Mientras tanto, las funciones de membresía de salida, consisten de dos funciones singleton ubicadas en 0 y en 70 Hz y el rango está limitado a $[0, 140]$ Hz. En la Figura 3.9, se muestra la estructura de las funciones de membresía, las cuales fueron propuestas a prueba y error. Las variables lingüísticas usadas para la magnitud del error de seguimiento son:

- Z (Zero)
- SE (Small Error)
- ME (Medium Error)
- BE (Big Error)
- HE (Huge Error)

Por otro lado, para la frecuencia de corte, las variables lingüísticas asignadas son:

- SF (Small Frequency)
- HF (High Frequency)

Una vez definidas las variables lingüísticas, se procede a diseñar las reglas del *modus ponens generalizado* o bien las reglas SI-ENTONCES, con base en el marco de conocimiento, descrito anteriormente.

- Si e_r es ZE, entonces τ es HF.
- Si e_r es SE, entonces τ es SF.
- Si e_r es ME, entonces τ es SF.
- Si e_r es BE, entonces τ es SF.
- Si e_r es HE, entonces τ es SF.

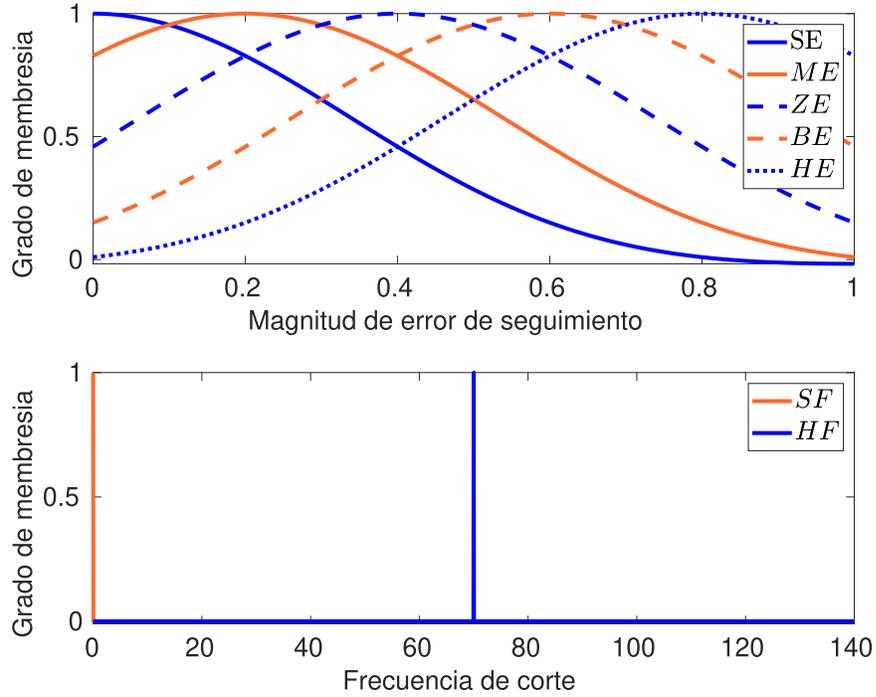


Figura 3.9: Estructura de las funciones de membresía del sistema de inferencia Mamdani.

En las Figuras 3.10 y 3.11, se muestran los diagramas del sistema en lazo cerrado para las dinámicas de altura y guiñada, incorporando el sistema de ajuste difuso Mamdani para las estructuras de los FPBs.

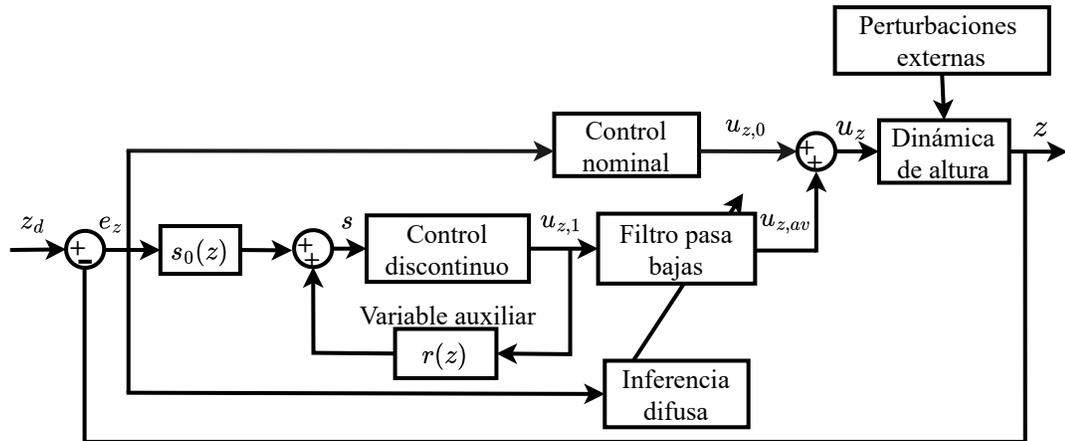


Figura 3.10: Diagrama de control para la dinámica de altura con sistema difuso.

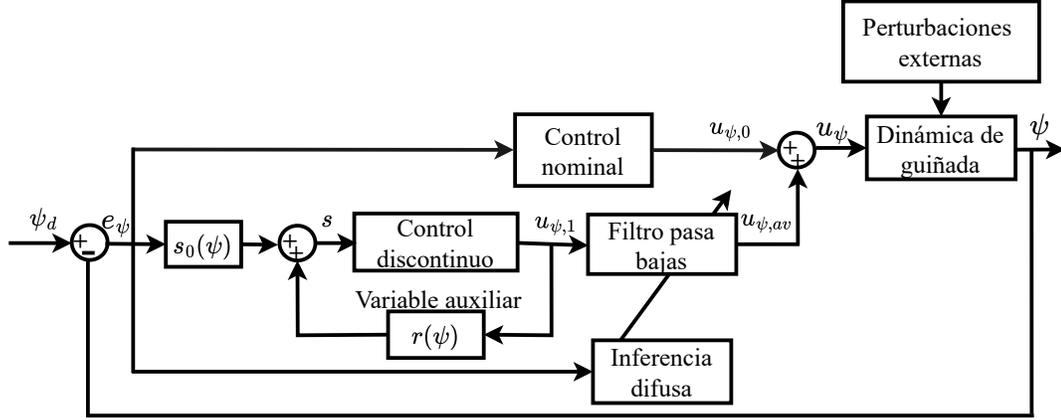


Figura 3.11: Diagrama de control para la dinámica de guiñada con sistema difuso.

3.3. Resultados Numéricos

A continuación, se muestran las simulaciones numéricas aplicando el sistema de control basado en ISMC y la estrategia de Mamdani para rechazo de perturbaciones. Las simulaciones realizadas fueron llevadas a cabo a través de Matlab Simulink, utilizando un paso de integración de 0.01 segundos con el método numérico de Runge-Kutta y un tiempo de simulación de 130 segundos. Los parámetros utilizados se muestran a continuación: [33]

$$I_x = 75 \times 10^{-4} \text{kgm}^2 \quad (3.77)$$

$$I_y = 75 \times 10^{-4} \text{kgm}^2 \quad (3.78)$$

$$I_z = 13 \times 10^{-3} \text{kgm}^2 \quad (3.79)$$

$$J_r = 6 \times 10^{-5} \text{kgm}^2 \quad (3.80)$$

$$d = 7.5 \times 10^{-7} \text{Nms}^2 \quad (3.81)$$

$$m = 65 \times 10^{-2} \text{kg} \quad (3.82)$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2 \quad (3.83)$$

$$l = 23 \times 10^{-2} \text{ m} \quad (3.84)$$

$$(3.85)$$

El modelo de Dryden es un modelo matemático de ráfagas de viento, este modelo se utiliza debido a que se aproxima más a las ráfagas de viento [39] por lo que se utilizó como perturbación para las dinámicas traslacionales. Por otra parte, para las dinámicas rotacionales, se usaron las perturbaciones tomadas del artículo de Cervantes et al. en [40], las cuales se muestran en la Tabla 3.1.

$\xi_\phi(t)$	$0.3 \cos(t) \sin(3t)$
$\xi_\theta(t)$	$-0.25 \cos(3t) \sin(t)$
$\xi_\psi(t)$	$0.5 \cos(3t) \sin(2t)$

Tabla 3.1: Perturbaciones del sistema.

Planeación de trayectorias: colocar imágenes de la función sigmoide y explicar como se utilizaron para crear las trayectorias

Retomando la tarea de monitoreo planteada en el sección 3.1, cada uno de los círculos indica la posición en la que el vehículo tiene que detenerse para realizar la captura de las imágenes. Debido a lo anterior, se decidió hacer uso de la función sigmoide para lograr crear las trayectorias deseadas.

Con el fin de garantizar que el UAV realice movimientos suaves de un círculo a otro, se utilizaron funciones de tipo sigmoide para los perfiles de posición, que a su vez están asociados a perfiles de velocidad que hacen que el vehículo inicie y termine con una velocidad baja y en el punto intermedio de los círculos alcance su máxima velocidad

Los perfiles de posición hacen que el objetivo de control pase de seguimiento de trayectoria a vuelo estacionario en toda la tarea de monitoreo planteada. Estas trayectorias se muestran en la Figura 3.13.

Objetivo de control: En la Figura 3.12, se muestra la misión a ejecutar junto con su respectiva descripción, puesto que se evaluará el ISMC de acuerdo a su efectividad en el rechazo de perturbaciones considerando que la frecuencia de corte es ajustada por el sistema difuso Mamdani basado en el error de seguimiento, a través de Matlab se crearon las trayectorias deseadas para las posiciones traslacionales y angulares. La tarea de monitoreo, mostrada en la Figura 3.12, la estrella marca el inicio de la trayectoria, en donde el cuadrirrotor realiza el despegue hasta alcanzar la altura deseada que corresponde a la altura de la copa del cultivo (para nuestro caso 3m). Una vez alcanzada la altura, el UAV se desplaza de manera horizontal deteniéndose en cada uno de los círculos para realizar un vuelo estacionario por 5 segundos en cada uno. Después de llegar a la primera esquina, este gira 90 grados en guiñada y se desplaza 5m sobre el eje y , hasta llegar a la segunda esquina. Una vez ahí, se orienta el vehículo a 180 grados y nuevamente se desplaza de manera horizontal hasta llegar al final de la trayectoria (marcado como el punto cuadrado).

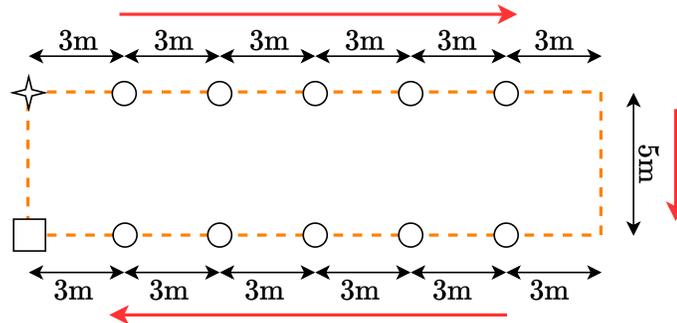


Figura 3.12: Misión del UAV.

3.3.1. Seguimiento del perfil de vuelo con perturbaciones externas

A través de Simulink se realizó un programa para el control de seguimiento del cuadricóptero, en donde el lazo interno y el lazo externo se controlaron con el ISMC, para esta simulación, se utilizó el modelo dinámico de Dryden para simular ráfagas de viento.

Las condiciones iniciales empleadas fueron $x(0) = 2$, $y(0) = -1.2$, $z(0) = 0$, $\phi(0) = 0$, $\theta(0) = 0$, $\psi(0) = 0.3$. En las Figuras 3.13 y 3.14 se pueden visualizar las dinámicas de traslación y orientación, realizando el seguimiento de las trayectorias deseadas. A pesar de que las condiciones iniciales fueron diferentes a cero, las dinámicas hicieron un correcto seguimiento de las trayectorias deseadas. La Figura 3.13 muestra a los vectores de estado x , y , y z seguir a las trayectorias deseadas. En x se observa que el cuadricóptero se desplaza 3 metros y posteriormente se queda en vuelo estacionario a lo largo de todos los puntos. Para y , el UAV se mueve 5 metros y finalmente, z alcanzará la altitud de 3 metros y aterrizará al terminar la simulación.

Asimismo, en la Figura 3.14 se presentan las trayectorias de ϕ , θ , ψ y sus respectivas referencias deseadas. Con respecto a estas dinámicas, únicamente la trayectoria de ψ fue diseñada, ya que las trayectorias deseadas ϕ y θ , dependen del control virtual de x y y . Se puede visualizar que ϕ y θ presentan cierto nivel de ruido, debido a las perturbaciones externas añadidas. No obstante, se puede observar que las trayectorias siguen correctamente a las referencias deseadas, a pesar del ruido constante que se tiene, sin mostrar problemas significativos.

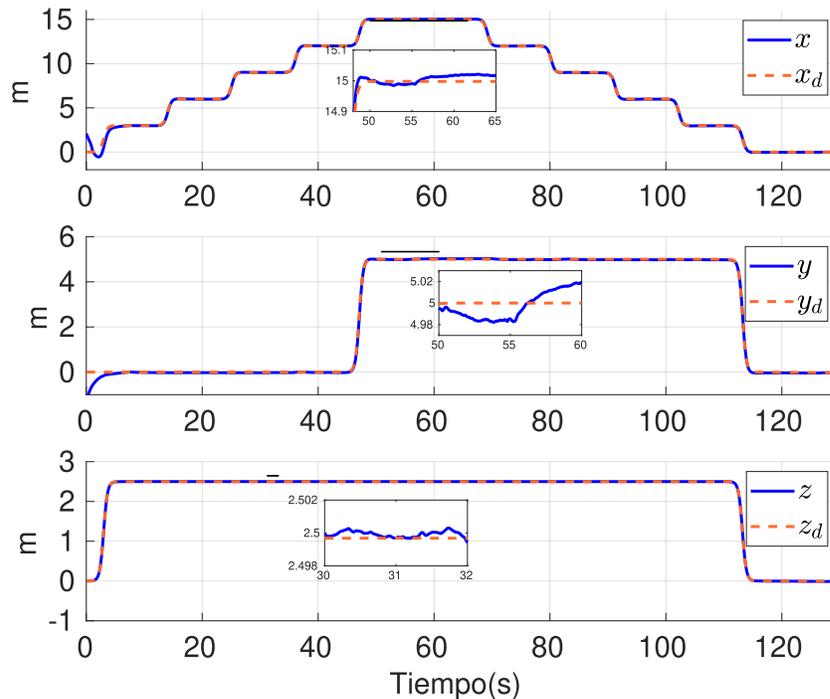


Figura 3.13: Seguimiento de trayectorias en las dinámicas de traslación.

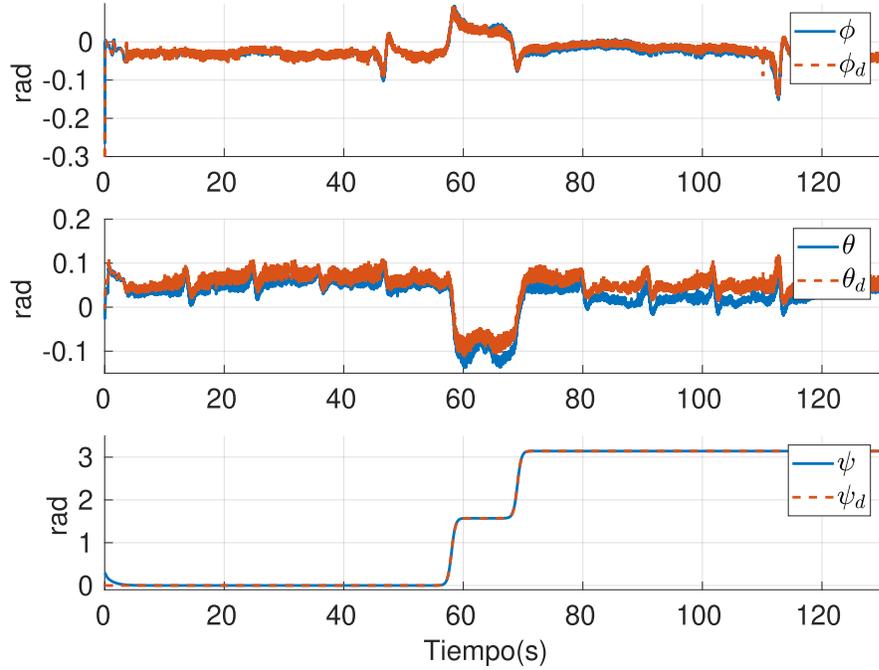


Figura 3.14: Seguimiento de trayectorias en las dinámicas de orientación.

El propósito de los algoritmos de control (3.30)- (3.31) y (3.53)- (3.55) es rechazar las perturbaciones y las dinámicas no modeladas.

Señales de control para traslación

En la Figura 3.15 se muestran las señales de control u_x (3.30), u_y (3.31) y u_1 (3.32). Estas señales de control están conformadas por el control equivalente y el control nominal. Por otro lado, los controladores u_ϕ , u_θ , u_ψ se muestran en la Figura 3.16.

3.3.2. Control equivalente contra perturbación agrupada

En las Figuras 3.17 y 3.18 se muestra la comparación entre el control equivalente de cada dinámica traslacional y rotacional con su respectiva perturbación, demostrando que se cumple la condición de las ecuaciones (3.44) y (3.68), en donde el control equivalente es igual a menos la perturbación del sistema. En la Figura 3.17, $f(\dot{\zeta}, t)$ se grafica con signo positivo, para que esté una sobre otra y pueda visualizarse la estimación de la perturbación del sistema. Al aproximar la perturbación, esto provoca que el desempeño del cuadricóptero no se vea afectado y que sólo el control nominal actúe sobre el sistema. El procedimiento anterior se realizó para la Figura 3.18. El control promedio y las perturbaciones en las dinámicas rotacionales son presentadas en la Figura 3.18.

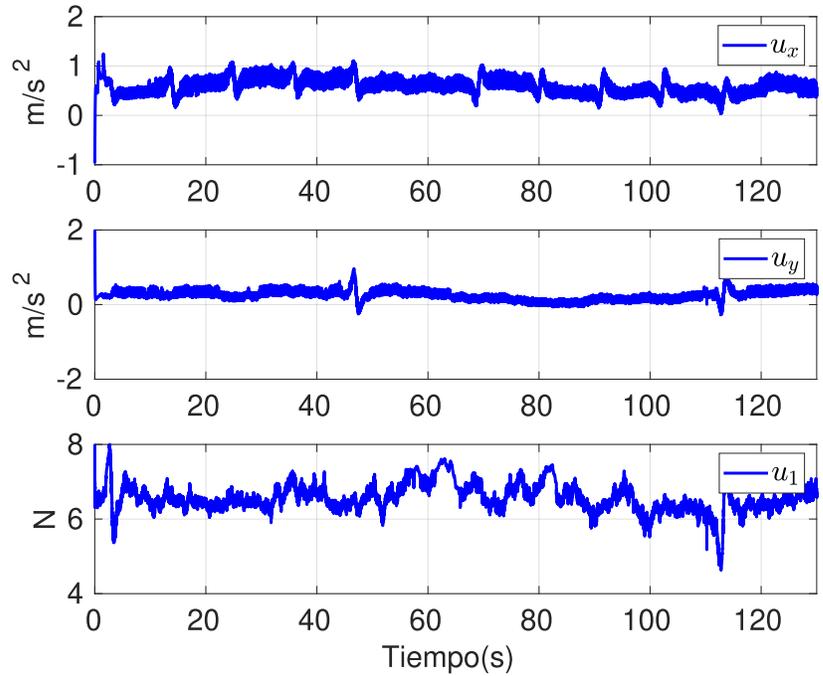


Figura 3.15: Señales de control para las dinámicas traslacionales.

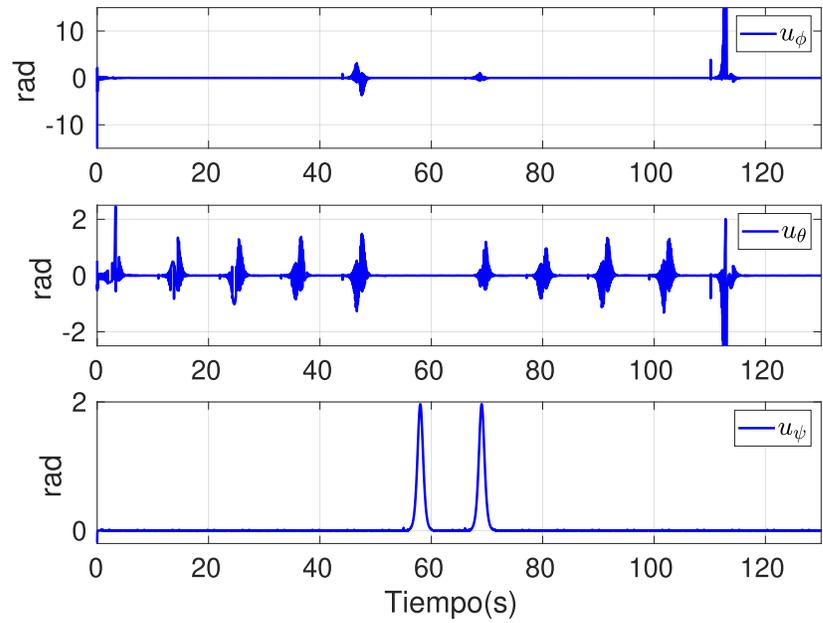


Figura 3.16: Señales de control para las dinámicas rotacionales.

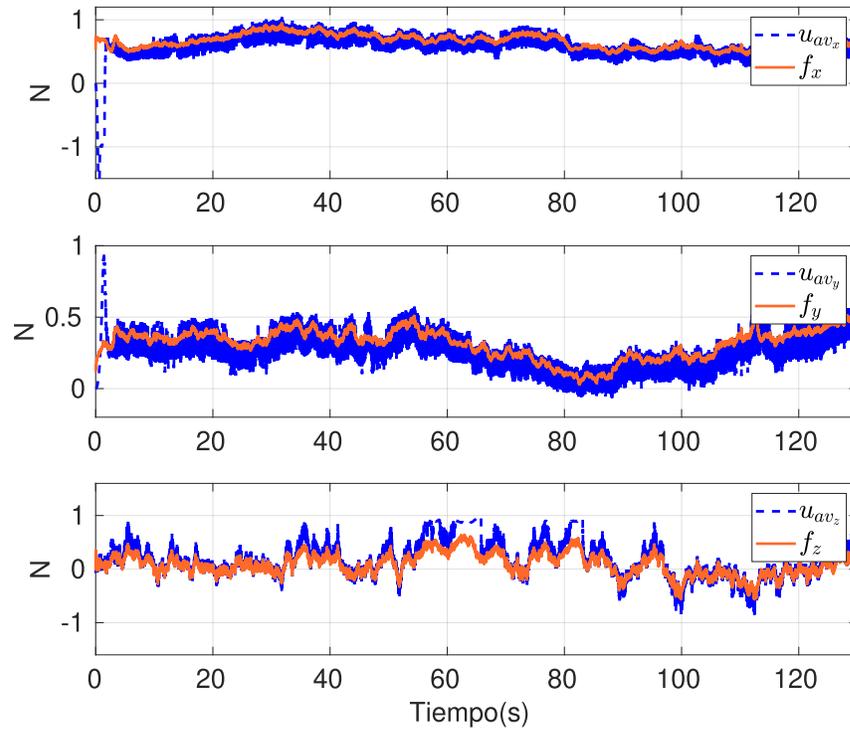


Figura 3.17: Control equivalente contra las perturbaciones agrupadas traslacionales $f_v(\zeta, t)$.

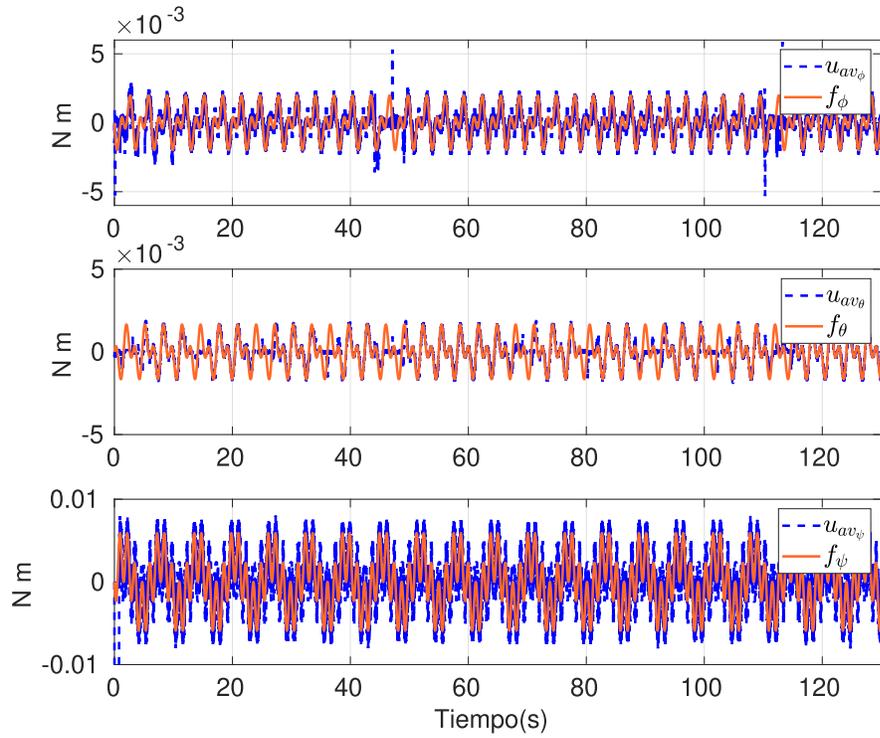


Figura 3.18: Control equivalente contra las perturbaciones agrupadas rotacionales $f_\sigma(\eta, \dot{\eta}, t)$.

Finalmente, en la Figura 3.19 se muestra la variación dinámica de la constante de tiempo para cada dinámica traslacional. En dicha figura puede observarse que permanece en una región alrededor de valores constantes, con una variación mínima dependiendo de la convergencia a cero del error de seguimiento. Las constantes de tiempo para las dinámicas de orientación presentan un comportamiento similar a las traslacionales.

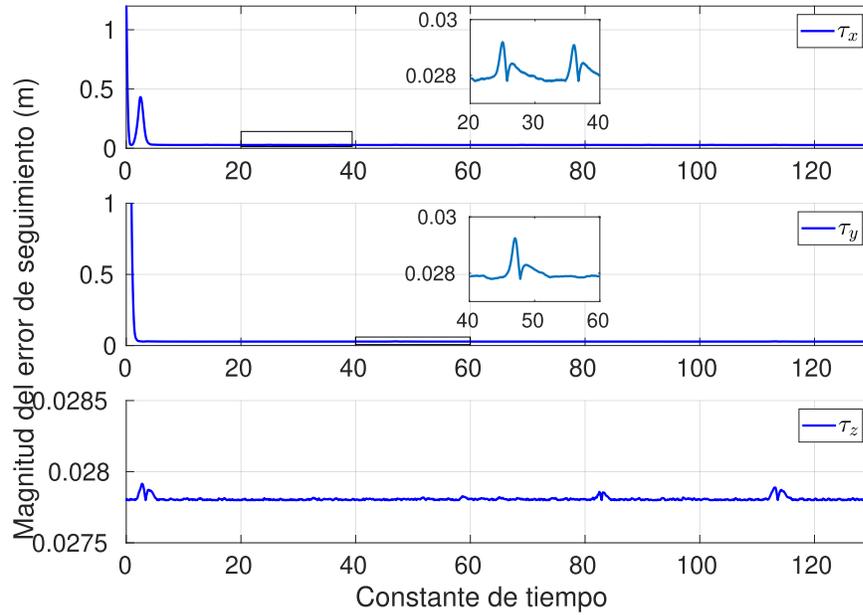


Figura 3.19: Adaptación dinámica de la constante de tiempo τ para la dinámica traslacional.

En este capítulo se mostró el diseño para el control de altitud y de guiñada, además de mostrar su eficacia con las simulaciones realizadas. A continuación, en el siguiente capítulo se explicarán los componentes del cuadrirrotor.

Capítulo 4

Plataforma experimental

Los cuadricópteros son una clase de UAV que despegan y aterrizan de manera vertical, sus alas son rotativas y cuentan con cuatro rotores que están unidos a un cuerpo rígido en forma de cruz. Cada motor se ubica a la misma distancia del centro de masa.

En este capítulo se describen los componentes que conforman la aviónica del cuadricóptero, lo cual corresponde a la electrónica utilizada para el funcionamiento de la aeronave. Dichos elementos engloban a los componentes electro-mecánicos, los motores y sensores empleados, y el autopiloto. La Figura 4.1 muestra el UAV empleado para las pruebas experimentales.



Figura 4.1: Plataforma Experimental.

4.1. Controladores electrónicos de velocidad

El controlador de velocidad electrónico (del inglés *Electronic Speed Controller*, abreviado ESC) sirve como un intermediario entre la batería y el motor eléctrico. Su función es controlar la velocidad a la que gira el motor, esto basado en la señal que recibe del controlador del acelerador y a través de modulación por ancho de pulsos (del inglés *Po-*

ver *Width Modulation*, abreviado PWM) ir variando la velocidad del motor. Cada ESC se conecta a un motor regular y controlar su velocidad. Los ESC utilizados fueron los Turnigy clase PLUSH-40 para controlar motores brushless (sin escobillas) (Figura 4.2). En la tabla 4.1 se muestra su ficha técnica.



Figura 4.2: Turnigy.

Modelo	PLUSH-40A
Peso	35 g
Dimensiones	55 × 28 × 12
BEC Mode	Switch
BEC Output	5V/3A
Rango de voltaje	2-6

Tabla 4.1: Especificaciones Turnigy ESC Plush-40A.

4.2. Motores eléctricos sin escobillas

El motor *Multistar 4220-880* (Figura 4.3, está diseñado para uso de vehículos multirotor, por lo que su diseño permite maximizar el funcionamiento del cuadricóptero. Este motor permite hélices de 10 pulgadas y tiene una potencia de 250 W. En la Tabla 4.2 se muestra la ficha técnica.



Figura 4.3: Multistar 4220-880.

Modelo	Multistar 4220-880
Peso	65g
Potencia Máxima	250W
Diámetro	42mm
Largo	25mm
Baterías	Lipo 3s

Tabla 4.2: Especificaciones Turnigy Multistar 4220-880.

4.3. Autopiloto Pixhawk 6x Mini Set

El autopiloto es un controlador de vuelo que consiste en un software de vuelo ejecutado en un sistema en tiempo real, está diseñado para vehículos no tripulados (UAV), por lo que no se requiere de una persona que opere el vehículo. Al no contar con un piloto, proporciona funciones esenciales como la estabilización y seguridad, así como la capacidad de realizar misiones previamente definidas de manera automatizada. No obstante, se tiene la opción de tener asistencia por parte de un piloto para manejar el UAV de manera manual para realizar tareas como lo son el despegue, el aterrizaje. En la 4.4 se presenta el Pixhawk utilizado para las pruebas experimentales. El Pixhawk 6x Mini Set es la más reciente actualización de la familia Pixhawk.

El autopiloto está conformado por un diseño modular, un procesador H7 y una central inercial (del inglés *Inertial Measurement Unit*, abreviado IMU). La central inercial

lleva un giroscopio, tres acelerómetros y un barómetro



Figura 4.4: Pixhawk 6X Mini.

Alimentación	4.75-5.25V
Acelerómetro/Giróscopo	ICM-20649 or BMI088
Acelerómetro/Giróscopo	ICM-42688-P
Acelerómetro/Giróscopo	ICM-42670-P
Magnetómetro	BMM150
Barómetro	2x BMP388
Dimensiones	43.4 × 72.8 × 14.2 mm
Peso	26.5 g
Compatibilidad radios	Spektrum

Tabla 4.3: Especificaciones Autopiloto Pixhawk.

4.3.1. Plataforma de vuelo PX4

PX4 es una plataforma de vuelo para UAV de código abierto que corre en NuttX RTOS, esta plataforma permite utilizar diferentes tipos de marcos de vehículos y diferentes modos de vuelo, así como el uso de medidas de seguridad e integración de computadoras compañeras.

4.3.2. Estación en tierra QGroundControl

PX4 cuenta con una estación en tierra llamada *QGroundControl*, que permite que los operadores de vuelo puedan monitorear y controlar el vehículo aéreo. A través de la telemetría, el UAV se comunicará con la estación en tierra para así obtener la información en tiempo real de lo que está sucediendo durante el vuelo.

4.3.3. Selección de configuración en PX4

Una vez cargado el firmware al autopiloto, es importante seleccionar el marco a utilizar. Puesto que se está trabajando con un cuadricóptero, se configurará el airframe a *Generic Quadcopter*, esto se puede visualizar en la Figura 4.5

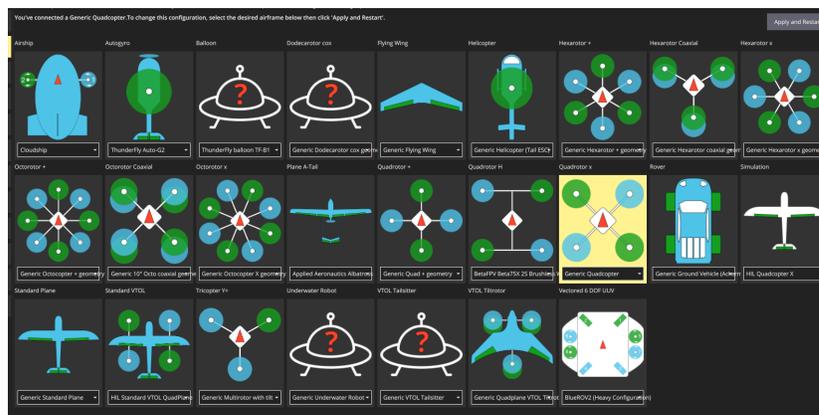


Figura 4.5: Selección de marco del vehículo.

4.3.4. Diagrama de conexión del Pixhawk

Para las pruebas experimentales solamente se utilizarán los siguientes módulos que se muestran en la Figura 4.6.

GPS
Con brújula, LED, timbre y switch de seguridad



Estacion de control en tierra y radio-control

Telemetria, estacion de control con QGroundcontrol



DSM RC
Para receptores Spektrum

Antena de telemetria

Para tener una conexion MAVLink inalambrica entre el Autopiloto y la Estacion de Control en Tierra



Modulo de potencia



BEC (For Servo)



ESC



ESC



ESC



ESC



Motor 1



Motor 2



Motor 3



Motor 4

Tablero de distribucion de energia

Figura 4.6: Periféricos del Pixhawk 6x mini empleados.

4.4. Radio comunicación

4.4.1. Control Spektrum DX7

El radio-control de un UAV es un dispositivo que permite al operador poder controlar el vehículo a través de ondas de radio. Este radiotransmisor de RC (radio-control) manda ondas que radio que son recibidas por un receptor de radio que va colocado sobre el cuadrirrotor.

El radio Spektrum DX7, que se presenta en la Figura 4.7, cuenta con un largo alcance para aeromodelos RC, transmite en la banda 2.4GHz y cuenta con la tecnología DSM2, lo cual garantiza que no tendrá problemas por interferencias de radio tanto internas como externas. Además cuenta con receptor de 7 canales AR7000.



Figura 4.7: Radio-control Spektrum DX7.

4.4.2. Receptor Spektrum AR7000

El receptor de radio se coloca sobre la aeronave y es el que recibirá las señales enviadas desde el radio-control. El AR7000 (Figura 4.8) cuenta con un receptor interno y un externo, esto hace que se tenga una mejor área de enlace. Este sistema funciona transmitiendo dos frecuencias de manera simultánea, por lo que se crean dos enlaces RF (radiofrecuencias), este doble enlace provoca que se tenga un robusto enlace RF.



Figura 4.8: Receptor Spektrum AR7000.

4.5. Alimentación eléctrica

4.5.1. Batería LiPo Turnigy Graphene para el Pixhawk

Las baterías LiPo (Litio y Polímero) son baterías recargables que se componen de varias celdas. Una de las ventajas que ofrecen estas baterías es que son ligeras y tienen una tasa de descarga alta. Para este caso se utilizó una batería LiPo de la marca Turnigy Graphene (ver Figura 4.9), la cual tiene una capacidad de 4000mAh y un voltaje de 11.1V. Por lo anterior, el tiempo de vuelo con esta batería es de aproximadamente 20 minutos.



Figura 4.9: Batería Turnigy Graphene.

Número de celdas	3S
Capacidad	4000mAh
Voltaje	11.1V
Tasa de descarga	45C
Peso	389g

Tabla 4.4: Especificaciones Batería Turnigy Graphene.

4.5.2. Batería LiPo Turnigy 9XR para la RPI

Para la RPI será necesario que se alimente con una batería diferente a la utilizada para el Pixhawk. La batería Turnigy 9XR (Figura 4.10) es ideal debido al tamaño y peso que tiene, ya que no agregará demasiado peso para el UAV. La ficha técnica se muestra en la Tabla 4.5



Figura 4.10: Batería Lipo Turnigy 9XR.

Número de celdas	3S
Capacidad	2200mAh
Voltaje	11.1V
Tasa de descarga	1.5C
Peso	133g

Tabla 4.5: Especificaciones batería Turnigy 9XR.

4.6. Computadora embebida Raspberry Pi 4B

Para la parte de visión, se propone utilizar una computadora embebida para la captura de imágenes, para qué, a través de un código de programación, tome las fotografías automáticamente. La Raspberry Pi (RPI) 4B es una computadora de bajo costo y de tamaño compacto, además de que gracias a su capacidad de memoria y velocidad de procesamiento, resulta ideal tanto para su instalación en el cuadricóptero como para su uso en conjunto con la cámara termográfica. En la Figura 4.11 muestra la RPI y la Tabla 4.6 muestra su ficha técnica.



Figura 4.11: Raspberry Pi 4B.

Alimentación	5V DC
Memoria	8GB
Dimensiones	$88 \times 58 \times 18.5mm$

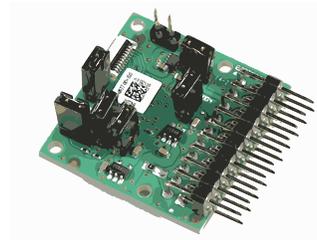
Tabla 4.6: Especificaciones RPI 4B.

4.7. Cámara termográfica Lepton FLIR

Debido a que es necesario obtener imágenes termográficas para calcular el CWSI, se utilizará una cámara termográfica. La Lepton es un módulo de cámara infrarroja de onda larga que destaca por su bajo consumo de energía y su alta calidad de imagen. Su diseño compacto la hace adecuada para la implementación en el UAV. En la Figura 4.12 se presenta la cámara y se aprecia que consta de dos partes, el módulo de la cámara (Figura 4.12a) y un tablero de conexión (Figura 4.12b).



(a) Módulo de la cámara.



(b) Tarjeta de comunicación.

Figura 4.12: Cámara Lepton Flir.

Alimentación	3V-5.5V
Dimensiones	29.5mm × 29mm

Tabla 4.7: Especificaciones de la cámara Lepton Flir.

Capítulo 5

Pruebas de la cámara termográfica

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de manera experimental. Para las pruebas experimentales, la cámara se colocó a un costado del UAV para ir capturando las copas de los arboles, mientras que el UAV avanzaba de acuerdo a los puntos de referencia que fueron cargados previamente. La trayectoria consiste en pasar a lado de dos arboles por el lado derecho y el lado izquierdo.

5.1. Configuración Experimental

Para las pruebas experimentales se utilizaron dos computadoras, como se puede observar en la Figura 5.1, ya que con una computadora se monitorizaba desde la estación en tierra el vuelo del UAV y con la otra se enlazaba a la RPI para ir visualizando las imágenes que se iban capturando, dicho enlace se realizó a través de Computación en Red Virtual (del inglés, *Virtual Network Computing*, abreviado VNC), lo que significa que se enlaza vía remota a través del servidor de *Remina*. Además de las computadoras, también se hizo uso del radiocontrol para armar el cuadricóptero y cambiar el modo de vuelo para la misión.



Figura 5.1: Configuración experimental

5.2. Trayectoria de vuelo para la toma de imágenes

Para la toma de fotografías durante el vuelo, previamente se cargó una misión desde *QGround*, dicha misión consiste en seguir los puntos de referencia, esto se puede visualizar en la Figura 5.2 y permanecer en vuelo estacionario por diez segundos en cada punto, esto para permitirle a la cámara tomar las imágenes de manera nítida. También, es posible ver que la primera referencia está marcada como 3, ya que el *Mission Start* representa el primer punto y *Take off* representa el segundo.

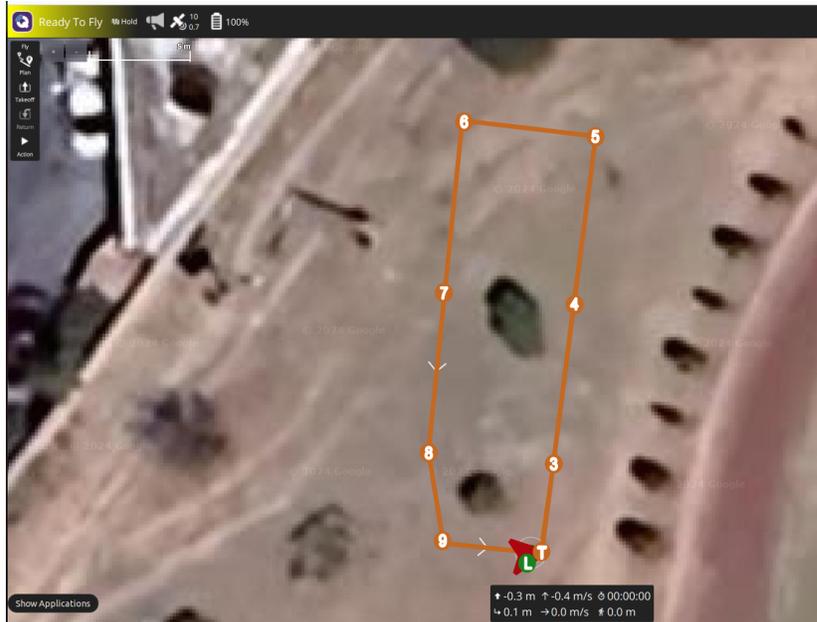


Figura 5.2: Misión cargada

Ahora, en cada punto de referencia se configuraron los parámetros de *Altitude* y de *Hold*, esto se puede comprobar en la Figura 5.3

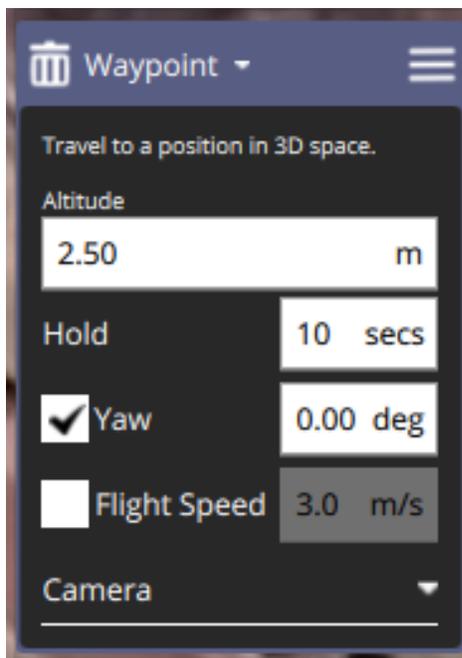


Figura 5.3: Configuración de los parámetros del punto de referencia

Posteriormente, ya cargada la misión en el *Pixhawk*, se inició el código `codigo_arranque.sh` y fue tomando fotografías cada que estuviera en un punto, esto se logró colocando un contador dentro del código. La Figura 5.4 muestra la plataforma experimental realizan-

do la trayectoria en campo abierto, por lo que se pudieron conocer los resultados de las imágenes obtenidas con la cámara durante el vuelo.



Figura 5.4: UAV durante la misión de captura de imágenes autónoma.

5.3. Procesamiento de las imágenes termográficas aéreas

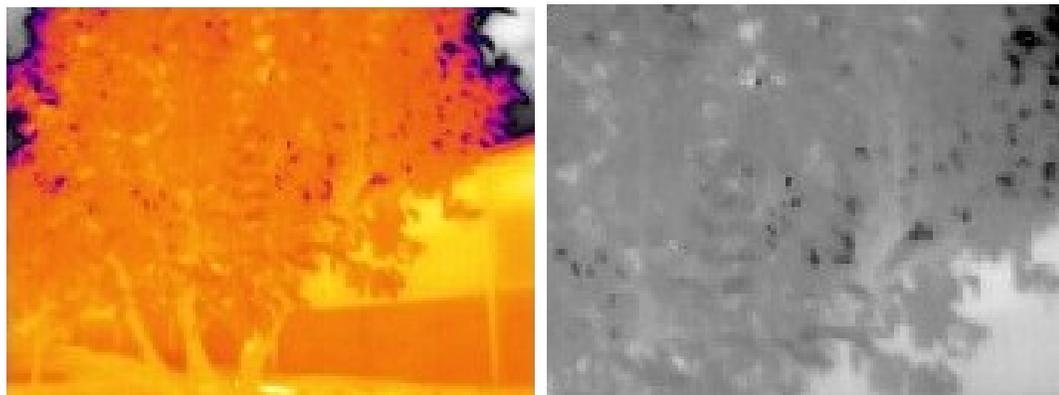
A continuación, se muestran las imágenes capturadas en cada indicador. De acuerdo a la Figura 5.2, primero se mostrarán las fotos tomadas en los puntos 3 y 8, lo que representa el primer árbol, seguido de esto, se mostrarán las imágenes desde la perspectiva de los puntos 4 y 7, mostrando el segundo árbol. La cámara capturará la temperatura más alta y más baja, es por esto que en las imágenes termográficas se cuenta con diferentes colores, debido a que el color amarillo captura la temperatura más alta detectada y en morado la temperatura más baja, mientras que los tonos naranjas indican una temperatura media.

5.3.1. Monitoreo del Árbol 1

Vista anterior

En la Figura 5.5a se observa la temperatura de la vista anterior de la copa del primer árbol, el punto 3 en la misión de PX4. En dicha figura se muestran que las temperaturas más altas se concentran en el medio de la copa del árbol, mientras que en las orillas se muestra una temperatura menor. A través de Matlab se pasa a escala de grises, como se muestra en la Figura 5.5b, para el procesamiento de las temperaturas y realizar el

cálculo del CWSI. Al pasar las imágenes a escala de grises, se logra apreciar de manera clara las diferentes temperaturas.



(a) Imagen termográfica original.

(b) Imagen a escala de grises

Figura 5.5: Árbol 1 desde la vista anterior

Finalmente, se calcula el CWSI y se mapea la imagen con referencia a dicho nivel, como se muestra en la Figura 5.6, donde se visualiza que las zonas de la copa más estresadas son el centro de la copa y algunas ramas, teniendo un nivel de estrés medio.

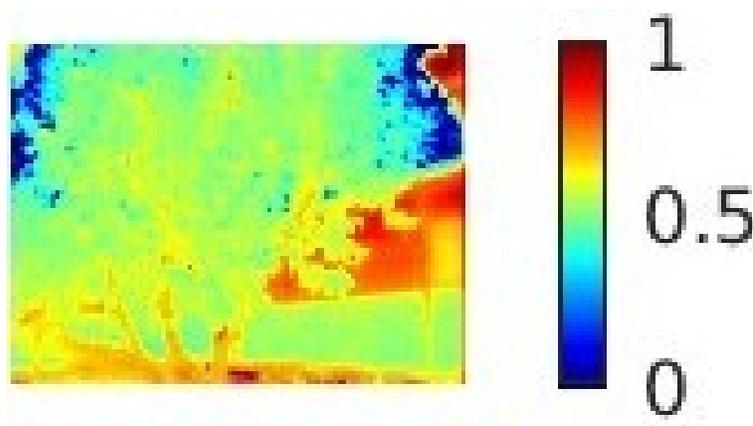
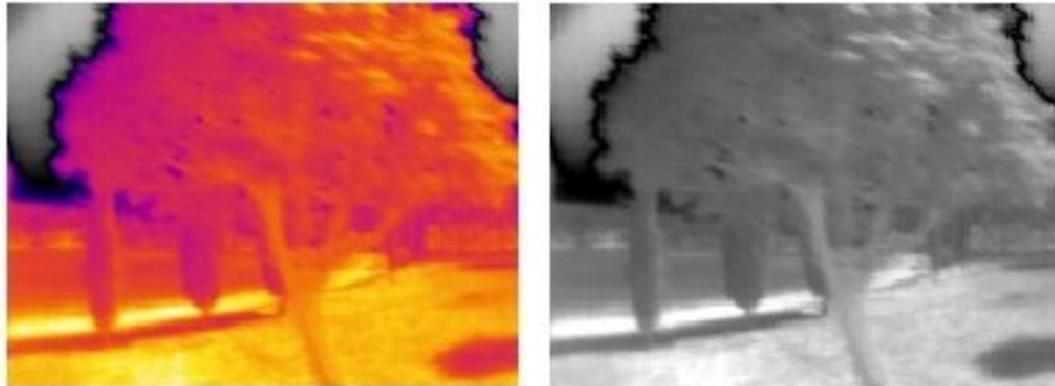


Figura 5.6: Mapa del CWSI del árbol 1 vista anterior.

Vista posterior

En la Figura 5.7 se muestra la parte posterior de la copa del árbol 1. El método es el mismo, por lo que se puede visualizar mayor temperatura en el lado derecho de la Figura 5.7a, mientras que del lado izquierdo se capturó una temperatura más baja. Pasando con la Figura 5.7b, se aprecian más las tonalidades de grises, comprobando lo observado con la Figura 5.7a.



(a) Imagen termográfica original.

(b) Imagen a escala de grises.

Figura 5.7: Árbol 1 desde vista posterior

Se calcula el CWSI y se aprecia en la Figura 5.8 el mapeo realizado, en donde puede distinguirse que el lado derecho de la copa presenta mayor estrés, pero sin llegar al máximo nivel de estrés.

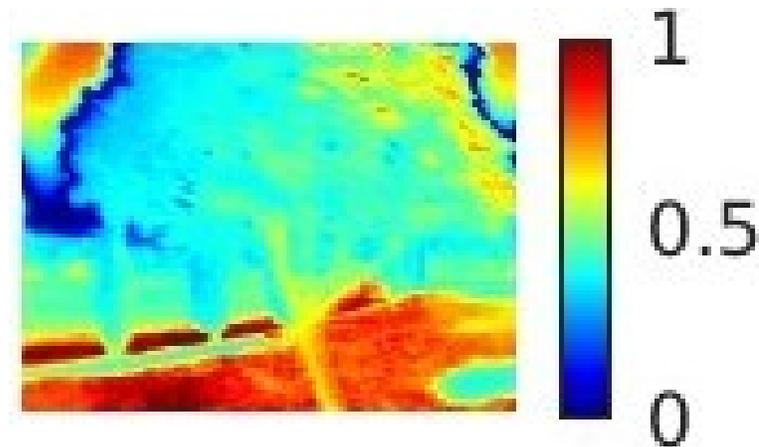
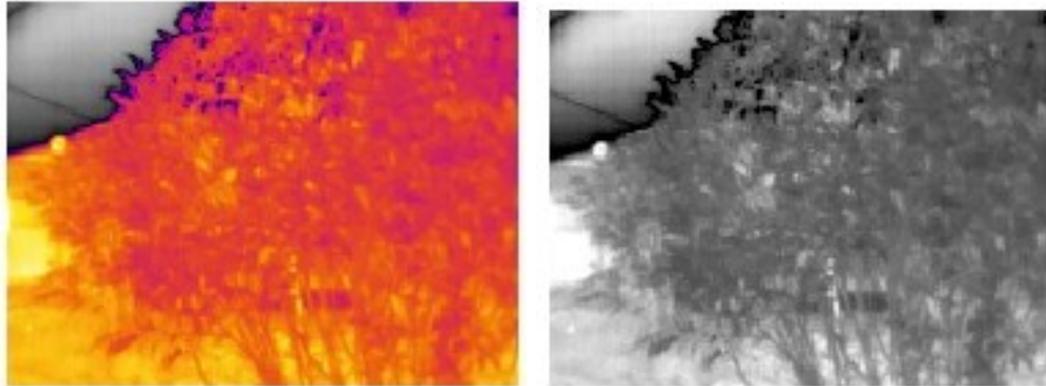


Figura 5.8: Mapa del CWSI del árbol 1 vista posterior.

5.3.2. Monitoreo del Árbol 2

Vista anterior

La fotografía mostrada en la Figura 5.9 representa la copa del segundo árbol, en la Figura 5.9a se muestra que las temperaturas más altas provienen del borde y de algunas ramas en el centro. La Figura 5.9b muestra la misma imagen en escala de grises, lo que permite notar mejor la diferencia de temperaturas.



(a) Imagen termográfica original.

(b) Imagen a escala de grises.

Figura 5.9: Árbol 2 desde vista anterior

Realizando el cálculo y el mapeo, la Figura 5.10 muestra todo el CWSI de la imagen, las zonas con mayor estrés hídrico son los bordes de la copa y algunas ramas ubicadas al centro, mientras que las parte superior no representa un nivel de estrés hídrico alto. También se puede apreciar el pasto cuenta con el nivel de estrés más alto de CWSI, teniendo un valor de 1.

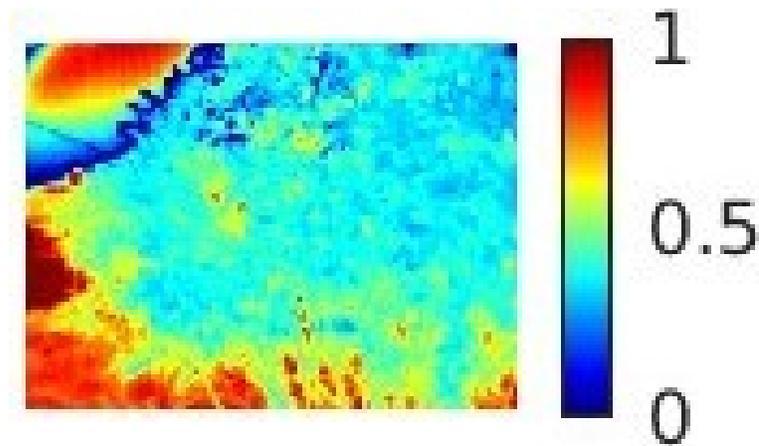
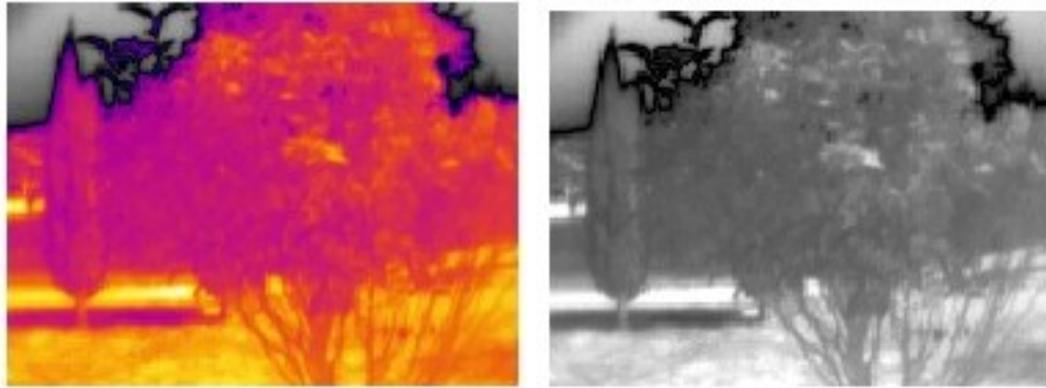


Figura 5.10: Mapa del CWSI del árbol 2 vista anterior.

Vista Posterior

La Figura 5.11 muestra nuevamente el segundo árbol visto desde otra perspectiva, en la Figura 5.11a se analiza que las temperaturas más altas están en la parte central de la copa, mientras que en los bordes se registró una temperatura menor. Para la Figura 5.11b nuevamente se visualizan los colores más claros en el centro y los más oscuros en los bordes.



(a) Imagen termográfica Original.

(b) Imagen a escala de grises

Figura 5.11: Árbol 2 desde vista posterior.

A diferencia de las imágenes anteriores, en la Figura 5.12, se aprecia que el CWSI no solo está presente en el centro de la copa, si no que también en algunos bordes y ramas del árbol. Al igual que en la vista anterior, se observa que el pasto tiene el CWSI más alto.

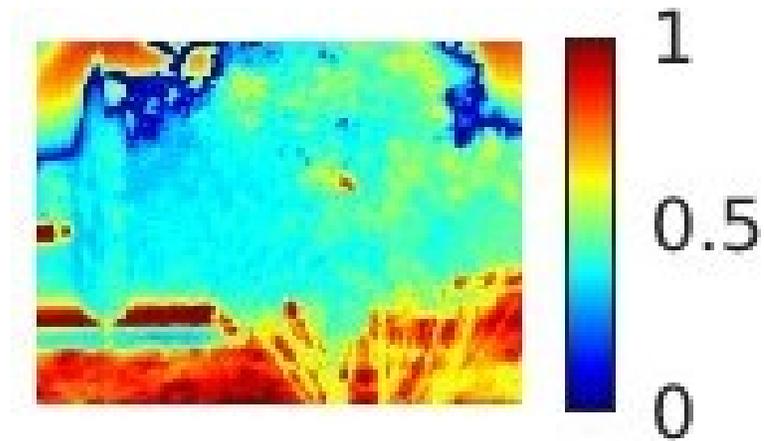


Figura 5.12: Mapa del CWSI del árbol 2 vista posterior.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

6.1. Conclusiones

- Se logró diseñar un control por modos deslizantes integrales capaz de rechazar las perturbaciones externas y dinámicas no modeladas, para esto, el desempeño del control se evaluó mediante simulaciones, en donde se realizó un seguimiento de trayectoria utilizando como perturbaciones externas el modelo del viento de Dryden para simular las ráfagas de viento y demostrar que el control diseñado permite que el vuelo del cuadricóptero no se vea afectado por dichas perturbaciones.
- Se observó una manera de volver adaptable al filtro pasa-bajas, lo anterior se llevó a cabo con un sistema de inferencia difusa para que ajusta el valor de τ dependiendo de la magnitud del error, obteniendo así una señal del control equivalente que se adapta de manera automática y una estimación más precisa de las perturbaciones que afectan al sistema.
- Se logró llevar a cabo un algoritmo de procesamiento de imágenes que, por medio de imágenes termográficas capturadas con una cámara Lepton FLIR y una Raspberry Pi 4B, procesa e identifica el nivel de estrés hídrico en las copas de los árboles, facilitando el conocer las zonas que requieren de mayor prioridad en el riego. Además, este algoritmo es adaptable a diferentes cultivos frutícolas, ofreciendo un mayor monitoreo debido al considerar diferentes vistas del cultivo y ofreciendo un mejor riego a las áreas detectadas como zonas críticas.
- Se consiguió integrar exitosamente la cámara Lepton FLIR junto el UAV, permitiendo capturar imágenes nítidas durante el vuelo estacionario del cuadricóptero. Las imágenes fueron capturadas en los puntos de referencia previamente cargados, asegurando que el código para la cámara sí tomó las fotografías de acuerdo a los puntos de referencia establecidas y con la calidad adecuada para su procesamiento en el cálculo del CWSI.

6.1.1. Limitaciones del Estudio

- Algunas condiciones afectaban la captura de imágenes debido a que el UAV no podía alejarse demasiado de los árboles u obtendría fotografías con una baja precisión. Además, si la cámara enfocaba edificios, ventanas o el cielo, capturaba de manera errónea la temperatura de las copas de los árboles.
- En ocasiones, durante el vuelo, la cámara se descalibraba, por lo que las fotografías no se tomaban adecuadamente y era necesario repetir el vuelo.
- En el diseño de control, se analizó que al contar con una perturbación demasiado pequeña, el filtro no realizaba una correcta reconstrucción de la perturbación y por consecuencia, afectaba el seguimiento de la trayectoria.
- Debido a que un cuadricóptero cuenta con un mayor consumo energético, no era posible realizar demasiados experimentos, ya que se bajaba la batería.

6.2. Trabajo Futuro

- Considerando la ley de control diseñada, implementarla por medio de un simulador de vuelo de manera que siga la trayectoria trazada, como se realizó para las pruebas numéricas.
- La ley de control también se implementara en un cuadricóptero para realizar pruebas en el exterior, para observar la robustez de la ley de control.
- Desarrollar la comunicación Mavlink entre la RPI y el Pixhawk, para lograr que el Pixhawk mande una bandera a la RPI, cuando se encuentre en un punto de referencia y asegurar que la Raspberry leerá correctamente la bandera que le indicará cuando tomar una fotografías.
- Mejorar el sistema difuso propuesto agregando dentro del universo de discurso de entrada, más variables, además de aplicar el FIS en pruebas experimentales en donde se compare la exactitud al tener más variables en dicho universo de entrada.

Apéndice A

Desarrollo de la ley de control para dinámica de x

De acuerdo a las entradas de control diseñadas a través de la estrategia ISMC basada en el control equivalente para controlar las dinámicas traslacionales del cuadrirrotor en los ejes x , y y z :

$$u_x = [m/u_1][(\dot{x}_2^d + K_x^\top \bar{e}_x) + u_{x,1eq}] \quad (\text{A.1})$$

$$u_y = [m/u_1][(\dot{y}_2^d + K_y^\top \bar{e}_y) + u_{y,1eq}] \quad (\text{A.2})$$

$$u_z = \dot{z}_2^d + K_z^\top \bar{e}_z + g + u_{z,1eq} \quad (\text{A.3})$$

Se desarrollará la ley de control (A.1) para la dinámica de x . Retomando el sistema (3.15):

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (\text{A.4a})$$

$$\dot{x}_2 = f_x(\zeta, t) + u_x \quad (\text{A.4b})$$

Se define el vector del error de seguimiento como:

$$\bar{e}_x = [e_{x_1}, e_{x_2}]^\top \quad (\text{A.5})$$

donde

$$e_{x_1} = x_1^d - x_1 \quad (\text{A.6a})$$

$$e_{x_2} = x_2^d - x_2 \quad (\text{A.6b})$$

es importante recordar que x_1^d , x_2^d son la posición y la velocidad deseada respectivamente. En consecuencia, la dinámica del error en espacio de estado resulta:

$$\dot{e}_{x_1} = e_{x_2} \quad (\text{A.7a})$$

$$\dot{e}_{x_2} = \dot{x}_1^d - f_x(\dot{\zeta}, t) - u_x \quad (\text{A.7b})$$

Con el fin de estabilizar la dinámicas del error, se diseña la ley de control nominal considerando que no existe la influencia de la perturbación agrupada, es decir $f_x = 0$. Obteniendo así, la siguiente forma

$$u_{x,0} = x_2^d + K_x^\top \bar{e}_x \quad (\text{A.8})$$

en donde $K_x = [c_{x_1}, c_{x_2}]^\top$ con c_{x_1} , c_{x_2} como constantes positivas. Basándose en el esquema de rechazo de perturbaciones del ISMC, la entrada de control u_x está formada por la siguiente estructura

$$u_x = m/u_1[u_{x,0} + u_{x,1}] \quad (\text{A.9})$$

donde el primer componente ($u_{x,0}$) representa el control nominal calculado en (A.8), mientras que el segundo componente ($u_{x,1}$) se encarga de rechazar las perturbaciones agrupadas $f_x(\dot{\zeta}, t)$. Por lo tanto, el lazo cerrado queda como

$$\dot{e}_{x_1} = e_{x_2} \quad (\text{A.10a})$$

$$\dot{e}_{x_2} = \dot{x}_2^d - f_x(\dot{\zeta}, t) - u_{x,0} - u_{x,1} \quad (\text{A.10b})$$

La variable de deslizamiento integral queda definida como

$$s = s_0(\bar{e}_x) + r \quad (\text{A.11})$$

La derivada temporal de (3.40) queda como

$$\dot{s} = me_{x_2} + \dot{x}_2^d - f_x(\dot{\zeta}, t) - u_{x,0} - u_{x,1} + \dot{r} \quad (\text{A.12})$$

La derivada temporal de la variable auxiliar r se diseña para compensar los elementos conocidos de la dinámica de s

$$\dot{r} = -me_{x_2} - \dot{x}_2^d + u_{x,0} \quad (\text{A.13})$$

La condición inicial para la variable auxiliar es $r(0) = -s_0(\bar{e}_x(0))$, la cual garantiza que la variable de deslizamiento inicie en la superficie $s = 0$. Sustituyendo (3.42) en (3.41), se obtiene

$$\dot{s} = -f_x(\zeta, t) - u_{x,1} \quad (\text{A.14})$$

Debido a que el modo deslizante se encuentra en todo momento presente, es decir $s(t) = \dot{s}(t) = 0$ para toda $t \geq 0$, de (3.43), se puede obtener el control equivalente como

$$u_{x,1eq} = -f(\dot{\zeta}, t) \quad (\text{A.15})$$

Y el movimiento deslizante queda como

$$\dot{e}_{x_1} = e_{x_2} \quad (\text{A.16a})$$

$$\dot{e}_{x_2} = \dot{x}_2^d - u_{x,0} \quad (\text{A.16b})$$

Se propone una entrada de control u_1 que mantenga el modo deslizante a lo largo de la superficie $s = 0$. Esto se puede lograr a través de la siguiente ley de control discontinua

$$u_{x,1} = M_x \text{sgn}(s) \quad (\text{A.17})$$

donde M_x representa una ganancia positiva y

$$\text{sgn}(s) := \begin{cases} 1 & \text{si } s > 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \\ \in [-1; 1] & \text{si } s = 0 \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

La ganancia de control M_x se elige para garantizar que el modo deslizante cumpla con la condición de $s = 0$. Para esto se utilizará la siguiente función candidata de Lyapunov $V = s^2/2$. Calculando la derivada de V a lo largo de la trayectoria (3.43) y considerando (3.43) y (3.46) y la Suposición 1, se tiene:

$$\dot{V} = -s f_x(\dot{\zeta}, t) - M_x s \text{sgn}(s) \leq \bar{M}_x |s| \quad (\text{A.19})$$

en donde $\bar{M}_x = f_x^+ - M_x$. Para comprobar que \dot{V} es definida negativa, la condición $M_x > f_x^+$ debe de satisfacerse, haciendo que el modo deslizante se mantenga en $s = 0$ desde el primer instante. Debido a que la condición de deslizamiento siempre se cumple, entonces (3.30) puede reescribirse en términos del control equivalente como:

$$u_x = [m/u_1][u_{x,0} + u_{x,1eq}] \quad (\text{A.20})$$

Obteniéndose la expresión del controlador de la ecuación (3.30).

De acuerdo con [34], aplicando un filtro pasa-bajas (FPB) al control discontinuo $u_{x,1}$ es posible obtener el control equivalente en (A.15), en donde se tiene componentes de baja frecuencia en el control discontinuo $u_{x,1}$. La estructura del filtro está dada por [35], [36]:

$$\tau \dot{u}_{x,1av} + u_{x,1av} = u_{x,1} \quad (\text{A.21})$$

donde $u_{x,1av}$ es el promedio de la señal de control discontinua ($u_{x,1av} \approx u_{x,1eq}$) y $\tau > 0$

es la constante de tiempo del filtro.

Para obtener una correcta aproximación del control equivalente a través de FPB, la constante del tiempo debe de ser lo suficientemente grande para eliminar los elementos de alta frecuencia pero lo suficientemente pequeña para preservar los componentes de baja frecuencia. De acuerdo con [37], debido a que la función discontinua (A.17) es filtrada en la línea de control directo, se requiere colocar el control discontinuo $u_{x,1}$ en el sistema dinámico interno (A.13) en lugar de alimentarlo a la entrada de la planta. Por lo tanto, esta modificación queda de la siguiente manera:

$$\dot{s} = me_{x_1} + \dot{x}_2^d - f_x(\zeta, t) - u_x + \dot{r} \quad (\text{A.22})$$

$$\dot{r} = -me_{x_1} - \dot{x}_2^d + u_x - u_{x,1} \quad (\text{A.23})$$

en donde la entrada de control u_x en la ruta de control directa está definida en (A.20).

Apéndice B

Desarrollo del sistema de monitoreo basado en visión termográfica

B.1. Comunicación de RPI a Lepton FLIR

La cámara FLIR se comunica por medio de una interfaz SPI (del inglés *Serial Peripheral Interface*) con una computadora compañera Raspberry PI (RPI) 4B. La comunicación se establece a través de un bus de cuatro señales, las cuales son:

- SCLK: Es una señal de reloj enviada del bus maestro al esclavo.
- SS: Es una señal de selección de esclavo para cada esclavo, se selecciona al esclavo con el que el maestro se comunicará
- MOSI: Es una línea de datos del maestro a los esclavos.
- MISO: Es una línea de datos de los esclavos al maestro.

El SPI es un protocolo de comunicación maestro-esclavo, siendo el maestro la Raspberry y el esclavo la cámara FLIR.

En este caso, la computadora embebida indicará a la cámara en que momento deberá capturar una imagen. En la Figura B.1, se muestra el diagrama de conexión usando el protocolo SPI entre la RPI y la tarjeta FLIR Lepton v2.0.

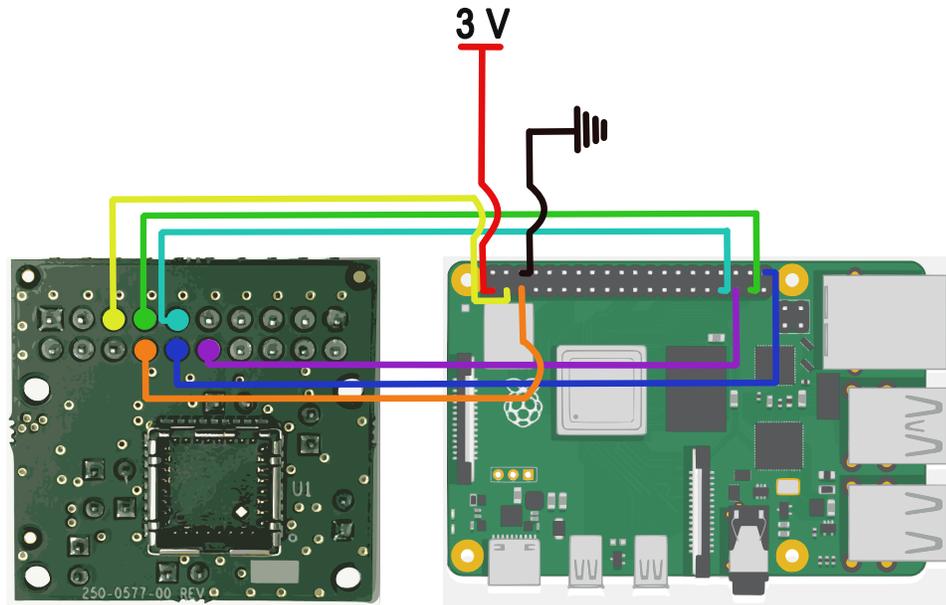


Figura B.1: Diagrama de conexión de tarjeta Raspberry con módulo de cámara FLIR

En la Figura B.2, se muestran los pines de la Raspberry utilizados, los cuales fueron 5, 6, 33, 36, 37 y 40. En la tabla B.1 se muestra la función de cada uno de estos pines.

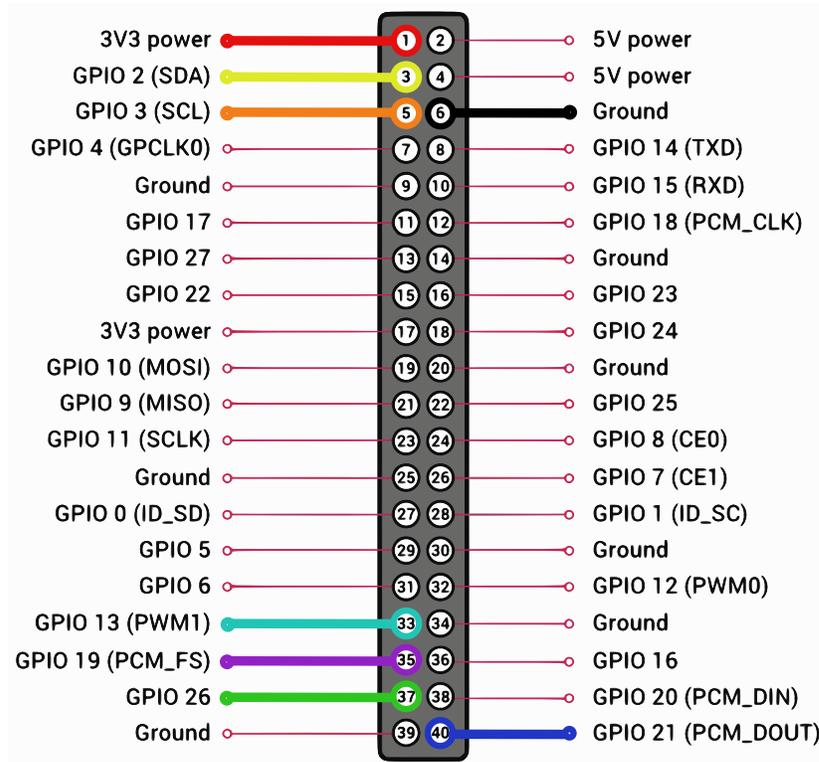


Figura B.2: Pines enumerados de la RPI.

No. Pin	Función
Pin 1	3.3V
Pin 3	GPIO 2 (SDA)
Pin 5	GPIO 3 (SCL)
Pin 6	Ground
Pin 33	GPIO 16 (PWM1)
Pin 35	GPIO 19 (PCM FS)
Pin 37	GPIO 26
Pin 40	GPIO 21 (PCM DOUT)

Tabla B.1: Pines del tablero de conexión de la RPI.

En la Figura B.3, se muestran los pines de la tarjeta FLIR utilizados, los cuales fueron 1, 2, 5, 7, 8, 9, 10 y 12. En la Tabla B.2 se muestra la función de cada uno de estos pines.

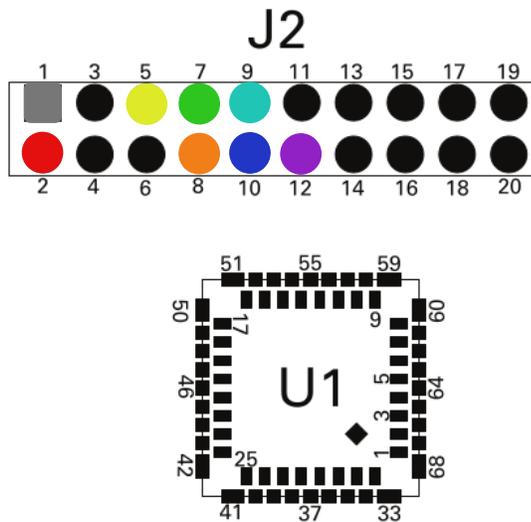


Figura B.3: Pines enumerados del tablero de conexión de la cámara FLIR.

No. Pin	Función
Pin 1	Tierra
Pin 2	3-5.5V
Pin 5	SDA
Pin 7	SPI CLK
Pin 8	SCL
Pin 9	SPI MOSI
Pin 10	SPI CS
Pin 12	SPI MISO

Tabla B.2: Pines del tablero de conexión de la cámara FLIR.

B.2. Configuración de la RPI para operar la Lepton FLIR

- Descarga de librería para la cámara Lepton FLIR** Para que la Raspberry PI (RPI) pueda comunicarse, es importante habilitar ciertos comandos, así como descargar algunas librerías para la cámara Lepton Flir. Dicha librería se descargará de

```
git clone https://github.com/groupgets/LeptonModule.git
```

- Habilitar SPI e I2C:** Se procede a entrar a *Preferences/Raspberry Pi Configuration*, para habilitar las interfaces a utilizar. Una vez dentro de la configuración, se habilitarán las opciones de *SPI* e *I2C*, como se muestra en la Figura B.4.

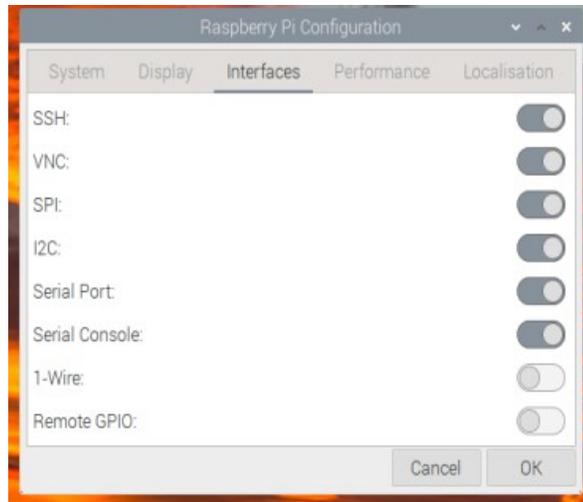


Figura B.4: Habilitación de interfaces

- **Instalación de herramientas requeridas:** Con el fin de actualizar la librerías *qt4-dev-tools* se escriben los siguientes comandos

```
sudo apt update
sudo apt install qtbase5-dev
```

- **Instalación de dependencias:** Se instalaron las dependencias SDK, que es en donde se compila el código, para esto se deberá de pegar la siguiente dirección

```
CD LeptonModule/software/raspberrypi_video
```

seguido a lo anterior se accede a la dirección de la carpeta, se corre el comando para crear las dependencias

```
qmake && make
```

por ultimo se limpia la configuración precargada de los códigos base de la cámara, ejecutando el siguiente comando

```
make sdkclean && make distclean
```

- **Carga del software:** Se carga el software para Lepton 3.X, para esto es importante permanecer en la dirección *LeptonModule/software/raspberrypi_video* y se procede a ejecutar los siguientes comandos

```
sudo sh -c "echo performance>
/sys/devices/system/cpu/cpufreq/policy0/scaling_governor"5
```

finalmente se compila el programa con

```
./raspberrypi_video -tl 3
```

Los comandos mencionados previamente tienen como función correr la cámara inicialmente, debido a que después se realizaron algunas configuraciones, además de que se agregaron códigos.

Almacenamiento de imágenes

Con el objetivo de que las fotografías capturadas queden guardadas, deberán descargarse y modificar los siguientes archivos:

- main.cpp
- leptonthread.cpp
- leptonthread.h

Puesto que son necesarios para la operación de la Lepton FLIR, no obstante, para ejecutar el código, será necesario ejecutar el comando `make sdkclean && make distclean` para eliminar la configuración predeterminada de los archivos anteriores, y así, posteriormente cargar un nuevo código dentro de estos archivos.

Ahora que ya se limpiaron los archivos, se modifican los códigos de la siguiente manera.

- main.cpp: Las modificaciones se realizaron para cambiar el tamaño con respecto a los píxeles para el eje X y Y . Una vez realizado esto se configurará el tamaño de la ventana infrarroja con el fin de aumentar o disminuir la calidad de la misma. Este código es el principal para la configuración de la cámara y de su interfaz.
- leptonthread.cpp: Dentro de este programa se encuentran los parámetros de operación, además de la programación asociada. Una de las cosas que se pueden programar es el almacenamiento de las fotografías.
- lepton.h: Dentro de este archivo se unen varios archivos para poder llevar a cabo el funcionamiento de la cámara. Además de que ser declaradas las variables globales, públicas y privadas.

B.3. Compilación y captura de imágenes termográficas

Para operar la Lepton FLIR, es importante conocer tres códigos que se anexan a la operación de la cámara, los cuales son:

1. `update_and_install.sh`

Es el código principal que deberá ejecutarse. Su función es instalar las librerías requeridas automáticamente, además de que el código se actualizará de manera automática.

2. `update_code.sh`

Código que solamente se ejecutará en caso de que los archivos *main.cpp*, *leptonthread.cpp* y *leptonthread.h*

3. `codigo_arranque.sh`

El último código será el que estará utilizándose para poder operar la cámara, por lo que cada vez que se requiera usar la cámara, será necesario correr este código. Como función adicional, cada que se compila esta línea, se limpiará cualquier programación anterior y procederá a ejecutar la cámara. Por último, se modificará el código para colocar un contador, con el fin de que se tomen las fotos de manera instantánea cada que el UAV pase por cada referencia.

Una vez inicializado el programa de la cámara, se tomarán las fotografías y se irán almacenando en una carpeta destinada. La aplicación que se le dará a la Lepton FLIR es para conocer la temperatura de la copa del árbol, como ejemplo, en la Figura B.5, se muestra la imagen capturada, donde el color amarillo, representa la temperatura más alta que registro la cámara y morado, representa la temperatura más baja.

Imagen Original

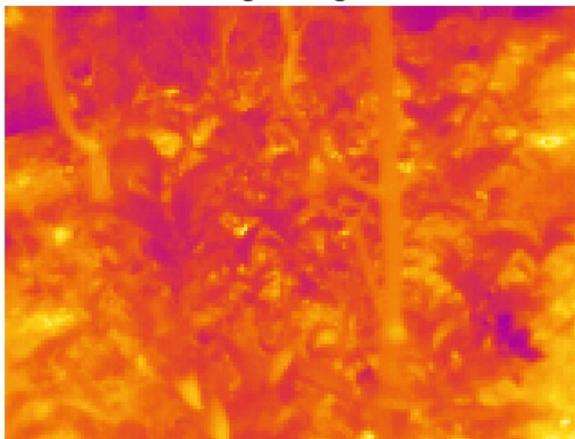


Figura B.5: Fotografía Original

El CWSI del árbol podrá conocerse una vez que se procese la imagen a través de Matlab. En dicho software, se procesarán las imágenes con el objetivo de obtener la temperatura de las plantas y conocer el nivel de estrés hídrico con el que cuentan, es por esto, que las imágenes se pasarán a escala de grises y así obtener la temperatura en cada píxel y se realizará el cálculo para el CWSI.

B.4. Procesamiento de imágenes y cálculo del índice estrés hídrico

El procesamiento se lleva a cabo fuera de línea, a través el software de Matlab. Para llevar a cabo el procesamiento, las imágenes deberán de estar previamente guardadas en una carpeta, tal y como se puede visualizar en la Figura B.6. Las imágenes que se encuentren dentro de esta carpeta deberán de estar en formato “png” o “jpg” para llevar a cabo su correcto procesamiento.

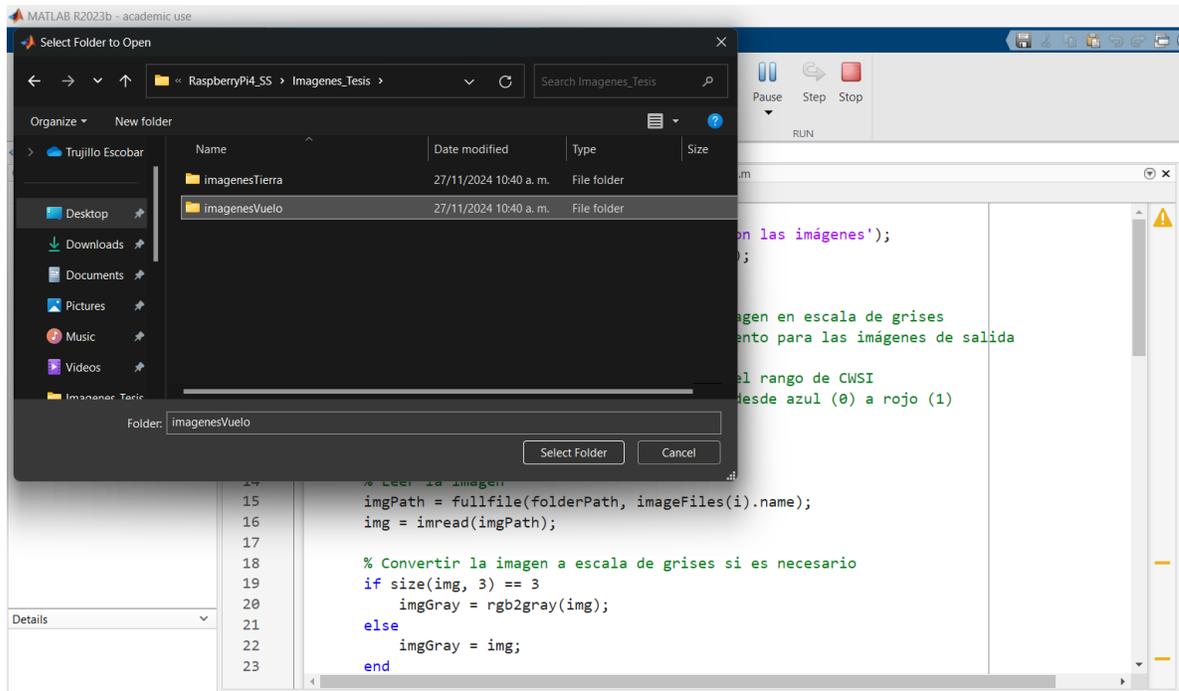


Figura B.6: Selección de la carpeta a procesar

Una vez seleccionada la carpeta, el código realiza el procesamiento de manera automática, obteniendo primero una imagen a escala de grises como se visualiza en la Figura B.7. Esto se realiza con el propósito de poder conocer la temperatura de cada pixel y así calcular pixel por pixel el CWSI, esto será a través de la ecuación 2.2, previamente mencionada en el capítulo 2.

Escala de Grises

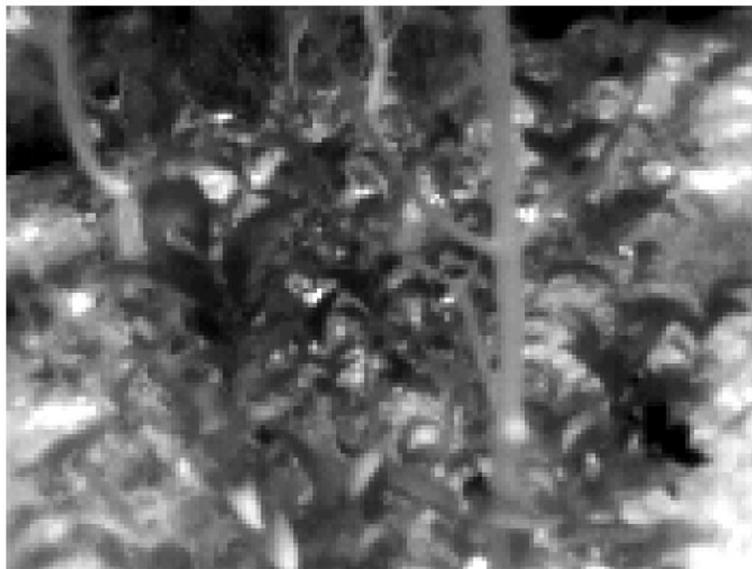


Figura B.7: Fotografía a escala de grises

Después de obtener esos valores, se mapeará la Figura B.7 con respecto a los niveles de estrés hídrico, los cuales son de 0-1, con lo que finalmente se obtiene la Figura B.8 en donde se pueden observar las partes del árbol que presentan mayor CWSI. En esta Figura se observa que en los bordes de la planta existe un alto nivel de estrés hídrico, lo que significa que la planta necesita ser regada para disminuir su nivel de estrés.

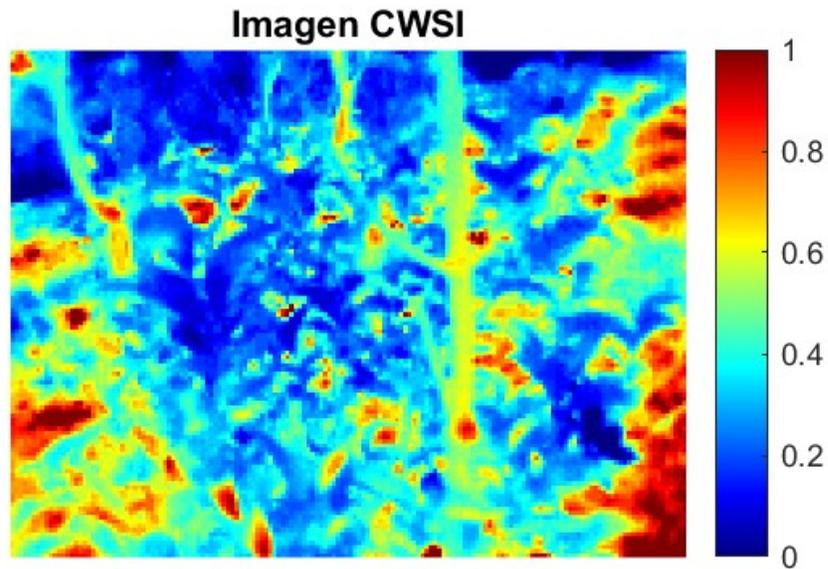


Figura B.8: Fotografía mapeada con el CWSI

Anexo C

Código de Matlab para el procesamiento de imágenes

```
1  folderPath = uigetdir('Seleccione la carpeta con las
   im genes');
2  imageFiles = dir(fullfile(folderPath, '*.png')); %se va a
   cambiar a png o jpg dependiendo de las imagenes
3
4  % Definir factores de escalado
5  scaleFactor = 2.2; % Escala inicial en escala de grises
6  outputScaleFactor = 1.5; % Factor de agrandamiento para las
   im genes de salida
7
8  % Crear una escala de colores ajustada a todo el rango de
   CWSI
9  cmap = jet(256); % Escala de colores continua desde azul
   (0) a rojo (1)
10
11 % Procesar cada imagen
12 for i = 1:length(imageFiles)
13     % Leer la imagen
14     imgPath = fullfile(folderPath, imageFiles(i).name);
15     img = imread(imgPath);
16
```

```

17     % Convertir la imagen a escala de grises si es
        necesario
18     if size(img, 3) == 3
19         imgGray = rgb2gray(img);
20     else
21         imgGray = img;
22     end
23
24     % Agrandar la imagen en escala de grises
25     imgGray = imresize(imgGray, scaleFactor);
26
27     % Ajustar el contraste (saturar la imagen)
28     imgGray = imadjust(imgGray);
29
30     % Normalizar la imagen de escala de grises entre 0 y 1
31     imgNormalized = double(imgGray) / 255; % Normalizar
        entre 0 (negro/fr o) y 1 (blanco/caliente)
32
33     % Calcular CWSI para cada p xel basado en la
        normalizacion
34     CWSI = imgNormalized; % CWSI directamente proporcional
        a la escala de grises
35
36     % Limitar CWSI entre 0 y 1 para evitar valores fuera de
        rango
37     CWSI(CWSI > 1) = 1;
38     CWSI(CWSI < 0) = 0;
39
40     % Convertir CWSI a una imagen RGB usando la escala de
        colores
41     CWSI_img = ind2rgb(im2uint8(CWSI), cmap);
42
43     % Agrandar las imagenes de salida para la
        visualizaci n final

```

```

44     imgResized = imresize(img, outputScaleFactor);
45     imgGrayResized = imresize(imgGray, outputScaleFactor);
46     CWSI_imgResized = imresize(CWSI_img, outputScaleFactor)
        ;
47
48     % Crear una figura para mostrar las tres imagenes
        juntas
49     figure;
50
51     % Mostrar la imagen original
52     subplot(1, 3, 1);
53     imshow(imgResized, []);
54     title(['Imagen Original']);
55
56     % Mostrar la imagen en escala de grises
57     subplot(1, 3, 2);
58     imshow(imgGrayResized, []);
59     colormap(gca, gray); % Asegura que este subplot use
        escala de grises
60     title('Escala de Grises');
61
62     % Mostrar la imagen CWSI con barra de colores
63     subplot(1, 3, 3);
64     imshow(CWSI_imgResized);
65     title('Imagen CWSI');
66
67     % Aadir la barra de colores solo a la imagen CWSI
68     colormap(gca, cmap); % Utilizar la misma escala de
        colores jet solo para este subplot
69     colorbar; % Aadir la barra de colores
70     caxis([0 1]); % Ajustar el rango de la barra de colores
        de 0 a 1
71 end

```


Bibliografía

- [1] United Nations. Objetivos de desarrollo sostenible, 2025. Accedido: 16-01-2025.
- [2] United Nations Development Programme. Sustainable and digital agriculture. <https://www.undp.org/sgtechcentre/sustainable-and-digital-agriculture-1>, 2023. Accedido: 04-12-2023.
- [3] CASAFE. Prácticas de agricultura sustentable. <https://www.casafe.org/buenas-practicas-agricolas/agricultura-sustentable/>, 2023. Accedido: 04-12-2023.
- [4] Maanak Gupta, Mahmoud Abdelsalam, Sajad Khorsandroo, and Supid Mittal. Security and privacy in smart farming: Challenges and opportunities. *IEEE*, 8, 2020.
- [5] Rodolfo Bongiovanni, Evandro Chartuni, Stanley Best, and Álvaro Roel. *AGRICULTURA DE PRECISIÓN: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. PROCISUR/IICA, 2006.
- [6] Gkuonqui. Los sig en la agricultura. <https://gkuonqui.files.wordpress.com/2017/07/infografc3ada-sig.png>, 2017. Accedido: 05-12-2023.
- [7] JeonGeun Kim, Seungwon Kim, Chanyoung Ju, and Hyoung Il Son. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE*, 7, 2019.
- [8] Delsat International. Drones en la agricultura, julio 2024. Accedido: 16-01-2025.
- [9] Chris Lytridis, Vassilis G. Kaburlasos, Theodore Pachidis, Michalis Manios, Eleni Vrochidou, Theofanis Kalampokas, and Stamatis Chatzistmatis. An overview of cooperative robotics in agriculture. *agronomy*, 11, 2021.
- [10] Aqua4D. Agritech in switzerland: Squaring the circle of productivity and climate protection? <https://news.aqua4d.com/agritech-in-switzerland-productivity-and-climate-protection-2/>, 2023. Accedido: 07-10-2023.
- [11] Vasso Marinoudi, Calus G. Sorensen, and Simon Pearson. Robotics and labour in agriculture. a context consideration. *Biosystems Engineering*, 184(1):111–121, 2019.

- [12] Eurecat. Robot para la vinicultura: Grape, 2025. Accedido: 16-01-2025.
- [13] Fernández David. Flir ax8: visualización agrícola con cámaras termográficas de infrarrojos. <https://novedadesautomatizacion.com/flir-ax8/>, 2019. Accedido: 03-10-2023.
- [14] Daniel L. Balageas. Termografía infrarroja : una técnica multifacética para la evaluación no destructiva (end). *Conferencia Panamericana de END*, 2007.
- [15] Philipp Lottes, Raghav Khanna, Johannes Pfeifer, Roland Siegwart, and Cyrill Stachniss. A uav-based crop and weed classification for smart farming. *International Conference on Robotics and Automation*, 2017.
- [16] EOS Data Analytics. Agricultura de precisión: De la teoría a la práctica, 2021. Accedido: 15-01-2025.
- [17] Maria Romero, Yuchen Luo, BAofeng Su, and Sigfredo Fuentes. Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an uav platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147(1):109–117, 2018.
- [18] Flavio Capraro. Cálculo de cwsí en base a imágenes termográficas para el análisis de estrategias de riego deficitario en tomate. *Congreso Argentino de Agroinformática*, (1):84, 2009.
- [19] Idso S.B., Jackson R. D., Pinter P. J., Reginato R. J., and J. L. Hatfield. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol*, 24(1):45–55, 1981.
- [20] Jackson R. D., Idso S. B., Reginato R. J., and Pinter Jr P. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour, Res*, 1133(1):17, 1981.
- [21] H. C. Jones. *Plants and microclimate, 2nd ed.*, chapter Crop water stress index, pp. 293–295. Cambridge University Press, 1992.
- [22] Zhiwei Hou, Peng Lu, and Zhangjie Tu. Nonsingular terminal sliding mode control for a quadrotor uav with a total rotor failure. *Aerospace Science and Technology*, 98, 2020.
- [23] Xiang Yin, Jinhua She, Min Wu, Daiki Sato, and Kouhei Ohnishi. Disturbance rejection using smc-based-equivalent-input-disturbance approach. *Applied Mathematics and Computation*, 418, 2022.
- [24] Qicheng Mei, Jinhua She, Zhentao Liu, and Min Wu. Estimation and compensation of periodic disturbance using internal-model-based equivalent-input-disturbance approach. *Science China*, 65, 2020.
- [25] Cristhian S. Muñoz, Juan S. Corredor, Diego A. Patino, and Julian D. Colorado. Uav trajectory optimization for precision agriculture. *IEEE*, 2020.

- [26] Ahmed Eltayeb, Mohd Fua'ad Rahmat, Mohd Ariffana Mohd Basri, M. A. Mohammed Eltoum, and Magdi Sadek Mahmoud. Integral adaptive sliding mode control for quadcopter uav under variable payload and disturbance. *IEEE Access*, 2022.
- [27] Omid Mofid, Saleh Mobayen, and Fekih Afef. Adaptive integral-type terminal sliding mode control for unmanned aerial vehicle under model uncertainties and external disturbances. *IEEE Access*, 9:53255–53265, 2021.
- [28] Ziqiang Liu, Wenyu Cai, Meiyan Zhang, and Shuaishuai Lv. Improved integral sliding mode control-based attitude control design and experiment for high maneuverable auv. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022.
- [29] Yajun Luan, Junzeng Xu, Yuping Lv, Xiaoyin Liu, Haiyu Wang, and Shimeng Liu. Improving the performance in crop water deficit diagnosis with canopy temperature spatial distribution information measured by thermal imaging. *Agricultural Water Management*, 246, 2021.
- [30] LAPACA. Porómetro de hoja. <http://www.lapacacr.com/productos/fisiologia-vegetal/porometro-de-hoja>, 2023. Accedido: 14-12-2023.
- [31] Azar Khorsandi, Abbas Hemmat, Seyed A. Mireei, and Rasoul Amirfattahi. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. *Agricultural Water Management*, 204, 2018.
- [32] Jorge S. Cervantes-Rojas, Filiberto Muñoz, Isaac Chairez, and Iván González-Hernández. Adaptive tracking control of an unmanned aerial system based on a dynamic neural-fuzzy disturbance estimator. *ISA Transactions*, 2020.
- [33] Ahmed Eltayeb, Mohd Fua'ad Rahmat, Mohd Ariffanan Mohd Basri, M. A. Mohammed Eltoum, and Magdi Sadek Mahmoud. Integral adaptive sliding mode control for quadcopter uav under variable payload and disturbance. *IEEE*, 2022.
- [34] Vadim I Utkin. *Sliding modes in control and optimization*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [35] Vadim Utkin, Alex Poznyak, Yury V Orlov, and Andrey Polyakov. *Road map for sliding mode control design*. Springer, 2020.
- [36] Patricio Ordaz, Miguel Ramírez, Liliam Rodríguez, Carlos Cuvas, Hugo Romero, and Omar Sandre. Parameter identification based on nonlinear observer for mechanical systems. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 16(2):021004, 2021.
- [37] Vadim Utkin, Jürgen Guldner, and Jingxin Shi. *Control in Electro-Mechanical Systems*. CRC Press, 2009.
- [38] Yongping Pan, Chenguang Yang, Lin Pan, and Haoyong Yu. Integral sliding mode control: performance, modification, and improvement. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(7):3087–3096, 2017.

- [39] Randal W. Beard and McLain W. Timothy. *Small Unmanned Aircraft*. Princeton University Press, 2012.
- [40] Jorge Cervantes, Filiberto Muñoz, Iván González-Hernández, Sergio Salazar, Isaac Chairez, and Rogelio Lozano. Neuroo-fuzzy controller for attitude-tracking stabilization of a multi-rotor unmanned aerial system. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2017.