

# UACM

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

*Nada humano me es ajeno*

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN  
SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

## **Aplicaciones de un vehículo aéreo no tripulado**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
**LICENCIADOS EN INGENIERÍA EN SISTEMAS  
ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES**

P R E S E N T A N :

**BRENDA RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ  
MANUEL ALEJANDRO GUZMÁN  
RIVERO**

DIRECTOR: **MTRO. MARIO VILLAFUERTE BANTE**

CODIRECTOR: **DR. PABLO VERA BUSTAMANTE**

Ciudad de México, diciembre de 2021.

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

### DERECHOS RESERVADOS<sup>©</sup>

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

PRESIDENTE:

Dr. Josiane Jaime Rodríguez Suárez

SECRETARIO:

Dr. Cuauhtémoc Guerrero Tejada

VOCAL:

Dr. Pablo Vera Bustamante

1ER SUPLENTE:

2DO SUPLENTE:

PLANTEL DE ADSCRIPCIÓN:

CUAUTEPEC

DIRECTOR DE TESIS:



Dr. Mario Vifuerte Bante

Grado y Nombre del Director de Tesis

Instrucción del Director de Tesis

## Agradecimientos

- Rodríguez Gutiérrez Brenda

Este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo de mi director Dr. Mario Villafuerte Bante y sobre todo le agradezco de corazón a mi codirector el Dr. Pablo Vera Bustamante por todo el esfuerzo, aprendizaje y sobre todo la paciencia que me brindo en el trayecto de la realización del proyecto.

Les agradezco a mis padres Juan José Rodríguez y María de Jesús Gutiérrez por el apoyo y esfuerzo económico que me brindaron en el transcurso de la carrera, a mis hermanos Vanessa Rodríguez y Juan Iván Rodríguez y a mis abuelos Enrique Rodríguez, Micaela Sánchez porque creyeron en mí y me dieron las fuerzas de seguir adelante en este camino.

También sobre todo agradezco a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) por haberme aceptado a seguir por el camino académico y abrirme las puertas para tener un mejor conocimiento y una mayor oportunidad laboral.

- Manuel Alejandro Guzmán Rivero

Agradezco a mi madre por todo el esfuerzo, dedicación y paciencia que me ha brindado en toda mi vida universitaria al igual asimismo agradezco a mi padre porque todo en este tiempo me ha apoyado y comprendido para que este proceso universitario culmine de manera exitosa. También agradezco a toda mi familia en general porque siempre me brindaron tantos consejos y apoyo para seguir adelante en la universidad y nunca rendirme.

Así mismo dar gracias a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) por darme el privilegio de hacer uso de sus instalaciones y recursos. A mi Director el Dr. Mario Villafuerte Bante por brindarme sus conocimientos, por darme la oportunidad de realizar este trabajo. Un especial agradecimiento a mi Co-director Pablo Vera Bastamente el cual me brindo sus conocimientos y tiempo en todo momento los cuales me han ayudado a crecer en el ámbito académico y personal.

# Índice

Agradecimientos.....	2
Resumen.....	5
Abstract.....	6
Capítulo1.....	7
Introducción .....	7
1.1    Objetivos.....	8
1.1.1 Generales .....	8
1.2 Organización de la tesis .....	8
1.3    Estado del arte (Historia del drone).....	9
Capítulo 2. Drone .....	14
2.1 ¿Que es drone?.....	14
2.2 Tipos de drone.....	15
2.2.1 Tricóptero .....	15
2.2.2 Cuadricóptero .....	16
2.2.3 Hexacóptero.....	19
2.2.4 Octocóptero .....	21
2.3 Partes de un drone .....	22
2.3.1 Chasis .....	22
2.3.2 Motores .....	23
2.3.3 Hélices .....	24
2.3.4 Placa controladora de vuelo.....	25
2.3.5 Acelerómetro .....	25
2.3.6 Giroscopio.....	26
2.3.7 Altímetro.....	27
2.3.8 Telemetría OSD.....	27
2.3.9 Cámara.....	27
2.3.10 Batería (Pila).....	28
2.4 Modelado del drone. ....	28
Capítulo 3. Visión Artificial y ROS .....	32
3.1 ROS (Robot Operating System).....	32

<b>3.2 Algunos conceptos de ROS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.1 Nodo .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.2 Tópicos .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3 OpenCV .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4 Visión Artificial.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.1 Modelo Pin Hole.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4.2 Calibración de la cámara .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5 Segmentación.....</b>	<b>38</b>
<b>3.6 Centróide .....</b>	<b>39</b>
<b>3.7 Bebop Drone Autonomy .....</b>	<b>40</b>
<b>3.8 Python .....</b>	<b>40</b>
<b>Capítulo 4. Controladores .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1. Avance, Lateral y Altura .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2 Control Proporcional (P).....</b>	<b>42</b>
<b>4.3 Control Proporcional Derivativo (PD).....</b>	<b>43</b>
<b>Capítulo 5. Pruebas de Torneo Mexicano de Robótica (TMR).....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 Prueba 1. Seguimiento de objeto en movimiento. ....</b>	<b>47</b>
<b>5.2 Prueba 2. Vuelo en línea recta y detección de obstáculo. ....</b>	<b>52</b>
<b>5.3 Prueba 3. Vuelo en línea recta, evasión de obstáculo y continuar con el rumbo.....</b>	<b>57</b>
<b>5.4 Prueba 4. Vuelo sobre escalones. ....</b>	<b>64</b>
<b>5.5 Prueba 5. Vuelo siguiendo puntos de referencia. ....</b>	<b>70</b>
<b>5.6 Aplicación .....</b>	<b>74</b>
<b>Capitulo 6. Conclusión y trabajo futuro .....</b>	<b>78</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>81</b>

## Resumen

En términos generales este trabajo trata de un control de un vehículo aéreo no tripulado utilizando visión.

En este trabajo se realiza el control de un drone, el cual ejecuta algunas de las pruebas del Torneo Mexicano de Robótica (TMR) mediante Visión Artificial. Los programas que ejecuta el drone son principalmente programados en Python; también las ejecuciones de dichos algoritmos son en ROS. Para cada una de las pruebas realizadas se utilizó el drone Bebop Parrot 2.

Para el control de velocidad y posición de los movimientos se realizó un control Proporcional Derivativo (PD) el cual permitió el control adecuado para la realización de las pruebas de TMR.

También se presenta una aplicación donde el drone observa un objeto particular, el vehículo aéreo no tripulado lo seguirá. Esto se hace con la finalidad de tratar de ayudar a las autoridades de la Ciudad de México a la disminución de robo de vehículos.

## Abstract

*In general terms, this work deals with a control of an unmanned aerial vehicle using vision.*

*In this work, the main objective was to control a drone which will perform some of the tests of the Mexican robotics tournament using artificial vision. The programs that the drone executes are mainly programmed in Python, also the executions of these algorithms are in ROS. The Bebop parrot 2 drone was used for each of the tests carried out.*

*For de velocity an position control a Proportional Derivative (PD) control was carried out, which is the appropriate control for performing TMR tests*

*Also application was also done where the drone sees an object which a remote control car will have and the unmanned aerial vehicle will follow it, this is done in order to try to help the authorities of Mexico City on stolen vehicles. Finally*

# Capítulo1

## Introducción

En este trabajo de investigación se toca el tema de los drones, siendo específicos se tratan sobre aquellos que funcionan con cuatro hélices, los cuales, son conocidos por el nombre de cuadricópteros.

También se explica de manera detalla cómo se realizaron cinco de las diez pruebas del Torneo Mexicano de Robótica (TMR). No se realizaron todas las debido a que algunas de estas pruebas son cooperativas, es decir, que se tiene que utilizar dos drones y debido a falta de recursos económicos se optó por realizar las pruebas en donde se incluye un solo dron.

Uno de los impulsos de este trabajo, es de participar en la TMR, para poder llevar a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México a participar en este tipo de eventos, por eso se decidió la realización de este tipo de pruebas.

## 1.1 Objetivos.

### 1.1.1 Generales

- Realizar el control de un vehículo aéreo no tripulado.
- Realizar 5 pruebas básicas para el TMR para Drones Autónomos.
- Seguimiento de un automóvil, por medio de un marcador circular con un Drone Autónomo.

## 1.2 Organización de la tesis

En el Capítulo 1, se hablará de los objetivos generales y específicos los cuales nos ayudarán a saber que es lo se necesita hacer para poder llevar a cabo este trabajo. También se comentará de manera breve la historia del dron.

El capítulo 2, se comentará el concepto de que es un dron y las partes que compone a este mismo. También se hará mención de los tipos de drones que existen en la actualidad. Por último, se explica el modelado de un cuadricóptero, es decir, un dron con cuatro hélices.

Para el capítulo 3, se tocará el tema de las bibliotecas Ros y OpenCV las cuales, son herramienta de suma importancia controlar el dron. También se tocarán algunos temas de visión artificial como son: Modelo *pin hole*, calibración de la cámara y el tipo de segmentación que se llevó acabo para poder visualizar el objeto de interés, que seguirá el dron.

En el capítulo 4, se describen los controladores utilizados para los movimientos laterales y el control de altura, los cuales son a velocidad constante y únicamente se controla la posición por medio de referencias de visión artificial.

En el capítulo 5, se mencionará como se realizó cada una de las pruebas del (TMR) por medio de diagramas de flujo y también se indica cómo se realizó la prueba paso a paso, desde el despegue del vehículo aéreo no tripulado, hasta su aterrizaje en cada una de las pruebas. También en ese mismo capítulo, se indica cómo fue realizada la aplicación del dron para que siguiera el objeto de importancia que tendrá el automóvil.

Por ultimo en el capítulo 6, se menciona las conclusiones y resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas, también se comenta cuáles fueron las dificultades de hacer dicho proyecto y a su vez se cometa el trabajo que se pueda realizar a futuro.

### 1.3 Estado del arte (Historia del drone).

Los datos más viejos que se tiene de los vehículos aéreos no tripulados, datan del 22 de agosto de 1849, el ejercito de Austria uso globos cargados con explosivos en una batalla contra la Ciudad de Venecia, en la **Imagen 1** se presenta una representación de esta batalla.



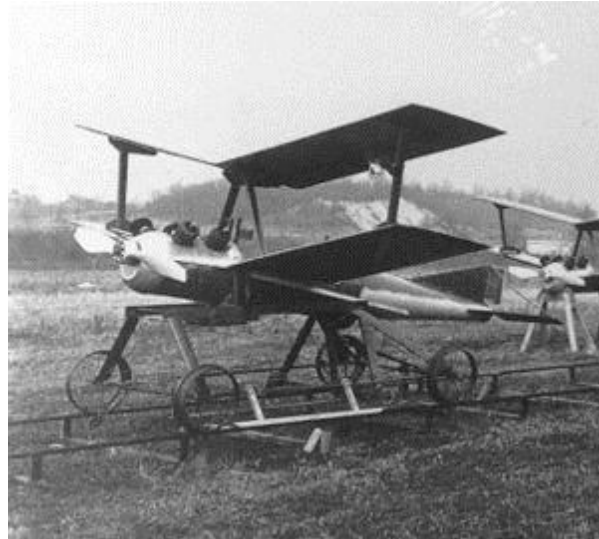
**Imagen 1.** Globos en la guerra de Austria y Venecia.

Para el año 1916, fue construido el primer vehículo aéreo no tripulado el cual, llevaba el nombre de *Aerial Target*, se controló por medio de radiofrecuencia de amplitud modulada (AM) con la finalidad de tener una mejor puntería para la artillería anti aérea.

El desarrollo del drone fue de la mano con misiles, esto se debe, a que se buscaba una forma de guiar los explosivos. El 12 de septiembre del mismo año, el "*Hewitt-Sperry Automatic Airplane*" conocido como la bomba volante, realizó su primer vuelo de demostración en el que ya se podía apreciar el concepto de vehículo aéreo no tripulado (VANT).

En el año de 1917 Charles Kettering de General Motors, diseñó el biplano no tripulado conocido como Kettering Bug o torpedo aéreo Kettering, el cual se muestra en la **Imagen 2**. Este vehículo es accionado por un mecanismo de relojería el cual, debía cerrar las alas en un lugar

programado a la hora que esto pasaba, este biplano caía sobre un enemigo como una bomba. Se creó para el ejército de EE.UU., pero cabe mencionar que no se utilizaron en combate.



*Imagen 2. Torpedo aéreo Kettering.*

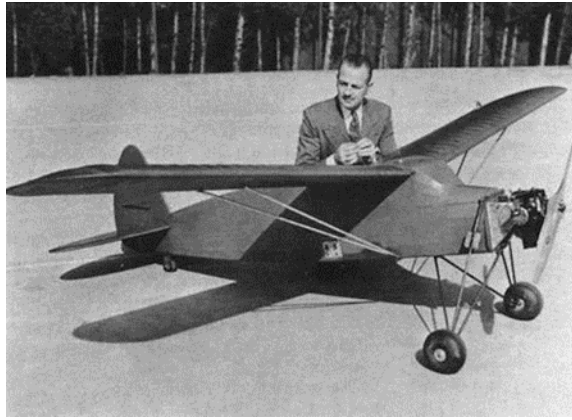
Con el paso de los años surgen los misiles cruceros, el nombre de uno de ellos es Larynx el cual, se colocaba sobre un monoplano donde era lanzando desde un buque de guerra, las pruebas realizadas se llevaron a cabo en los años 1927 y 1929 por la *Royal Navy*. Gracias al éxito de los monoplanos, en los años 1930 y 1931 tanto Gran Bretaña y EEUU diseñaron aviones pilotados por medio de radio frecuencia.

Posteriormente para los años 1934 y 1943 en el Reino Unido, se realizaron pruebas del primer vehículo aéreo no tripulado el cual, se llama Queen Bee, era controlado por control remoto desde un barco que se llamaba DH82A Tiger Moth.

En 1934, no solo se hacían pruebas en Gran Bretaña; en Estados Unidos se crea la empresa Reginald Denny Industries, la cual, se dedicaba a la creación de aviones de radio control, esta empresa fue creada por Henry Fonda y Jimmy Stewart.

En 1939, el ejército decidió comprar a Reginald Denny, varias unidades del modelo RP 4 al que llamaron posteriormente OQ-1 el cual, tenía seis caballos de potencia, un tamaño entre las alas de 3.73 metros y tenía un peso de 47 kilogramos, el cual se puede observar en la **Imagen 3**.

Esto es muy importante, ya que con ello se hace oficial el concepto vehículo aéreo no tripulado y este modelo cumple la mayoría de las características de un drone.



*Imagen 3. Modelo OQ-1.*

A principios de la Segunda Guerra Mundial, Adolfo Hitler, se encargó de crear una bomba, para transportarla pidió a Fieseler Flugzeugbau que diseñará el Fi-103, que es conocido como VERGELTUNGSWAFFE-1 (ver la **Imagen 4**) el cual, se lanzaba desde una rampa, su lanzamiento era muy similar como el que hacen las catapultas. Cabe mencionar, que salía volando a 470mph, se realizaba con un pequeño motor pulsorreactor.

Otra de sus características, es que podía cargar hasta una cabeza de 1000 kg y era programado para volar hasta 250 km antes de soltar la bomba que contenía.



*Imagen 4. Modelo VERGELTUNGSWAFFE-1.*

Por otra parte, en Estados Unidos se fabricó el radioplano OQ-2, con la finalidad de formar pilotos y artilleros el cual, alcanzaba una velocidad de 137 kms/h, fué por primera vez utilizado en 1944, este vehiculo se muestra en la **Imagen 5**.



*Imagen 5. Modelo OQ-2.*

En el 1951, Estados Unidos lanzó el AQM-34 el cual, fue usado como aparato de reconocimiento que se lanzaba desde un avión madre, por lo tanto, tenía una ruta programada, ya terminado dicho recorrido este desciende de un paracaídas, cabe mencionar que este modelo se utilizó por 30 años<sup>[1]</sup> se presenta en la **Imagen 6**.



*Imagen 6. Modelo AQM-34.*

El MQ1, fue el primer vehículo aéreo no tripulado que contenía un sistema de posicionamiento global GPS, este sistema hace que se reemplace el lugar de ruta que seguir. Su

implementación se realizó un año después en la guerra en Yugoslavia, se observa en la **Imagen 7**.



*Imagen 7. Modelo MQ1.*

Algunas de las características del MQ1 es que, tiene un rango de distancia de 450 millas y tiene hasta 16 horas de video en tiempo real, en imagen de color en alta definición, también, cuenta con cámaras de visión infrarroja y además tiene un radar de apertura sintética, está controlado por un equipo en tierra el cual, usa una conexión de radio por *line-of-sight* en donde se tiene que utilizar un satélite.

## Capítulo 2. Drone

### 2.1 ¿Que es un drone?

Los drones, también conocidos como vehículos aéreos no tripulados, son capaces de ser manejados a largas distancias o también pueden trazar su propia ruta, mediante GPS. La palabra drone en español significa (abeja macho), hoy en día existen diversos tamaños o diseños, los cuales tiene distintas finalidades.

El término genérico que se utiliza para referirse a los drones son, Vehículo Aéreo No Tripulado (siglas VANT en español) o Unmanned Aerial Vehicles (UAV) en inglés. Técnicamente, los drones y los VANT/UAV son lo mismo, aeronaves no tripuladas por ningún piloto<sup>[2]</sup>.

Una de las características de un drone, es que el vuelo es controlado por medio de un control remoto a través de radio frecuencia o wifi.

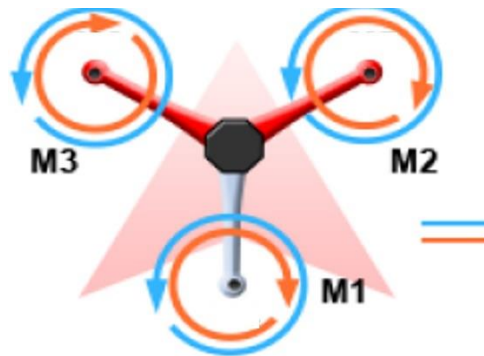
Los drones tienen su origen en el contexto militar, ya que fue allí donde se diseñó este tipo de robot aéreo el cual, contiene cámara, GPS y toda clase de sensores para ser usado como arma, misiones de combate o vigilancia. Hoy en día, el uso de los drones va más allá de buscar un fin bélico o de guerra, su venta está dirigida a diversos campos como son la fotografía, videos aéreos y en algunos casos, para envío de paquetería como la compañía DHL.

## 2.2 Tipos de drone.

### 2.2.1 Tricóptero

De los tipos de drones el más sencillo es el tricóptero, está conformado por tres ejes los cuales, surgen de la parte central del drone, por lo tanto, es fácil deducir que se compone por tres motores y tres hélices. El equilibrio que se tiene en el aire se realiza mediante el aumento o disminución de las revoluciones de los motores.

El motor inferior (M1) que se muestra en la *imagen 8* cuando se disminuye o aumenta la velocidad del vehículo aéreo no tripulado, tiene el empuje necesario para inclinar la estructura ya que de esta forma se puede hacer hacia adelante o atrás. Los motores laterales (M2 y M3), hacen que este tipo de drone se mueva de un lado a otro esto debido a que las revoluciones del motor disminuyen contrario al giro.



*Imagen 8. Movimiento de hélices de un tricóptero.*

Ventajas de usar drone tricóptero:

- Son más económicos por la cantidad de motores que utiliza.
- Más ligeros debido a que utiliza menos motores.
- Más fáciles de manejar gracias al motor que se ubica en su parte trasera.

Desventajas de usar un tricóptero:

- No soporta grandes cantidades de carga.
- Bajo empuje debido a que tiene pocos motores.
- El control de este dron es más complejo.
- Los motores siempre trabajan a grandes revoluciones por lo tanto tiene el riesgo que se caliente más rápido.
- El chasis estructural es más frágil.



*Imagen 9. Drone tipo Tricoptero.*

## 2.2.2 Cuadricóptero

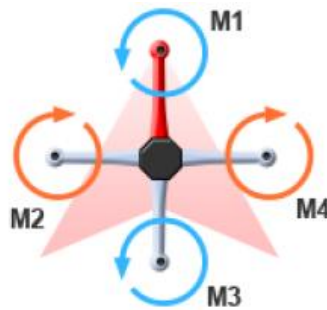
El cuadricóptero es el diseño más común hoy en día, este tipo de drones consta de cuatro hélices, las cuales, son iguales y son impulsadas mediante cuatro motores eléctricos de corriente continua sin escobillas.

Respecto del despegue y aterrizaje para este tipo de sistema, se consigue por medio de la variación de las velocidades de los cuatro motores. Cabe hacer mención que los motores giran de manera distinta ya que dos de ellos giran en sentido horario (M2 y M4) de la *imagen 10*, mientras que los restantes si giran en dirección anti horaria (M1 y M3) de la *imagen 10*. Esto es muy importante ya que si no giran de esta forma no se neutraliza la fuerza que generan los motores y por lo tanto no se tendría equilibrio.

Para que el dron gire respecto al eje vertical se tiene que variar las velocidades (M2 y M4) deben ser mayores a (M1 y M3) respecto a la *imagen 10* para que gire en sentido horario.

Para que el giro sea en sentido anti horario (M1 y M3) las velocidades deben de ser mayor (M2 y M4).

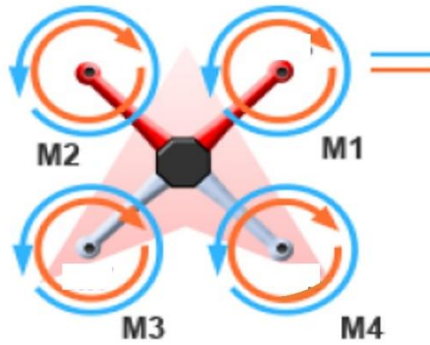
Este tipo de drones, dispone de dos estructuras diferentes, una de ellas es la cruz (+, Véase la **Imagen 10**), donde permite un manejo sencillo, debido a que a la hora de hacer un cambio de dirección sobre cualquier eje se utiliza el control de un solo motor.



**Imagen 10.** Movimiento de hélices de un Cuadricóptero en forma de +.

El otro tipo es en forma de X (Veáse la **Imagen 11 y 12**), que se utiliza para realizar las pruebas del TMR. Cabe mencionar, que una de sus características es que los motores se encuentren girados 45° respecto al dron *imagen 10*.

Es necesario que los cuatro motores sean contralados de tal forma para que se logre la estabilidad (es decir que se mantenga fijo en un punto), este diseño es de los más recomendables a la captura de imágenes.



**Imagen 11.** Movimiento de hélices de un Cuadricóptero en forma de X.

Ventaja de un dron Cuadricóptero:

- Soporta más carga que un tricóptero.
- Tienen una estructura más sólida, por lo tanto, es más resistente a los choques.
- Tienen una rápida aceleración.

Desventajas de un dron Cuadricóptero:

- No es fácil de transportar.
- A pesar de cargar más que un tricóptero, sigue teniendo limitantes en la carga.
- Menos duración de pila.

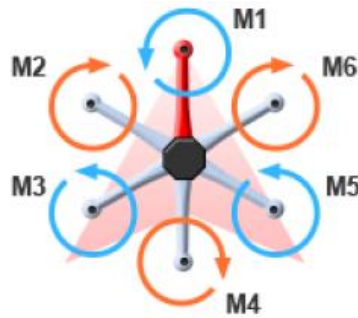


**Imagen 12.** Dron Cuadricóptero en forma de X (Bebop Parrot 2).

### 2.2.3 Hexacóptero

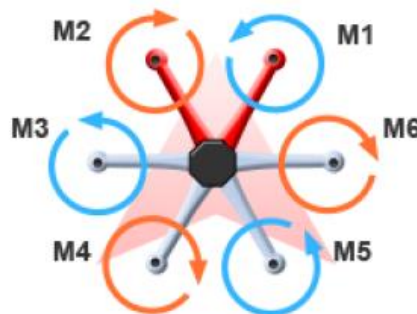
Este tipo de drones contiene seis ejes, por lo tanto, dispone del mismo número de motores y hélices. El principio del drone hexacóptero, es muy similar al mencionado anteriormente solo que su diferencia es que tres de sus motores giran en sentido horario y los restantes giran en sentido anti horario. Para que este drone tenga bastante estabilidad, todos sus motores tiene que estar colocados al mismo nivel.

Al igual que los Cuadricóptero, este tipo de drones disponen de dos estructuras diferentes. El tipo cruz, su manejo es muy sencillo debido a que, a la hora de cambiar la dirección sobre cualquier eje, se utiliza un solo motor.



*Imagen 13. Movimiento de hélices de un Hexacóptero en forma de +.*

El otro tipo es forma de X, este tipo de estructura es mejor que el tipo cruz (+), ya que suele ser más estable por la forma en la que se encuentran colocados los ejes del drone.



*Imagen 14. Movimiento de hélices de un hexacóptero en forma de X.*

En las imágenes **13** y **14**, se puede observar que los tres motores (M1, M3 y M5) giran en sentido horario y los restantes (M2, M4 y M6) en sentido contrario a las manecillas de reloj.

Ventajas de un drone Hexacóptero:

- El vuelo es más estable que los Cuadricópteros.
- Tienen la estabilidad para transportar accesorios de carga.
- Su velocidad es superior a la de otros drones.
- Por su estructura, es más resistente a los choques.

Desventajas de un drone hexacóptero:

- Su costo es muy elevado.
- Es difícil de transportar por su tamaño.
- Gasta más energía para mover todos los motores.

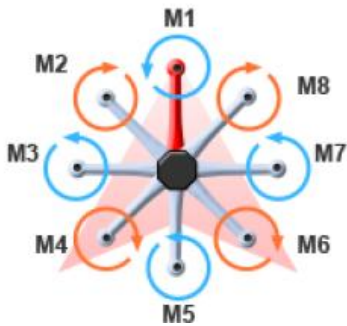


*Imagen 15. Drone Hexacóptero en forma de X.*

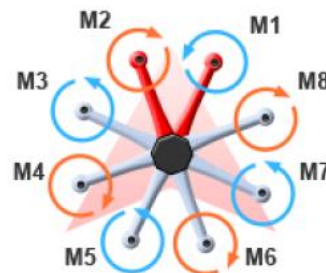
## 2.2.4 Octocóptero

Este tipo de dron e al igual que los hexacópteros tiene sus motores al mismo nivel ya que con ello se logra tener la estabilidad. Este tipo drones se conocen como multicópteros y sobresale de los anteriores, ya que pueden volar con una gran carga ya sea una cámara de video o también pueden cargar cosas de gran peso, este tipo de VANT son de uso profesional.

Este tipo de drones tienen ocho hélices, donde cuatro de ellas giran en sentido de las manecillas de reloj, mientras las otras cuatro giran en sentido anti horario y de esta forma se genera la estabilidad a la hora de volar. También existen dos tipos de este dron e los cuales están en las *imágenes 16 y 17*:



**Imagen 16.** Movimiento de hélices de un Octocóptero en forma de +.



**Imagen 17.** Movimiento de hélices de un Octocóptero en forma de X.

## 2.3 Partes de un drone

### 2.3.1 Chasis

El chasis es la estructura más importante de un drone, este componente genera el soporte de todas las piezas que contiene. Las características del chasis, dictaminan el tipo de Vehículo Aéreo No Tripulado, ya sea cuadricóptero, hexacóptero, u octoacóptero; por otra parte, esta pieza hace que varíe el tamaño del drone.



*Imagen 18. Chasis de un Cuadricóptero (Bebop 2).*

En la actualidad, el chasis de los drones generalmente son fabricados con tres materiales diferentes.

- **Carbón:** Se utiliza este material ya que, es muy resistente, y a su vez, esto hace que el drone sea más pesado; cabe mencionar que todos los materiales que se fabrican con carbón suelen ser más caros.
- **Fibra de vidrio:** Este tiene una gran desventaja al del carbono, ya que es un material más susceptible a las rupturas, pero son más ligero y evidentemente un poco más económicos.
- **Plástico:** Es el material más económico de todos, por lo que este tipo de drones son los más adquiridos. La ventaja de este material es que los chasis son diseñados en impresoras 3D, lo cual, ayuda a que su producción y elaboración sea más fácil para el fabricante, los drones con este tipo de material son muy utilizados. <sup>[5]</sup>

### 2.3.2 Motores

Los motores son una parte vital, ya que hacen que giren las hélices del drone y así pueda volar, cabe mencionar que los motores pueden ser de distintos tamaños, velocidades y potencias.

Por otra parte, dependiendo del drone que se use, se pueden colocar motores sin o con escobillas, estos últimos se encuentran en los modelos más económicos. Los vehículos aéreos no tripulados que tienen motores sin escobillas (brushless, BLDC), son modelos con más potencia lo cual, son más costosos.

El motor que usa el drone del presente trabajo es sin escobillas, o también conocido como motor BLDC (Ver las **imágenes 19 y 20**), el funcionamiento que realiza es de la siguiente manera:

El control de los motores BLDC se necesitan circuitos designados para generar las señales adecuadas para cada una de las bobinas, las cuales crean un campo electromagnético que interactúan con el rotor.



**Imagen 19.** Motor Brushless.



**Imagen 20.** Motor Brushless del drone Bebop 2.

En las **imágenes 19 y 20** se aprecia el diseño de un motor BLDC, en las cuales se muestra que el rotor tiene embobinados los cuales interactúan con el estator.

### 2.3.3 Hélices

El drone que se usará es el Cuadricóptero, en este tipo de diseño es necesario que se tengan dos hélices que giren en sentido horario y otras dos en anti horario.

Dependiendo del tipo de drone ya sea cuadricóptero, hexacóptero, u octocóptero; cada una de las hélices tienen una posición determinada, si no se colocaran las hélices de la forma que estipula el fabricante no podrá elevarse el drone.

Cabe mencionar, que eran más utilizados los modelos con dos hélices. Aunque hoy en día se opta por utilizar modelos con tres hélices, esto se debe a que mejoran la estabilidad del drone pero su desventaja es que se consume mayor energía. Los rotores de dos y tres hélices, son diseñadas de carbono y plástico del cual este último es más utilizado ya que tiene un costo más barato.

En la mayoría de los casos, los fabricantes ponen numeración a las hélices como la siguiente: 5x30x3 lo cual, indica que tiene un tamaño de 5 pulgadas, 30 grados de inclinación y por último 3 números de aspas.

Las hélices más pequeñas paran y aceleran más rápido que las grandes, pero estas últimas tardan más en cambiar de revoluciones por minuto (rpm) debido a la inercia que genera el drone.



*Imagen 21. Aspas del drone Bebop 2.*



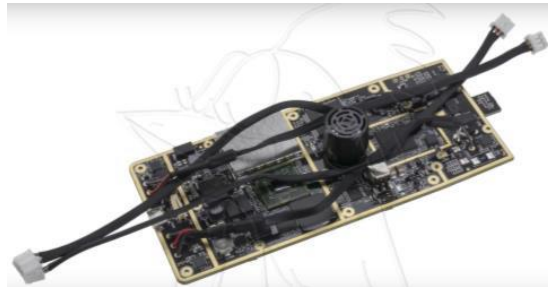
*Imagen 22. Aspas del drone DJI.*

En las *imágenes 21 y 22* se aprecia la forma de las hélices de dos diferentes drones en la izquierda vemos las hélices del bebop parrot 2 y del lado derecho están las del drone dji maverik

### 2.3.4 Placa controladora de vuelo

La placa controladora, es una parte muy importante ya que, realiza todos los movimientos de los vehículos aéreos no tripulados, esta placa incluye los controladores de velocidad para cada uno de los motores los cuales ya vienen estipulados por medio de firmware (valores establecidos de fábrica).

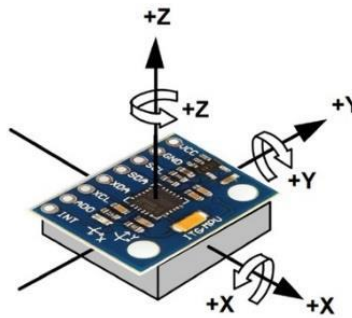
Además de ejecutar lo ya mencionado, se encarga de recibir los datos u órdenes que le damos al drone ya sea con un control remoto. La aplicación que se utiliza para la calibración de los sensores free flight pro, sin embargo, hacemos los programas con ROS y Python véase el capítulo tres.



*Imagen 23. Placa de vuelo.*

### 2.3.5 Acelerómetro

Un acelerómetro 3D, mide la aceleración lineal a lo largo de los ejes **X**, **Y** y **Z**. Estos sensores, miden la aceleración estática, con la cual podemos estimar la aceleración dinámica que es la diferencia de velocidad entre dos instantes consecutivos. Este tipo de sensores, son utilizados para determinar la posición y orientación del drone durante el periodo de vuelo, esto lo sabemos por qué la distancia recorrida es igual a la doble integral de la aceleración.



**Imagen 24.** Acelerómetro.

En la **Imagen 24** se muestra un circuito integrado el cual tiene un sistema de referencias que tiene el acelerómetro.

### 2.3.6 Giroscopio

El giroscopio mostrado en la **imagen 25** es un circuito integrado, el cual, mide la velocidad angular en los ejes X, Y, Z donde se estima el giro a través de la integral de la velocidad angular. Cabe mencionar, que tanto el acelerómetro y el giroscopio trabajan unidos ya que, el acelerómetro da la posición lineal del drone, mientras que el giroscopio indica la dirección.



**Imagen 25.** Giroscopio.

### **2.3.7 Altímetro**

Este sensor que poseen los Vehículo aéreo no tripulado (VANT), son de gran utilidad ya que ayudan a mantener una altura constante, lo cual, es de suma importancia ya que permite hacer grabaciones y fotos en donde no se visualiza un aumento o disminución de la altura que tiene el drone.

También gracias al altímetro, se mantendrá una altura estable a la hora de volar, este sensor es de gran utilidad en nuestro trabajo, ya que nos ayudará a que el drone siga de manera exitosa los objetos que se segmentaron. Este sensor ayuda tener una mayor calidad de imagen.

### **2.3.8 Telemetría OSD.**

Es un indicador que es de gran ventaja para quien controla un drone, ya que, arroja datos de suma importancia como son el nivel de batería, velocidad, altura y en los VANT de gama alta pueden mostrar la corriente que está consumiendo cada motor.

También el OSD indica el tiempo de vuelo desde el segundo en que despegó hasta que aterriza y en algunos modelos, se menciona el tiempo que lleva encendido. Cabe mencionar que, por lo regular, cuando la lectura del voltaje de la pila del drone tiene un valor menor o igual 3.5 volts, el drone automáticamente se aterriza.

### **2.3.9 Cámara**

El parrot bebop 2, contiene una cámara de 14 mega pixeles, eso quiere decir, que tiene una resolución media a comparación de lentes de cámaras con tecnología más avanzada; la cámara llega a grabar video en formato 1080 pixeles a 30 imágenes por segundo.

El drone cuenta con una estabilización óptica de imagen ya que, al estar en el aire graba con una buena calidad. Cuenta con un movimiento interno giro de 180 grados. Todas las fotografías que se toma con el drone cuenta con varios tipos de formato.

En la **Imagen 26** se muestra la parte frontal del Bebop 2, en la cual se encuentra la cámara a utilizar.



*Imagen 26. Cámara del drone Bebop 2.*

### 2.3.10 Batería (Pila)

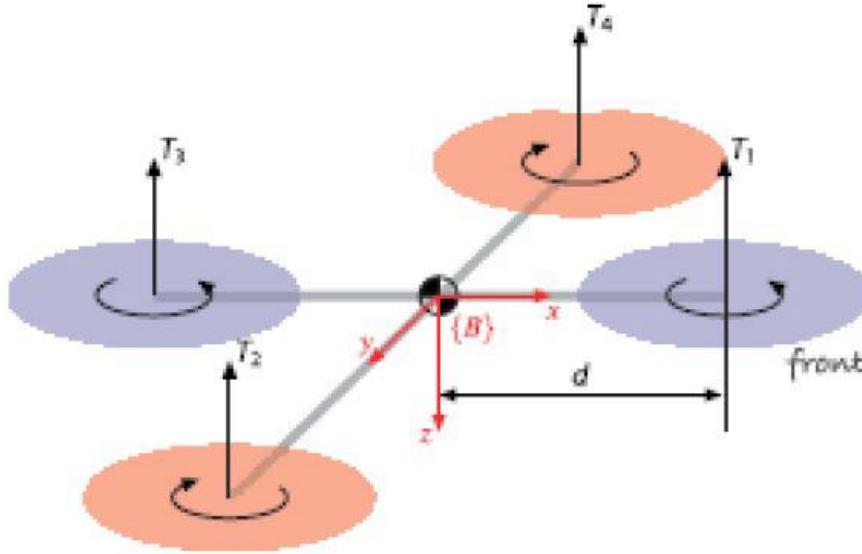
La batería que proporciona el Parrot Bebop 2, cuenta con 2700mAh a 11.1 volts, aproximadamente tiene una duración de 25 minutos continuos y un tiempo de carga muy corta de entre 30 a 70 minutos.



*Imagen 27. Batería de Bebop Parrot 2.*

## 2.4 Modelado del drone.

En esta sección, se hablará del modelado de un cuadricóptero para ello, se toma como referencia la **Imagen 28**. Considerando como referencia el punto *B*, se puede observar que el eje *Z* esta hacia abajo; esto debido al sistema de referencia que maneja el drone . *B* está unido al vehículo aéreo no tripulado y tiene su origen en el centro de masa del drone. Este tipo de drone tiene cuatro rotores los cuales son accionados por motores eléctricos.



**Imagen 28.** Notación modelado del Drone.

Como se puede observar en la **imagen 28**, se muestran dos motores que giran en sentido a las manecillas del reloj y los restantes giran en sentido anti horario.

La velocidad del rotor es  $w_i$  (donde  $i$  es el número de motores que se tiene) y el empuje es un vector  $\vec{T}_i$  hacia arriba, por lo tanto, se tiene lo siguiente.

$$\vec{T}_i = bw_i^2 \quad \text{con} \quad \vec{i} = 1, 2, 3, 4, \dots \dots \dots (1)$$

Donde  $b > 0$ , dado que es la contante de elevación del drone el cual, depende de la cantidad de aire que halla en ese momento. Cabe mencionar, que la dinámica de traslación del drone viene dada por la segunda ley de Newton, por lo tanto se tiene la ecuación dos .

$$m\vec{v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} - R_B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2)$$

donde:

$m$  es la masa del drone

$g$  es la aceleración gravitacional

$v$  es la velocidad lineal del VANT.

$\vec{T} = \sum \vec{T}_i$  es la sumatoria total de empuje que ejerce el drone hacia arriba.

Para el par de torsión en el eje  $X$  del drone, es decir el par *roll*, se obtiene de la siguiente manera; se tiene que tomar en cuenta la fuerza de la gravedad que actúa hacia abajo del drone. Otro factor que se toma en cuenta es el empuje total en el vehículo aéreo no tripulado, las diferencias de ambas partes, hacen que el drone gire y se representa por la ecuación 3.

$$\tau_x = dT_4 - dT_2 \dots \dots \dots (3)$$

De la ecuación (3),  $d$  es la distancia que existe del motor al centro de masa del vehículo aéreo no tripulado. También cabe mencionar que se puede escribir la ecuación (3) en términos de velocidad del rotor y queda expresada de la siguiente manera.

$$\tau_x = db(w_4^2 - w_2^2) \dots \dots \dots (4)$$

Por lo tanto, para el eje  $y$ , el par *pitch* tenemos lo siguiente:

$$\tau_y = db(w_1^2 - w_3^2) \dots \dots \dots (5)$$

El par aplicado a cada hélice por el motor se opone a la resistencia aerodinámica.

$$Q_i = kw_1^2 \dots \dots \dots (6)$$

donde  $k$  es un número real, la cual, es la constante de elevación del drone, por último, el par de reacción total sobre el eje  $Z$  se escribe de la siguiente manera.

$$\tau_z = Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4 = k(w_1^2 + w_3^2 - w_4^2 - w_2^2) \dots \dots \dots (7)$$

La diferencia de signos es debido a que  $Q_2$  y  $Q_4$  giran en sentido horario, por otra parte,  $Q_1$  y  $Q_3$  giran en sentido anti-horario. El par *yaw* se puede obtener simplemente por el control coordinado apropiado de las cuatro velocidades de los motores del drone, por lo cual, tenemos la siguiente ecuación. <sup>[7]</sup>

$$Jw = -w \times Jw + \tau \dots \dots \dots (8)$$

donde:

$\mathbf{J}$  es la matriz de inercia  $3 \times 3$  del vehículo aéreo no tripulado

$\boldsymbol{\omega}$  es la velocidad angular

$\boldsymbol{\tau}=(\boldsymbol{\tau}_x, \boldsymbol{\tau}_y, \boldsymbol{\tau}_z)$  Es el par de torsión total aplicado al dron en todos sus ejes

## Capítulo 3. Visión Artificial y ROS

### 3.1 ROS (Robot Operating System)

El Sistema Operativo de Robotica (ROS), es un conjunto de bibliotecas de software (es un conjunto de implementaciones funcionales) que proveen herramientas y comandos que ayudan a diseñar nuevos programas para los robots. ROS suministra controladores de dispositivos, librerías y también es útil como herramienta de visualización, además, se puede realizar la comunicación por mensajes y administra paquetes. ROS está bajo la licencia de *Open Source*.

Los comandos están diseñados para un sistema operativo Ubuntu-Linux, aunque hoy en día se está adaptando a otros sistemas operativos como son Mac OS, X Debian o Microsoft Windows etc. Cabe mencionar, que ROS no es un sistema operativo, pero entrega servicios como la abstracción de hardware, a su vez también puede controlar dispositivos de bajo nivel. También permite el paso de mensajes entre procesos.

## 3.2 Algunos conceptos de ROS

### 3.2.1 Nodo

Es un proceso que realiza algún tipo de computación en el sistema, comparten información entre ellos para realizar una ejecución compleja, teniendo presente que, para una aplicación, existen varios nodos al momento de ejecutar el sistema de control de una plataforma robótica. Por ejemplo, un nodo controlaría un telémetro láser, otro nodo controla los motores de las ruedas, otro nodo realiza la localización, otro nodo realiza planificación de la trayectoria y así sucesivamente. Un nodo de ROS, está escrito mediante archivos de ROS, tales como Roscpp (C++) o Rospy (Python).<sup>[8]</sup>

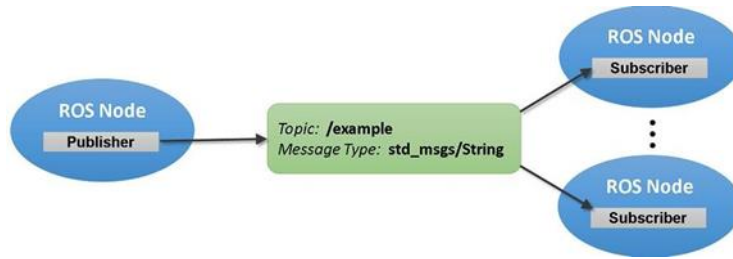
El funcionamiento principal de los nodos, es el intercambio de datos, si deseamos compartir información tenemos que enviar, para ello tenemos que usar un nodo Publisher o conocido como nodo publicador.

Si deseamos recibir algún dato, usamos un nodo suscriptor o también llamado nodo suscriptor. Cabe mencionar, que la comunicación entre un nodo de publicador y suscriptor es por medio de un tópico.

### 3.2.2 Tópicos

Los tópicos, son los que identifican el contenido de un mensaje y estos se enrutan con el publicador o suscriptor, en otras palabras, el tópico es el canal por el cual van los mensajes del nodo.

Cabe mencionar, que podemos tener varios suscriptores de un mismo nodo y también podemos tener un único publicador, por lo tanto, se tiene un tópico saliendo del nodo publicador que se comunicará con los nodos suscriptores, tal y como se muestra en la *Imagen 30*.



**Imagen 29.** Esquema de los nodos y tópicos.

### 3.3 OpenCV

OpenCV (*Open Source Computer Vision*), es una biblioteca de Visión Artificial de software libre, se lanza bajo por una licencia BSD del cual, es gratuito tanto para uso académico o comercial. Se programa por medio C++, C, Python y Java; es compatible en los sistemas operativos de Ubuntu y Linux.

OpenCV, fue diseñado para la eficiencia computacional y con un fuerte enfoque en aplicaciones en tiempo real. <sup>[10]</sup>

Hoy en día, OpenCV, es muy avanzado para aplicaciones relacionadas con la visión por computador ya sea en captura, procesamientos de datos en imágenes, identificar rostros, reconocer objetos, clasificarlos o detectar movimientos de manos. Para realizar lo anterior, OpenCV, dispone de una variedad de algoritmos que permiten realizar todas esas aplicaciones.

### 3.4 Visión Artificial.

La visión artificial, se encarga de adquirir, procesar y analizar imágenes digitales, en la etapa de procesado son algoritmos que se aplican en imágenes digitales, con la finalidad de resaltar características especiales sobre la imagen, muestran que en la etapa de analizar la imagen se debe de extraer información relevante de las imágenes procesadas.

Existe varios modelos de cámaras, pero se escoge el modelo de pin hole, debido a que es el más se asemeja al funcionamiento del ojo humano y es el más sencillo de comprender.

### 3.4.1 Modelo Pin Hole

El modelo *Pin Hole* o también conocido como modelo de agujero, consiste en una única lente representada por un punto infinitesimal también conocido como foco. La función básica de este modelo, es aplicar una matriz de proyección para transformar las coordenadas 3D de los puntos del objeto en coordenadas 2D de la imagen.



*Imagen 30. Modelo PinHole.*

El modelo de cámara pin hole se representa con la siguiente ecuación:

$$U \cong PX \dots\dots\dots(8)$$

donde:

$U = [u, v, 1]^t$  es vector de las coordenadas del punto proyectado en el plano imagen.

$P$  Es una matriz de proyección.

$X = [X_w, Y_w, Z_w]^t$  es el vector del punto 3D de la escena en coordenadas homogéneas.

El símbolo  $\cong$  indica que ambos elementos de la ecuación son iguales, salvo un factor de escala  $\lambda$ , esto es :

$$\lambda U = PX \dots\dots\dots (9)$$

Por último, la matriz de proyección  $P$  se caracteriza en dos partes:

- Parámetros intrínsecos, los cuales, se presentan en una matriz  $K$ .
- Parámetros extrínsecos, son representados por  $[R]$  matriz de rotación 3x3  $[T]$  matriz de translación 3x1, ambos parámetros se representan en la ecuación (10) que es la matriz de proyección.

$$P = K[R][\vec{T}] \dots\dots\dots(10)$$

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Parámetros intrínsecos:

Los parámetros intrínsecos, describen el funcionamiento de la cámara. Los parámetros básicos son:

- Centro Óptico ( $u_0, v_0$ ):

Es el punto donde el eje óptico de la cámara atraviesa al plano imagen, también es llamado punto principal, y sus coordenadas están en píxeles con respecto al sistema asociado al plano imagen.

- Distancia Focal ( $f_x, f_y$ ):

Es la a distancia entre el foco y el plano imagen, en milímetros.

- Factor de proporción ( $s_x$ ):

Indica la relación entre la dimensión lateral y horizontal de un pixel.

- Factor de conversión pixel-milímetros ( $d_x; d_y$ ):

Es la cantidad de pixeles por milímetro que usa la cámara. Esta relación se obtiene dividiendo la dimensión en pixeles de la imagen por el tamaño en mm del CCD.

- Factor de Escala ( $k_x, k_y$ ):

Es la proporción de tamaño de un objeto visto en la realidad con respecto a su proyección en el plano imagen. La proporción puede ser diferente en cada eje. Cuando no existe distorsión el factor de escala está dado por:  $k_x = s_x d_x f$  y  $k_y = d_y f$

- Ortogonalidad de los ejes del plano imagen ( $\Omega_1; \Omega_2$ ):

Es el ángulo que se forma ente los dos ejes de la imagen; es decir mide la ortogonalidad de los ejes del plano imagen. El caso ideal este ángulo debe ser de 90 en situaciones reales este ángulo puede variar cuando la lente de la cámara no es paralela al plano.

- Distorsión:

El efecto de la distorsión es modelado por medio de dos componentes: Una radial ( $k_1; k_2; \dots$ ) y otra tangencial ( $p_1; p_2; \dots$ )

Parámetros Extrínsecos:

Son básicamente los parámetros externos de la cámara que representa la posición y orientación de la cámara, la posición esta representa por un vector de translación y la orientación se representa por una matriz de rotación.

### 3.4.2 Calibración de la cámara

Para calibrar la cámara del drone en la actualidad: existen diferentes técnicas para hacer el cálculo de los parámetros extrínsecos e intrínsecos. Nosotros utilizaremos el método de Zhang, el cual es un método por homografía, además el Instituto Tecnológico de California (Caltech), ha desarrollado un *toolbox* de software libre para Matlab, que permite la calibración de la cámara<sup>[25]</sup>.

Este método, a partir de la observación de un tablero de ajedrez se obtiene los parámetros ya mencionados, donde las esquinas son utilizadas como puntos de referencia. Cabe mencionar, que no es necesario conocer la posición del tablero ya que puede ser visto en diferentes posiciones, ya que este método lo que se utiliza es la distancia que existen entre las esquinas.

El modelo de la cámara utilizada se representa por la ecuación **11**.

$$S\tilde{P} = K[R][T]\tilde{X} \dots\dots\dots (11)$$

La expresión dada en (11) corresponde con la (10) del modelo *Pin Hole* donde:

$S$ , es el factor de escala arbitrario.

$\tilde{P}$ , es el punto en el plano imagen en coordenadas homogéneas.

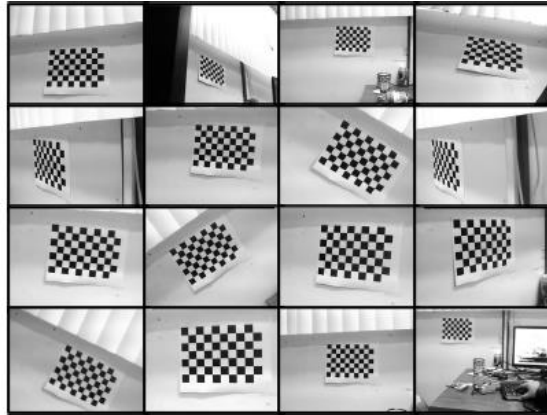
$K$ , es la matriz de parámetros intrínsecos de tamaño 3x3.

$[R][T]$ , son los parámetros extrínsecos.

$\tilde{X}$ , es un punto en el espacio 3D.

El método de Zhang, determina los parámetros de la cámara basándose en dos imágenes de la pantalla en diferentes posiciones, dicha técnica es iterativa y determina los extrínsecos

como traslación y rotación y también los intrínsecos como son (centro óptico, distancia focal, factor de escala, etc).



*Imagen 31. Tablero de ajedrez.*

### 3.5 Segmentación

La segmentación, es una de las herramientas principales en la visión artificial la cual consiste en dividir una imagen en varios conjuntos de píxeles.

La segmentación asigna una categoría a cada píxel, que contiene la imagen a analizar y se dividen en cuatro grupos.

- Segmentación por color
- Segmentación por textura
- Segmentación forma
- Segmentación semántica

De todos los grupos, el que se utilizará en este trabajo es la segmentación de color, la cual, consiste en clasificar los píxeles de una imagen únicamente por su color. Esta técnica tiene una gran relevancia en el procesamiento de imágenes y visión artificial.

Cabe mencionar, que las imágenes que utilizan están en espacio de color RGB (*Red, Green Blue*) y se pasa a HSV(*Hue, Saturation, Value*) esto debido a que se hace más fácil la segmentación de los colores, ya que podemos controlar la matriz, saturación y valor.

### 3.6 Centroide

El centroide de una figura viene dado por las coordenadas  $(X,Y)$ , de forma que el área de la figura que queda a la derecha e izquierda del punto  $X$  es la misma, al igual que el área que queda por encima y por debajo del punto  $Y$ .

Los momentos son propiedades numéricas que se obtiene de una imagen de interés. Los momentos permiten conocer información de una imagen y tiene la gran ventaja de que no solo usa las orillas de una figura, sino que tiene en cuenta todos los píxeles de la misma. Para calcular los momentos centrales se usa el centroide de la figura 33.



**Imagen 32.** Centroide de una imagen.

### 3.7 Bebop Drone Autonomy

Es una librería de la biblioteca de ROS que permite el control para los drones: *Parrot Bebop 1 y 2* el cual, está basado en el *ARDroneSDK3* oficial de *parrot*. Cabe mencionar que este controlador ha sido desarrollado por Mani Monajjemi <sup>[26]</sup>.

Este comando contiene tópicos y nodos los cuales, nos ayudan a despegar, aterrizar, mover la cámara y mandar las velocidades del dron en las direcciones x, y, z, giros alrededor del eje vertical. También cuenta con tópicos para sensor de altura, odometría, así como adquirir imágenes.

### 3.8 Python

Python, es un lenguaje de programación que cuenta con estructuras de datos eficientes de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos. La elegante sintaxis de Python, hace de éste un lenguaje ideal para el desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas.

Python puede entenderse fácilmente, si se tiene conocimientos de otros lenguajes de programación, ya sea C, C++ u otros lenguajes similares.

Python, al tener licencia de código abierto, puede ser utilizable en cualquier escenario, lo cual, hace que sea uno de los primeros lenguajes de iniciación de muchos programadores, de ahí una de las razones por la cuales Python es exitoso <sup>[27]</sup>.

## Capítulo 4. Controladores

### 4.1. Avance, Lateral y Altura

Para que el drone se mueva, se tiene que analizar las relaciones que tenemos en las coordenadas del drone, con la imagen de interés que es la imagen segmentada.

El drone se tiene que mover en el eje  $X$ , su referencia es el radio del círculo que seguirá. Por otra parte, para los valores de referencia en las coordenadas del drone  $Y$  y  $Z$  se utiliza el centro óptico de la imagen como referencia.

El drone debe seguir una línea de color rosa, para la cual se tomó como referencia el centro óptico de la imagen, para que avance de manera horizontal se tiene que variar las velocidades en el eje  $X$  del drone. Para que se mueva de manera lateral se mandan las velocidades en el eje  $Y$  del drone.

Para el control de altura, se usó como referencia la altura que nosotros deseamos que se eleve el vehículo aéreo no tripulado (VANT) y las velocidades la enviamos al eje  $Z$  del drone.



*Imagen 33. Drone Bebop Parrot 2.*

## 4.2 Control Proporcional (P).

Un control proporcional, es un tipo de sistema de control de realimentación. La salida de este controlador es proporcional a la señal de error, el cual, es la diferencia entre el valor de referencia y la variable de proceso y se multiplica por un valor de ganancia, matemáticamente se expresa con la siguiente ecuación.

$$u(t) = k_p e(t) \dots\dots\dots (12)$$

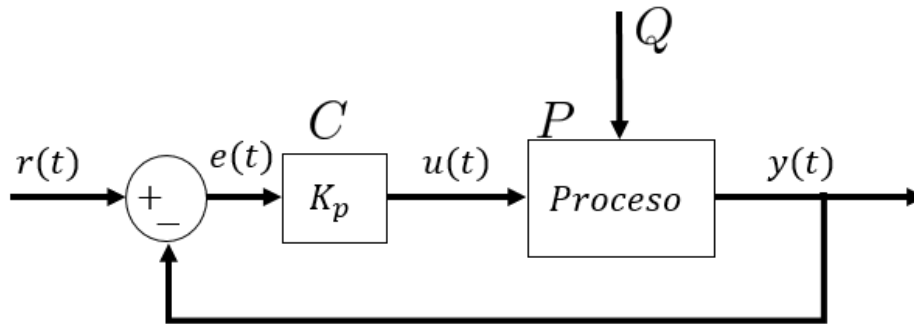
donde:

$k_p$ , es la ganancia proporcional.

$e(t) = \text{val}_{\text{ref}} - \text{val}_{\text{proceso}}$  (valor de referencia menos el valor actual), es el error del sistema

$r(t)$ , Referencia o valor deseado

$y(t)$ , Salida de proceso



*Imagen 34. Diagrama de bloques del Controlador (P).*

El controlador responde de manera proporcional a la señal de error, el error en estado estacionario se reduce si se incrementa el valor de la ganancia; sin embargo, esto haría que la respuesta fuera más oscilatoria. <sup>[11]</sup>

### 4.3 Control Proporcional Derivativo (PD).

El control proporcional derivativo, es el resultado de añadir la función derivativa a un simple controlador proporcional normalmente se añade una constante  $K_d$  el cual, representa el tiempo derivativo.

El control derivativo, responde al control de la velocidad del dron por medio del error, el cual tiene un valor de referencia y valor actual, el valor es multiplicado por el coeficiente  $K_d$  y a su vez es sumado al componente  $P$  el cual, actúa proporcionalmente en un error de control específico.

El controlador PD, es un controlador rápido y puede corregir bucles de control con doble integración. Pero al igual que el control P, no puede corregir completamente un error de control y se representa con la siguiente ecuación.

$$u(t) = k_p e(t) + k_D \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

$k_p$ , es la ganancia proporcional.

$e(t) = val_{ref} - val_{proceso}$ , (valor de referencia menos el valor actual), es el error del sistema de dirección.

$K_d$ , es la ganancia derivativa.

$\frac{de(t)}{dt} = T_d$  que es igual al  $error_{ant} - error$  (error anterior menos el error actual)

De lo anterior tenemos lo siguiente:

$$v = kp(val_{ref} - val_{act}) + kd(Er_{ant} - Er) \dots\dots\dots (14)$$

donde:

$$Er = val_{ref} - val_{act}$$

Cabe mencionar que las ganancias se determinaron de manera heurística, dado que la finalidad es que se realicen las pruebas lo más rápidamente.

En el caso del dron se han calculado las velocidades por medio de las siguientes ecuaciones.

$$v_x = kp_x(60 - c) + kd_x(Er_{antx} - Er_x) \dots\dots\dots (15)$$

$$v_y = kp_y(160 - c_x) + kd_y(Er_{anty} - Er_y) \dots\dots\dots (16)$$

$$v_z = kp_z(120 - c_y) + kd_z(Er_{antz} - Er_z) \dots\dots\dots (17)$$

Donde:

$r$ .- es el radio del círculo

$c_x$ .- es el centroide e la dirección x del círculo

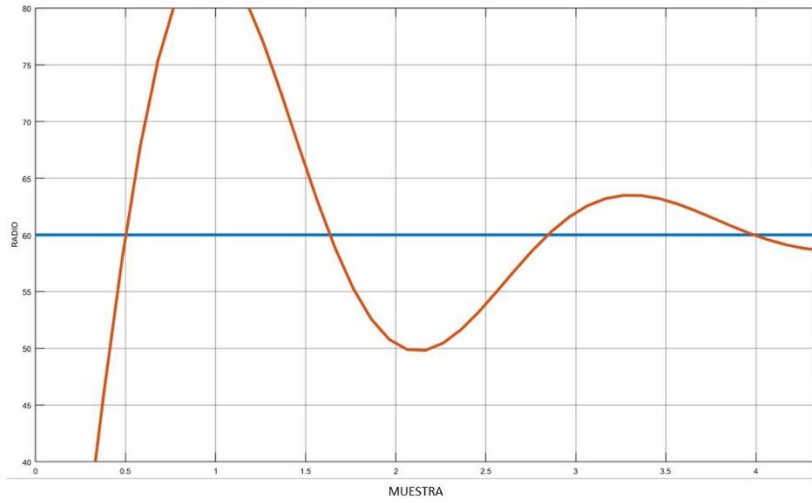
$c_y$ .- es el centroide en la dirección y del círculo

$Er_x, Er_y, Er_z$ .- son los errores que se determinan como la diferencia entre el valor de referencia y el valor actual

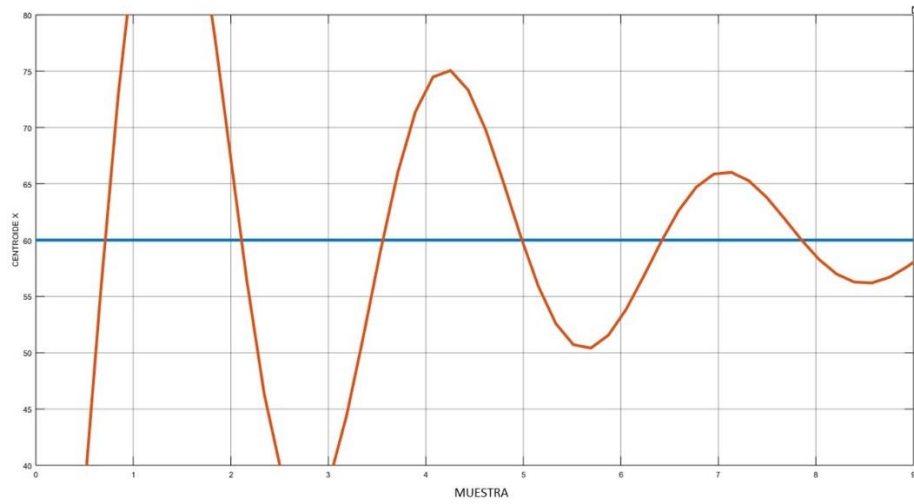
$Er_{antx}, Er_{anty}, Er_{antz}$ .- son los errores en el instante anterior

$k_{px}, k_{py}, k_{pz}$ .- son las ganancias proporcionales de los controladores las cuales se sintonizaron de forma heurística.

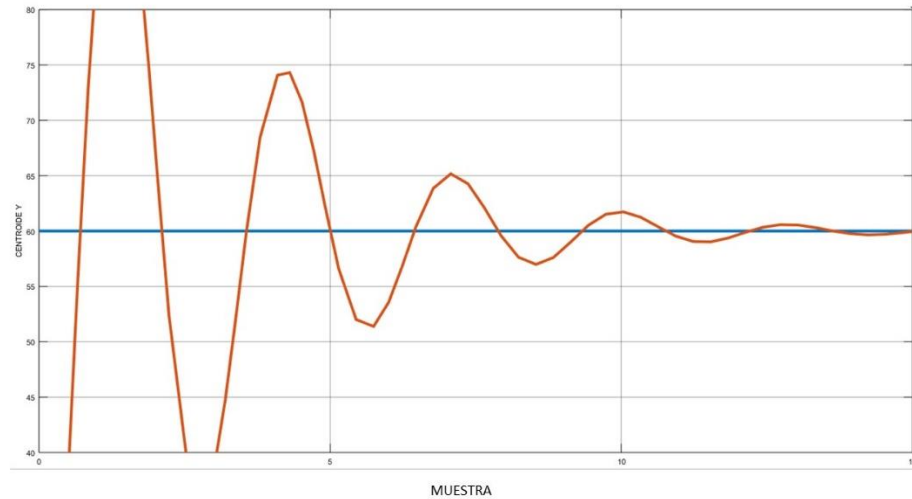
$k_{dx}, k_{dy}, k_{dz}$ .- son las ganancias derivativas de los controladores, las cuales se sintonizaron de forma heurística.



**Imagen 35** Respuesta del controlador en el eje x del drone



**Imagen 36.** Respuesta del controlador en el eje y del drone



**Imagen 37.** Respuesta del controlador en el eje z del drone

En las imágenes anteriores, se presenta la respuesta de los controladores para el seguimiento de un objeto, en donde la referencia del avance y retroceso es el radio del círculo, con lo cual se estima distancia a la que se debe de encontrar del círculo, en el caso de esta gráfica se observa que tiene grandes oscilaciones debido a que para romper la inercia necesita de una velocidad que no le da el suficiente tiempo de compensar, sin pasarse del tamaño de la referencia, esto también tomando en cuenta que las pruebas se hacen al aire libre lo cual mueve al drone y el controlador lo intenta compensar.

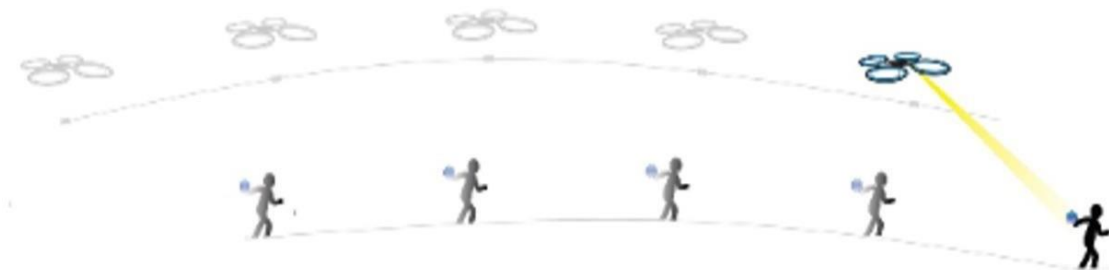
De forma similar en las imágenes, se muestra el controlador en el eje y del drone que es el lateral, y esta ocasión es en función de la coordenada en x en la imagen del centroíde del objeto a seleccionar, en cuyo caso también se observan varias oscilaciones debido a las ganancias y al aire que le afecta en el funcionamiento.

En la imagen se presenta el controlador en el eje z, en el cual se observa que tiene también oscilaciones sin embargo se llega a estabilizar, en este eje es el control de altura del drone, el cual está en función de la coordenada y del centroíde del objeto, en este caso si se estabiliza debido a que a pequeños incrementos de velocidad ya no afectan al empuje del drone.

## Capítulo 5. Pruebas de Torneo Mexicano de Robótica (TMR)

### 5.1 Prueba 1. Seguimiento de objeto en movimiento.

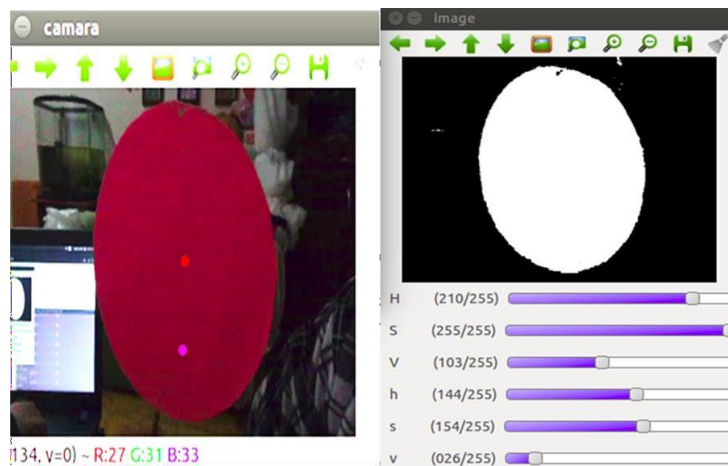
La prueba consiste, en que el drone despegue y por medio de la cámara se observará un objeto de color el cual, lo tendrá una persona en sus manos, el objeto se moverá y el drone lo seguirá, el objeto tendrá la libertad de desplazarse de manera horizontal, lateral, arriba y abajo. Para hacer esta prueba se realizó lo siguiente:



*Imagen 38. Simulación de la Prueba 1.*

Primero se da la instrucción que el drone despegue por medio de un comando que se adquiere de fábrica que se llama *bebop/takeoff*.

Después de que se conectó a la cámara por medio de un tópic, se visualiza el objeto que vamos a seguir, en nuestro caso es un círculo de color rosa y por medio de *track bars* segmentamos el objeto que seguirá el drone. Segmentar, es obtener la imagen de interés en nuestro caso es el círculo de color rosa. Posteriormente, nos percatamos que a la hora del despegue, el drone no tiene estabilidad, esto se debe al aire que genera al despegar produce perturbación en él, por ello, indicamos que se espere un determinado tiempo para ejecutar los movimientos que requiere para seguir el objeto.



*Imagen 39. Segmentación del círculo.*

En la **imagen 39**, se puede observar que el lado izquierdo es la imagen original la cual, es el círculo que va a seguir el drone y la visualización de otros objetos; en la imagen de la derecha se observa la segmentación, es decir, el círculo blanco es el objeto de importancia que debe seguir el drone.

Ya realizada la segmentación del objeto, se agrega el controlador, en este caso se utilizó un Proporcional Derivativo ya que, a la hora de realizar las pruebas se obtuvo el funcionamiento adecuado para la prueba y se toma en cuenta que se tiene que relacionar las coordenadas del drone con las coordenadas de imagen, de no hacerlo, el drone no se moverá de manera correcta.



*Imagen 40. Relación de las coordenadas en la Prueba 1.*

De la **Imagen 40**, se observa las relaciones que hay en las coordenadas del dron y de la imagen. Para qué quede de manera más clara, se diseñó la siguiente tabla donde se indican las relaciones entre ellas.

<b>RELACIÓN DE COORDENADAS DE EL DRONE CON LA IMAGEN SEGMENTADA</b>	
<b>Dron</b>	<b>Imagen</b>
Z	Y
Y	X
X	Z

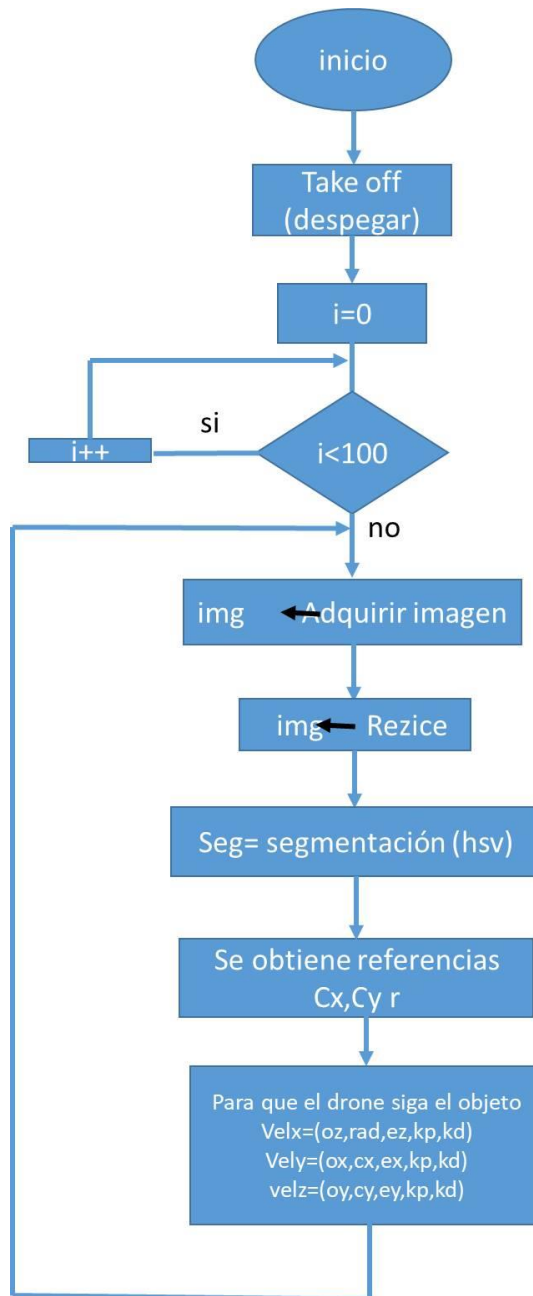
Ya teniendo claro lo anterior, se realizó el controlador PD (Controlador Proporcional Derivativo) para cada eje del dron. El valor de referencia para el eje  $x$  del dron, se obtuvo por prueba y error, ya que nosotros proponemos un valor del radio del círculo que se modifica dependiendo de que tanto se quiere que se acerque el dron al objeto. Por seguridad, no debe de estar tan cerca y como valor actual es el radio que tiene el círculo segmentado este valor va a ir cambiando al momento que se mueva el círculo.

Para los valores de referencia en las coordenadas del dron  $y$  y  $z$ , se utiliza el centro óptico de la imagen (160x120) pixeles esto se obtiene nuevamente a prueba y error sabiendo que el centro óptico de la computadora es de 320x240 pixeles.

Para el cálculo de las velocidades, se realizaron por medio del controlador ya mencionado y se representa con en la ecuación (14). Las velocidades calculadas para el drone, se envían por medio del tópico *bebop/cmd\_vel* (comando en el microprocesador del drone que activa la variación de velocidad) y por último para finalizar el proceso se manda a aterrizar el drone el cual se hace por medio del tópico *bebop/land* (comando del microprocesador del drone que activa el aterrizaje automatico).

En el caso de la velocidad de  $x$  es decir el avance o retroceso se toma como referencia el radio del círculo, con respecto a un tamaño proyectado fijo del mismo.

Para los movimientos laterales izquierda y derecha la velocidad en  $y$ , así como los movimientos verticales arriba y abajo, la velocidad en  $z$ , se considera como referencia el centro óptico de la imagen y como valor actual la posición del centroide.

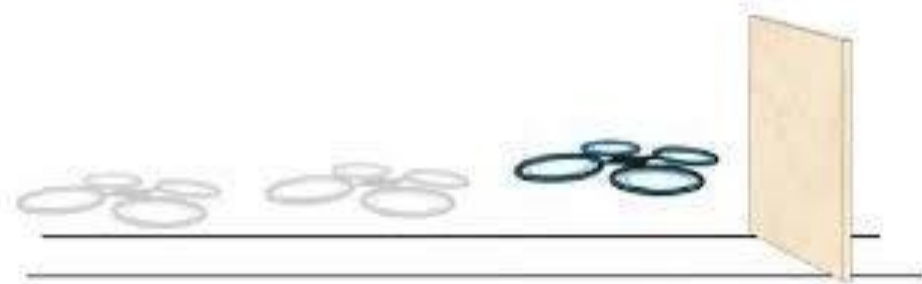


En el diagrama de flujo, se observa la instrucción del despegue, después se hace un contador con la finalidad de que se establezca el drone, si el contador es igual a cien se adquiere la imagen, se segmenta, se obtienen las referencias, se hace el control en cada eje del drone y manda las velocidades.

En el video mostrado en el link <https://www.youtube.com/watch?v=YBOOGgnaVkg> se puede apreciar como el drone sigue efectivamente a un objeto en movimiento, en esta ocasión es un círculo de color rosa movido por una persona.

## 5.2 Prueba 2. Vuelo en línea recta y detección de obstáculo.

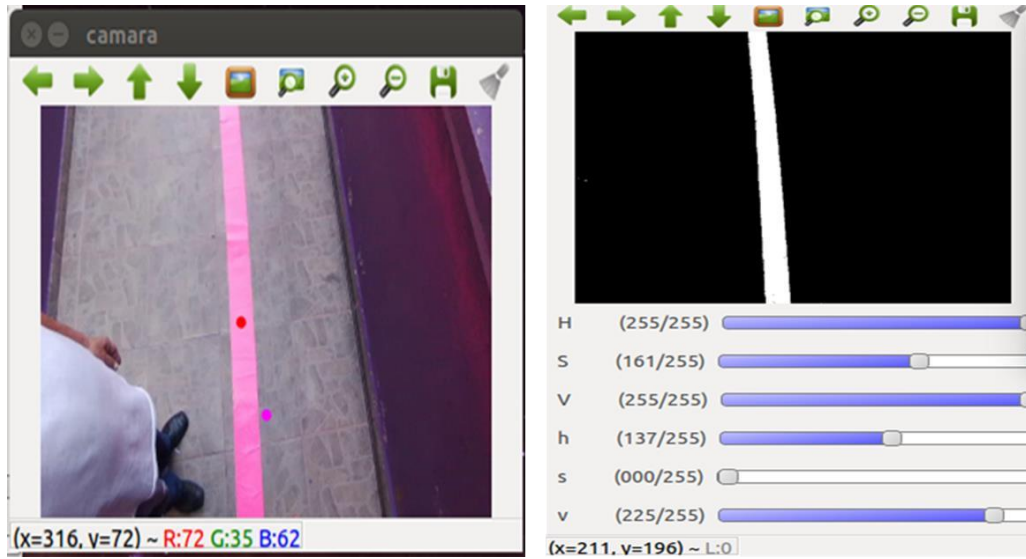
En esta prueba, el drone va a despegar y en este caso observará una pista de un color seleccionado, esta se segmentará y posteriormente el vehículo aéreo no tripulado la seguirá hasta que detecte un obstáculo. Al hacerlo aterrizará, para hacer esta prueba se realizó lo siguiente.



**Imagen 41.** Simulación de la prueba 2.

Primero se da la instrucción al drone que despegue por medio de un tópico que se adquiere de fábrica, el cual, es *bebop/takeoff*. Después de despegar, se observa que el drone no tiene la presenta amortiguación, esto sucede por el aire que produce las hélices, para ello esperamos un determinado tiempo para que se estabilice y posteriormente siga la línea segmentada.

Antes de despegar el drone, se toma en cuenta la segmentación de la pista a seguir. Para ello se tiene que realizar la conexión a la cámara por medio de un tópico, posteriormente por medio de otro tópico se da la instrucción de girar la cámara a  $-70^\circ$ , esto con la finalidad de solo se observe la pista que va a seguir. Se realiza la segmentación de la pista por medio *track bars*.



*Imagen 42. Segmentación de la pista a seguir.*

En la *imagen 42*, se observa que al lado izquierdo se tiene la fotografía original, donde no solo se visualiza la pista que seguirá el dron, sino que hay otros objetos, en la derecha se tiene la segmentación de la pista que recorrerá, el área blanca es la zona de interés que va a tomar en cuenta el dron.

Una vez realizada la segmentación del objeto, se agrega el controlador, en este caso se utilizó un Proporcional Derivativo ya que, a la hora de realizar las pruebas se obtuvo un buen funcionamiento para la prueba y se toma en cuenta que se tiene que relacionar las coordenadas del dron con las coordenadas de imagen, de no hacerlo, el dron no se moverá de manera correcta.



*Imagen 43. Relación de las coordenadas del dron y de la imagen.*

En la **imagen 43**, se puede observar las relaciones que hay en las coordenadas del dron y de la imagen para que quede de manera más clara, se diseñó la siguiente tabla donde se indican las relaciones de coordenadas entre el dron y la imagen.

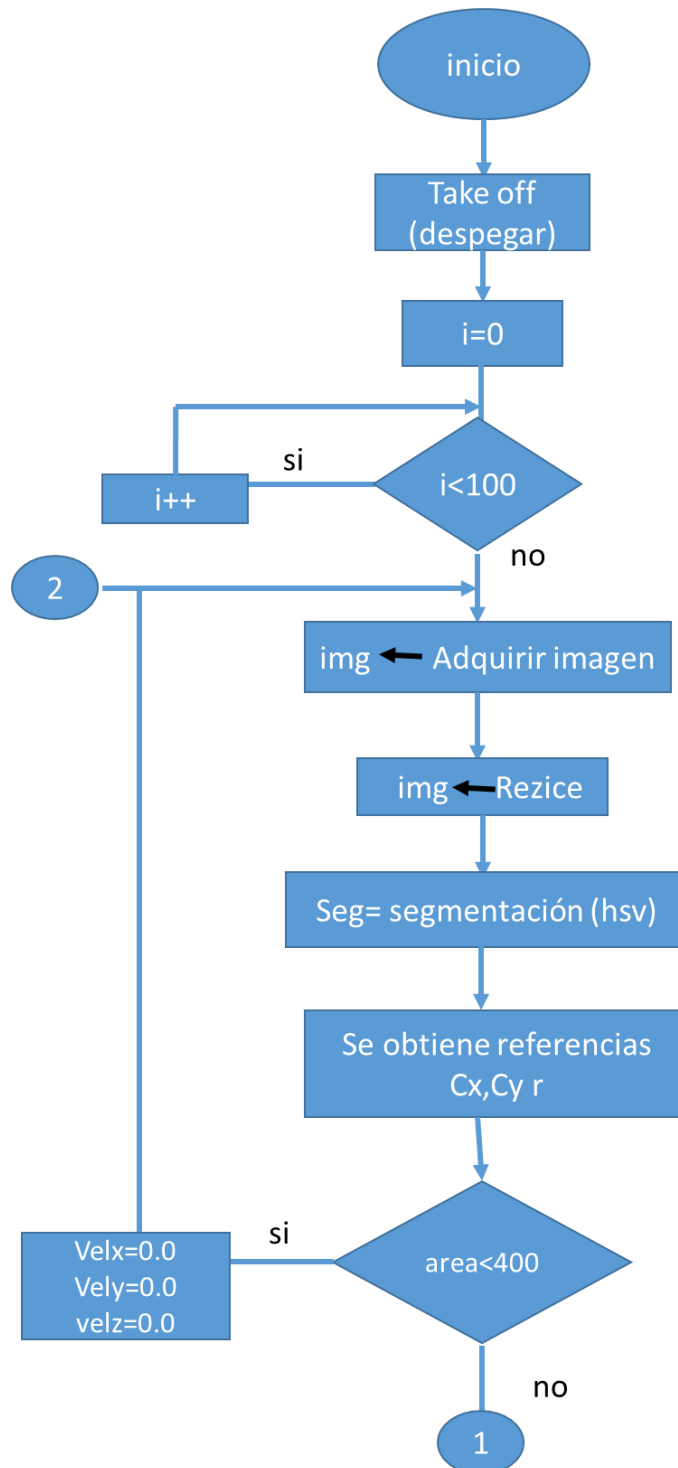
RELACIÓN DE COORDENADAS	
Drone	Imagen
Z	Z
Y	X
X	Y

Ya teniendo claro lo anterior, se sintonizo el controlador PD (Controlador Proporcional Derivativo), para los ejes del dron  $x$ ,  $y$ . El valor de referencia que se utiliza es el centro óptico de la imagen que, en este caso, es 320x240 pixeles y como valor actual es el centroíde de la segmentación.

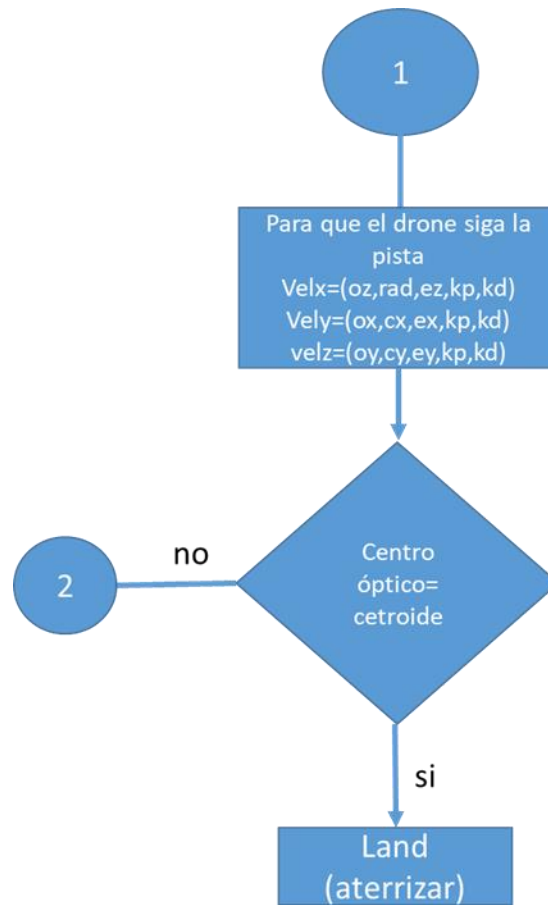
Para que el dron avance de manera horizontal, se varían las velocidades en el eje  $X$  del dron y para el movimiento lateral del dron se varían las velocidades en el eje  $Y$ . En esta prueba se desea que el dron valla de forma horizontal ya que tiene que seguir la pista por eso se agrega un control en  $x$ , pero a su vez se desea que el dron no se salga de la pista por lo tanto la velocidad en  $y$  se manda a cero.

Como en la prueba anterior, los cálculos de las velocidades se realizaron por medio del controlador ya mencionado que se representa con en la ecuación (14).

Las velocidades del dron, se mandan por medio del tópic *bebop/cmd\_vel* y por último si se acaba el camino de la pista o se detecta un objeto se aterriza de manera automática por medio del tópic *bebop/land*. Para realizar la prueba ya mencionada se realizó por medio del siguiente diagrama de flujo.



En el diagrama de flujo, se observa la instrucción del despegue, donde se hace un contador con la finalidad de que se establezca el drone, si el contador es igual a 100 se adquiere la imagen, se segmenta, se obtienen las referencias, posteriormente si el área de la pista o línea es menor 400, se mandan las velocidades a cero con la finalidad de que este estable, el drone.

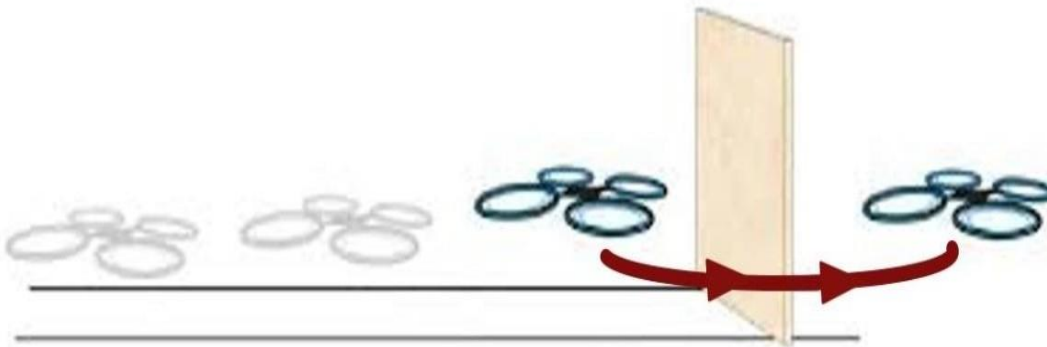


Si el área de la pista o línea es mayor o igual a 400, el drone tendrá velocidades diferentes de cero y hará el recorrido de la pista, después se analiza si el centro óptico es igual al centroíde de la imagen segmentada. Si es igual, se aterriza automáticamente el drone indicando que hizo todo el recorrido de la pista o detectó un obstáculo; para no estrellarse, aterriza en dado caso de que no sean iguales, se regresa a adquirir la imagen hasta que el centro óptico sea igual al centroíde.

En el video mostrado en el link <https://youtu.be/LFnxyHPgkGg> se puede apreciar como el drone sigue efectivamente una línea recta de color rosa y cuando este observa un obstáculo aterriza de manera inmediata para no estrellarse.

### 5.3 Prueba 3. Vuelo en línea recta, evasión de obstáculo y continuar con el rumbo

El drone despegua y observa una pista de un color predeterminado, la cual es segmentada y posteriormente la seguirá, cuando el drone detecta el obstáculo, se dirige hacia un lado determinado ya sea izquierda o derecha, esto depende de la elección del programador. Cabe mencionar que dependiendo lo largo del muro será la distancia que recorre. Una vez concluido el movimiento lateral, se frena por un momento y empieza realizar su desplazamiento hacia adelante hasta traspasar el muro aterriza de manera automática.



*Imagen 44. Simulación de la Prueba 3.*

Antes del despegue, se conectó la cámara como en las pruebas anteriores y por medio de un tópic, se da la instrucción de girar la cámara a  $-70^\circ$ , con la finalidad de que solo se visualice la pista y por medio de *track bars*, segmentamos el color de la pista que seguirá el vehículo aéreo no tripulado. Segmentar es obtener la imagen de interés en este caso sería la pista que sigue el drone.

Posteriormente se da la instrucción para que el drone despegue por medio de un tópic que se obtiene de fábrica *bebop/takeoff*.

Al momento del despegue, nos percatamos que el drone no tiene estabilidad, esto se debe al aire que se genera a la hora de elevarse, por ello, se espera por un determinado tiempo para que se estabilice y así ejecutar los movimientos que se requiera para seguir la línea.

De la *imagen 44*, se observa que al lado izquierdo de la misma es la original donde, no solo se visualiza la pista que seguirá el drone, sino que hay otros objetos, en la imagen de la derecha se tiene la segmentación de la pista que recorrerá, el área blanca es la pista y es la zona de interés que va a tomar en cuenta el drone.

Posteriormente, retomando de la imagen **44**, las relaciones de las coordenadas del drone y de la imagen se obtiene la siguiente tabla, que indica la compaginación de coordenadas.

<b>RELACIÓN DE COORDENADAS</b>	
<b>Drone</b>	<b>Imagen</b>
Z	Z
Y	X
X	Y

La interpretación de la tabla anterior es importante ya que, el drone no se moverá de manera correcta. Ya teniendo claro lo anterior, se sintonizo el Controlador Proporcional Derivativo (PD), para el caso de seguir la línea, se utiliza los ejes del drone  $x$ , y el el valor de referencia que se utiliza es el centro óptico de la imagen que, en este caso, es 320x240 pixeles y como valor actual es el centroíde de la segmentación.

Cuando el drone llega a detectar un obstáculo, al seguir la línea, se frena de manera inmediata para iniciar el movimiento lateral, para ello, se intentó usar el sensor de odometría que tiene el Bebop Parrot pero se percató que a la hora de usarlo se tiene un problema, el cual consiste en que este sensor toma en cuenta la textura del piso y no en todos los lugares de prueba se tenía la misma textura en el piso, cabe mencionar que para el caso donde el drone termina el movimiento lateral y sigue hacia adelante se tenía el mismo problema por lo tanto, se tuvo que

pensar otra forma en hacerlo, donde la solución fue realizar una caracterización entre un temporizador y la distancia que el drone desplazaba en determinado tiempo, a continuación se describe detalladamente ése proceso.

Se hizo un temporizador de 3, 4, 5 y 6 segundos y se midió con ayuda de un flexómetro la distancia recorrida por el drone de manera horizontal y también se obtuvo el mismo comportamiento de manera lateral. Cada temporizador se ejecutó diez veces y en cada una de ellas se midió la distancia recorrida, esos datos se agregaron en una tabla y como se muestra en la **imagen 45** y posteriormente se realizó un promedio con esos valores con la finalidad de que se caracterice la distancia que avanza el drone con el temporizador.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	temporizador			temporizador			temporizador		
2	3seg			4 seg			5 seg		
3	1	56		1	122		1	195	
4	2	58		2	128		2	154	
5	3	56		3	111		3	215	
6	4	66		4	115		4	203	
7	5	58		5	122		5	227	
8	6	55		6	112		6	267	
9	7	50		7	97		7	193	
10	8	53		8	124		8	266	
11	9	55		9	122		9	267	
12	10	42		10	105		10	240	
13	promedio	54.9		promedio	115.8		promedio	222.7	
14									
15	temporizador								
16	6seg								
17	1	409							
18	2	295							
19	3	431							
20	4	310							
21	5	278							
22	6	422							
23	7	374							
24	8	309							
25	9	291							
26	10	296							
27	promedio	341.5							
28									

**Imagen 45.** Tabla de datos obtenidos agregados en una tabla de Excel.

De la **imagen 45**, se tienen dos columnas, en donde se indica el número de prueba y el lado derecho se anota la distancia que recorre el drone y por último se tiene el promedio de las

mediciones. Ya hecho lo anterior se tiene la caracterización (consiste en obtener una ecuación de su comportamiento, referente a los datos obtenidos) que tal y como se muestra en la imagen 47.

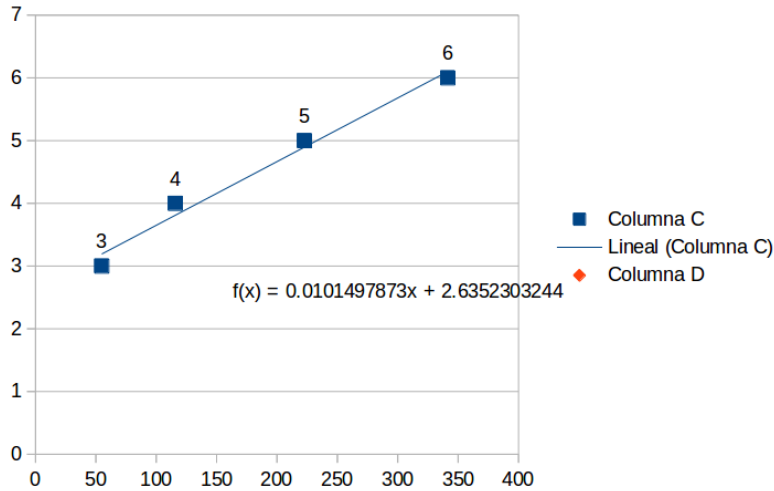


Imagen 46. Resultados de la caracterización.

Se graficó la distancia en eje  $x$ , por otra parte, en el eje  $y$  se graficó el tiempo posteriormente, se tiene la ecuación, la cual nos ayuda a determinar lo siguiente.

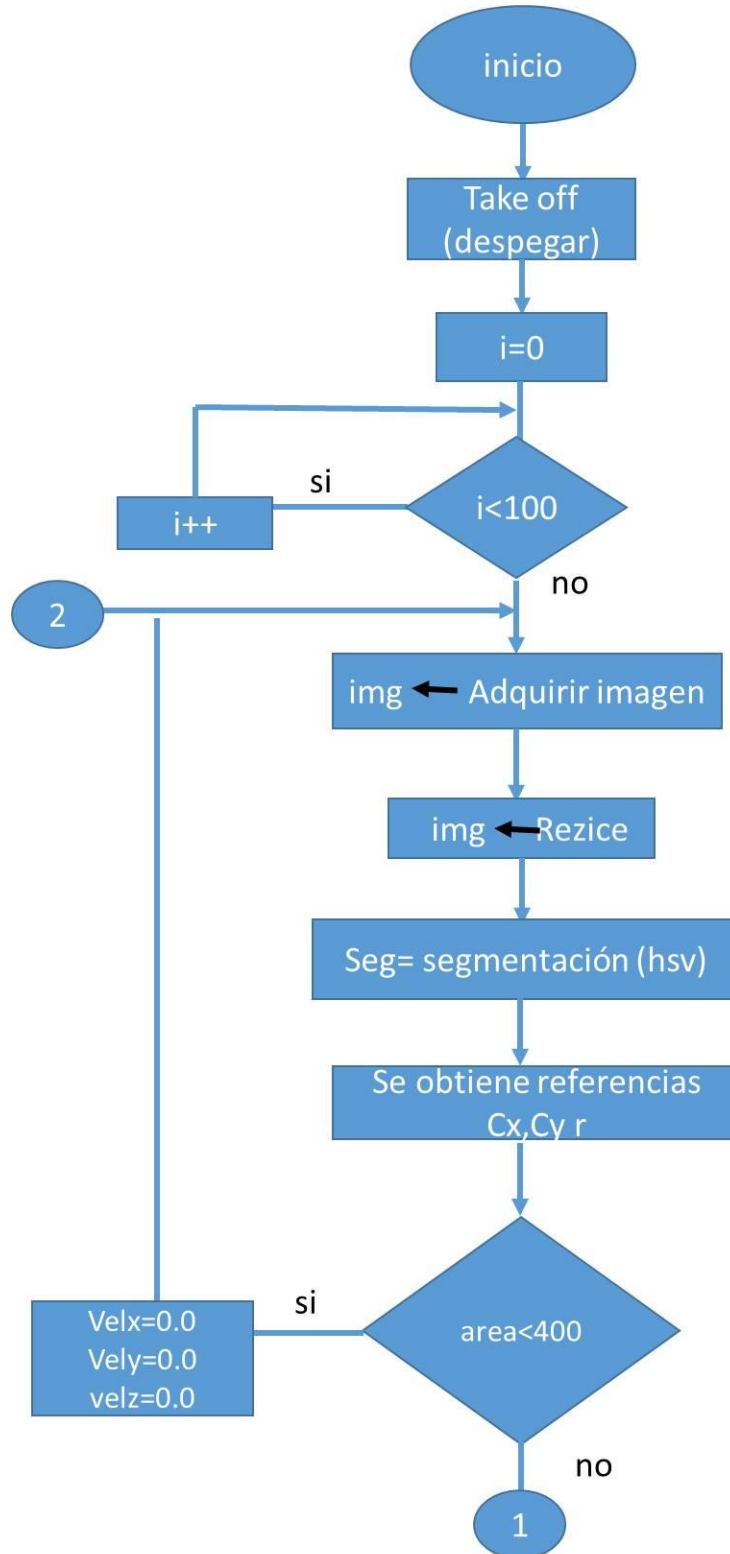
Si inserta un valor de  $x$ , el cual es la distancia que nosotros deseamos recorrer con el vehículo aéreo no tripulado, el resultado de la ecuación, nos da el tiempo que se necesita para recorrer esa distancia.

Para el cálculo de las velocidades, se realizaron por medio del controlador proporcional derivativo y se representa por la ecuación (14).

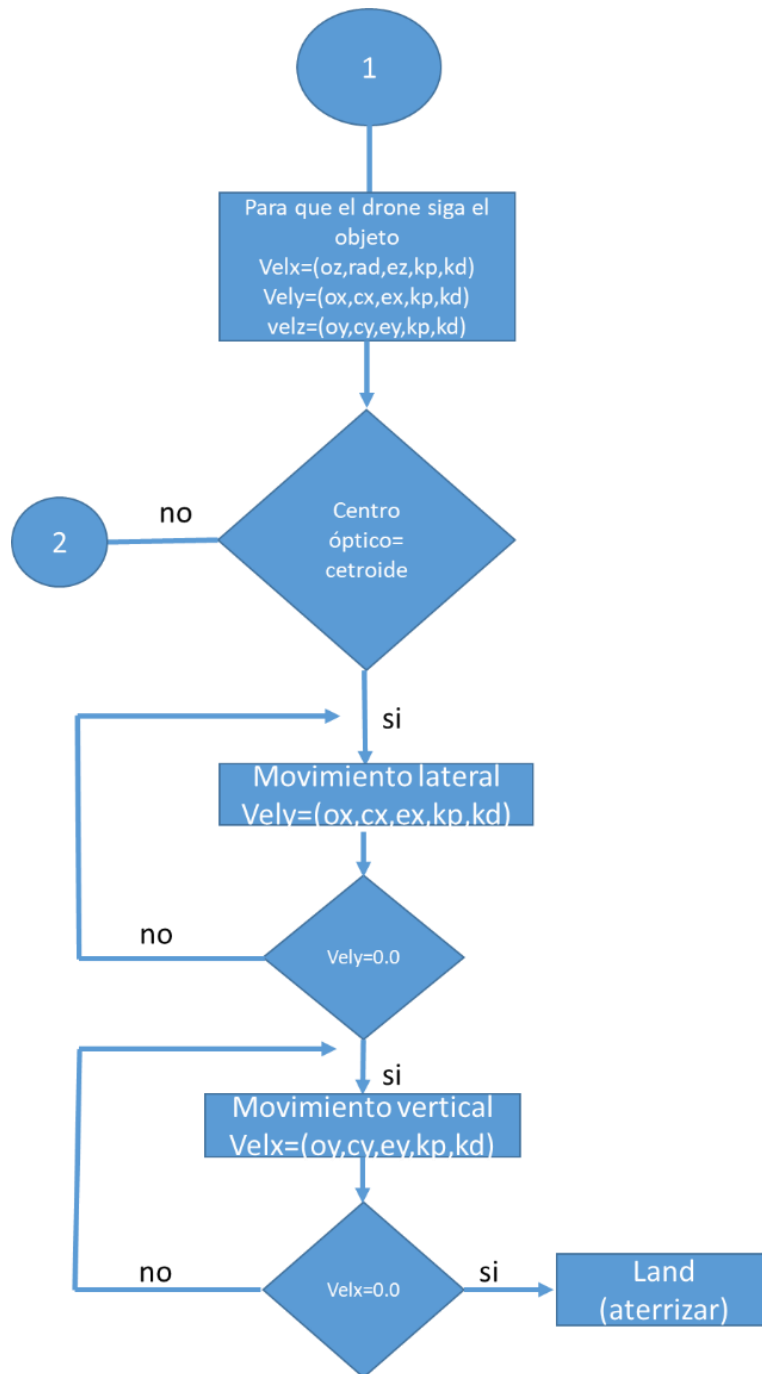
Cabe mencionar, que el valor de referencia que se utiliza, es el tiempo que se necesita para hacer el recorrido que nosotros deseamos, el valor actual es el tiempo que está transcurriendo mientras se hace el recorrido.

Las velocidades del dron, se mandan por medio del tópico *bebop/cmd\_vel* y por último si evade el obstáculo, se aterriza de manera automática el vehículo aéreo no tripulado por medio del tópico *bebop/land*.

Para realizar la prueba ya mencionada, se utilizó el siguiente diagrama de flujo.



En el diagrama de flujo, se observa la instrucción del despegue, después se hace un contador para que se estabilice el dron, si el contador es igual a 100 se adquiere la imagen, segmentada y se obtienen las referencias. Posteriormente si el área de la pista o línea es menor 400 se mandan las velocidades a cero con la finalidad de que esté estable el dron.



Si el área de la pista es mayor a 400, el drone tendrá velocidades diferentes de cero y hará el recorrido de la pista, a continuación, se analiza si el centro óptico es igual al centroíde de la imagen segmentada, si no son iguales, nos regresamos a adquirir la imagen hasta que el centro óptico sea igual al centroíde.

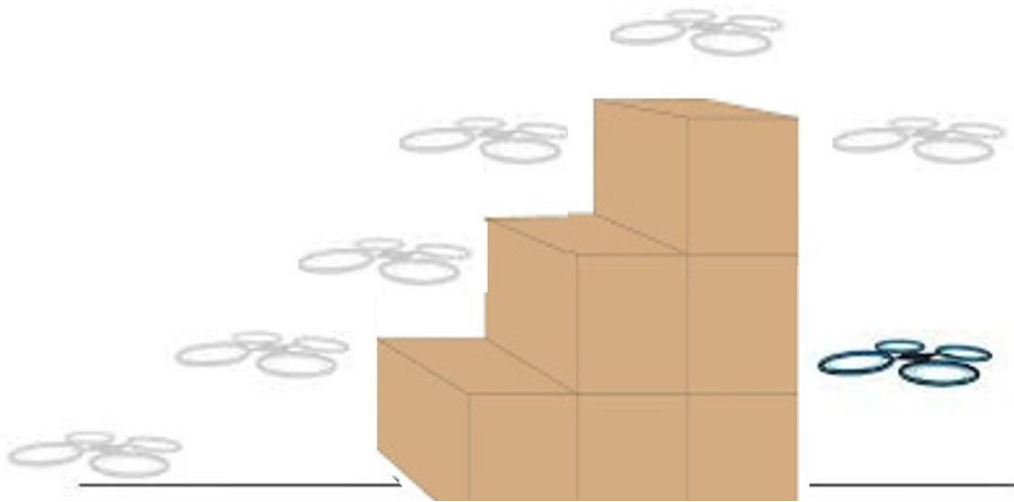
Pero si el centro óptico es igual al centroíde, se realiza el movimiento lateral y se analiza la velocidad en el eje  $y$  del drone, si es igual a cero, si no es igual a cero sigue haciendo el movimiento lateral hasta que la velocidad sea cero, si la velocidad en el eje  $y$  es igual a cero se inicia el movimiento horizontal.

Después, se analiza la velocidad en el eje  $x$  del drone, si es igual a cero, se aterriza indicando que la prueba a concluido, pero si no es igual seguirá haciendo movimientos horizontales hasta que sea igual a cero.

En el video mostrado en el link [https://youtu.be/iVc3GrW\\_gJM](https://youtu.be/iVc3GrW_gJM) se puede apreciar como el drone sigue efectivamente una línea recta y cuando este observa un objeto se frena, evade el obstáculo y continua su recorrido al concluir aterriza.

## 5.4 Prueba 4. Vuelo sobre escalones.

El dron debe de seguir nuevamente una pista, al terminar el recorrido, el vehículo aéreo no tripulado debe aproximarse a una plataforma en forma de escalones, por lo tanto, se deberá incrementar la altura de su vuelo esto con la finalidad de evitar chocar con los escalones. Una vez alcanzada la altura del escalón, el dron deberá de continuar su vuelo de manera horizontal, una vez subido los tres escalones tiene que aterrizar de manera automática. Para hacer esta prueba se tuvieron que realizar los siguientes pasos.



*Imagen 47. Simulación de la Prueba 4.*

Antes de que despegue el vehículo aéreo no tripulado, se tiene que segmentar la pista que se recorrerá, para ello, primero se tiene que conectar a los datos de la cámara del dron para que posteriormente, por medio de un tópicos se gira la cámara a  $-70^\circ$ .

Lo anterior se realizó con la finalidad de que solo se visualice la pista que seguirá y por medio de *track bars* se segmenta el color de la pista.

Retomando a la *imagen 42*, se recuerda que al lado izquierdo de la imagen es la original, no solo se visualiza la pista que seguirá el dron, sino que también algunos objetos, posteriormente del lado derecho se tiene la segmentación de la pista que recorrerá. El área blanca es la pista y es la zona de interés que va a tomar en cuenta el dron.

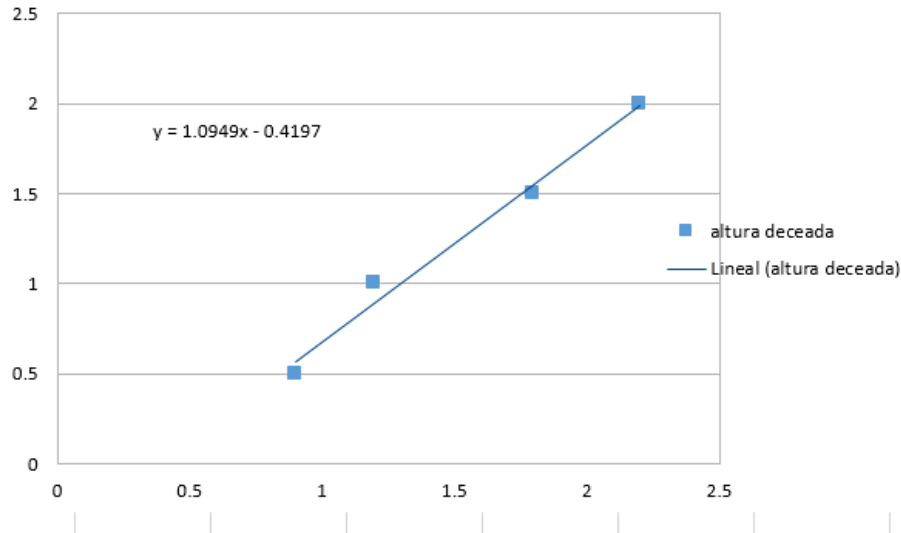
Como observamos en las pruebas dos y tres, se analiza la *imagen 43*, con la finalidad de que se tengan las relaciones entre las coordenadas del dron y de la imagen. De manera más clara, se diseñó la siguiente tabla donde se indican las relaciones ya mencionadas.

<b>RELACIÓN DE COORDENADAS</b>	
<b>Dron</b>	<b>Imagen</b>
Z	Z
Y	X
X	Y

Para el seguimiento de la pista, se utilizó un controlador Proporcional Derivativo (PD), donde los ejes del dron  $x$  y  $y$  se toman en cuenta los valores de referencia del centro óptico de la imagen, en este caso son 320x240 pixeles y como valor actual es el centroíde de la imagen segmentada.

Cuando el dron llega al final de la línea se frena y empieza a ascender. Esto se hace con ayuda del sensor de altitud, al usarlo nos percatamos que no era de manera constante la posición de altura con la que subía el dron, para ello, se tuvo que caracterizar este sensor, lo cual fue muy complicado ya que se manejaron alturas de dos metros. Cabe mencionar que las mediciones se tomaron con ayuda de un flexómetro.

Para la caracterización se propone la altura para que se eleve el dron. Los valores propuestos fueron los siguientes: 0.5m, 1m, 1.5m y 2m. Posteriormente, se anotó la altura real que tenía el dron en cada uno de los casos, ya concluido lo anterior los datos obtenidos se agregan en una tabla.



**Imagen 48.** Resultados obtenidos de la caracterización.

En la *imagen 48*, podemos observar que se tiene dos columnas las cuales indican la medición que arrojó el dron y la altura que deseamos.

Para graficar y obtener la caracterización, en el eje *X*, se insertaron los valores de altura del dron y en el eje *Y* se insertaron los valores de altura que deseamos.

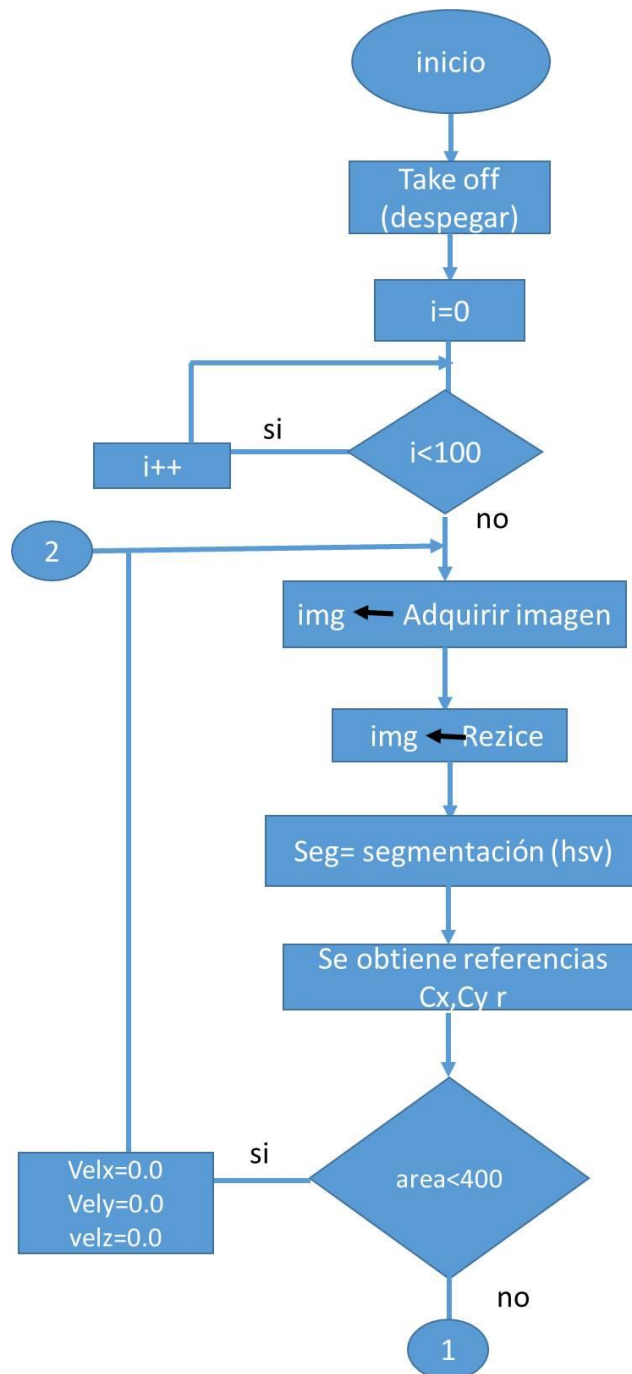
Por lo tanto, si en la ecuación que se adquirió en la imagen **49**, agregamos un valor de *x*, es decir, la altura deseada, el resultado que nos da es la altura que en realidad subirá el dron. Con esta ecuación se obtuvieron buenos resultados tanto para las alturas propuestas anteriormente como a la hora de incrementar la altura de su vuelo.

Respecto al controlador PD, se usa como valor de referencia la altura que se desea y como valor actual se usa la altura que tiene el dron al momento de incrementar su vuelo.

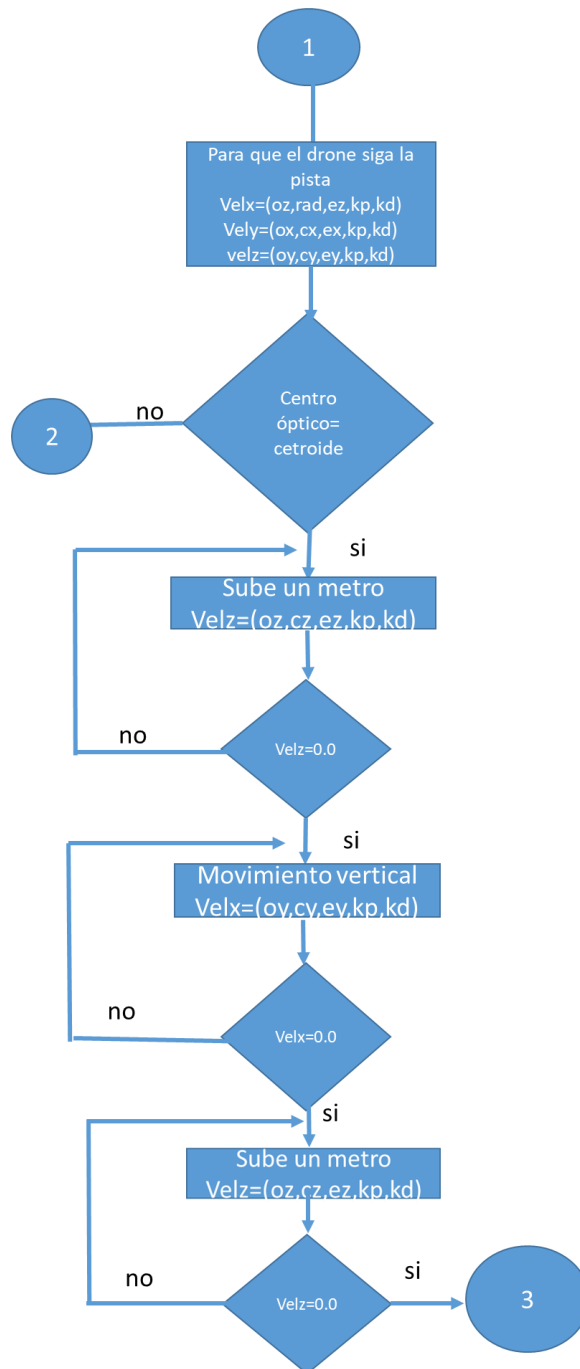
Por otra parte, para el movimiento horizontal, se usa la ecuación obtenida de la *imagen 47*, donde se retoma el valor de *x* el cual, es la distancia que nosotros deseamos recorrer con el vehículo aéreo no tripulado. El resultado de la ecuación, nos da el tiempo que se necesita para recorrer esa distancia. Para este caso, en el controlador PD, el valor de referencia que se utiliza es el tiempo que se necesita para hacer el recorrido que nosotros deseamos, el valor actual, es el lapso que está transcurriendo mientras se hace el recorrido.

Para el cálculo de las velocidades, se realizaron por medio del controlador proporcional derivativo representado en la ecuación 14.

Las velocidades del drone, se mandan por medio del tópic *bebop/cmd\_vel* y por último si el drone realiza los tres escalones se aterriza por medio del tópic *bebop/land*. Para realizar la prueba ya mencionada se utilizó el siguiente diagrama de flujo.

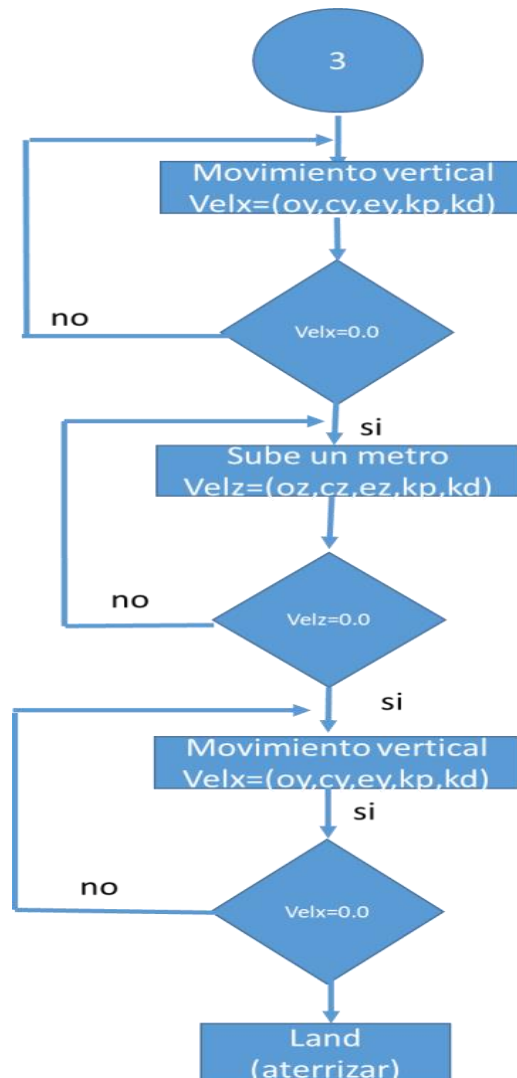


En el diagrama de flujo, se observa la instrucción del despegue, después se hace un contador para que se establezca el drone, si el contador es igual a 100 se adquiere la imagen segmentada y se obtienen las referencias, posteriormente si el área de la pista o línea es menor 400, se mandan las velocidades a cero con la finalidad de que se encuentre estable el drone.



Si el área de la pista o línea es mayor a 400, el drone tendrá velocidades diferentes de cero y hará el recorrido de la pista, después se analiza si el centro óptico es igual al centroíde de la imagen segmentada, si no es igual, nos regresamos a adquirir la imagen hasta que el centro óptico sea igual al centroíde.

Pero si el centro óptico es igual al centroíde, el drone empieza a subir y se analiza si la velocidad en el eje **Z** es igual a cero, si es igual, se empieza con el movimiento horizontal si no lo es, se sigue elevando. Posteriormente, se analiza la velocidad en el eje **X** del drone, si no es igual a cero sigue haciendo movimiento horizontal hasta que la velocidad llegué a cero; en este caso el drone pasa nuevamente a la etapa de elevación. El drone empieza a subir y se analiza si la velocidad en el eje **Z** es igual a cero, en el caso donde no es igual sigue subiendo, pero sí lo es, empieza nuevamente con su movimiento horizontal.

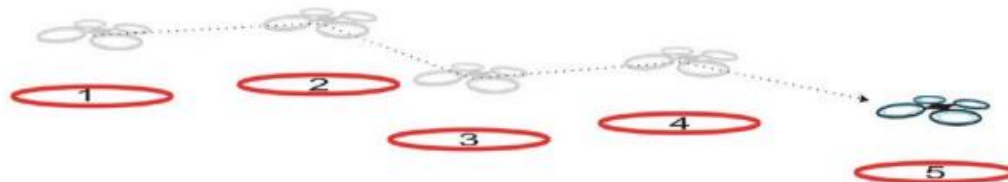


Todo ese proceso de elevación y movimiento horizontal se repite 3 veces ya que, con ese proceso el drone realiza la simulación de ir subiendo escalones. Cuando el drone llega a su tercer proceso, es decir, cuando sube el tercer escalón, se analiza la velocidad en el eje  $X$ , si es igual a cero se aterriza indicando que la prueba a concluido. Se manda el proceso de aterrizado al tópico del drone *bebop/land*.

En el video expuesto en el link <https://youtu.be/vy1n7rguNX4> se observa como el drone despegue y sigue una línea recta de color rosa al terminar esta se aprecia como el drone sube un escalón una vez alcanzada la altura deseada el drone deberá de continuar su vuelo de manera horizontal esto se repite hasta se llega al último escalón donde el drone aterrizará.

### 5.5 Prueba 5. Vuelo siguiendo puntos de referencia.

Esta prueba consiste en que el drone va despegar y volará sobre varios puntos de referencia, los cuales, solo se colocará arriba de algunos (no en todos los círculos), estarán marcados y numerados en el suelo en forma de círculos de color rosa. Para que se haga de manera correcta el recorrido, se le anexarán las coordenadas de dichos puntos y utilizando la ecuación de distancia entre puntos, para así saber que distancia tiene que recorrer el drone tanto de manera lateral u horizontal.



*Imagen 49. Simulación de la Prueba 5.*

Primero se conecta a la cámara de drone por medio un tópico, posteriormente verificamos si la imagen que tenemos es correcta, ya que, en algunas ocasiones, el drone tiene algún error de conexión y se congela la imagen.

Si la imagen es correcta la cámara girara un ángulo de  $-90^\circ$  con ayuda de un tópicos diferente al anterior, esto se realizó con la finalidad de que solo se visualice los círculos donde se tiene que colocar.

Posteriormente se indica la trayectoria que va a realizar, para ello, se dan las coordenadas tanto en  $x$  y  $y$  para que el dron sepa que distancia tiene que recorrer de manera tanto horizontal y lateral. Se utiliza el concepto de distancia entre puntos que viene representado por:

$$d_h = (x_2 - x_1)$$

$$d_l = (y_2 - y_1) \dots \dots \dots (15)$$

Una vez indicada las coordenadas donde se encuentran cada círculo, se realiza la segmentación del objeto de interes en este caso son los círculos que indican dicha trayectoria.

Después de hacer la segmentación, se da la instrucción que el dron despegue por medio de un tópicos *bebop/takeoff*. Posteriormente en el despegue, el dron tiene perturbación, esto se debe al aire que genera las hélices al despegar, para ello, indicamos que se espere un determinado tiempo para que se estabilice y ejecute los movimientos necesarios para realizar la trayectoria que se desea.

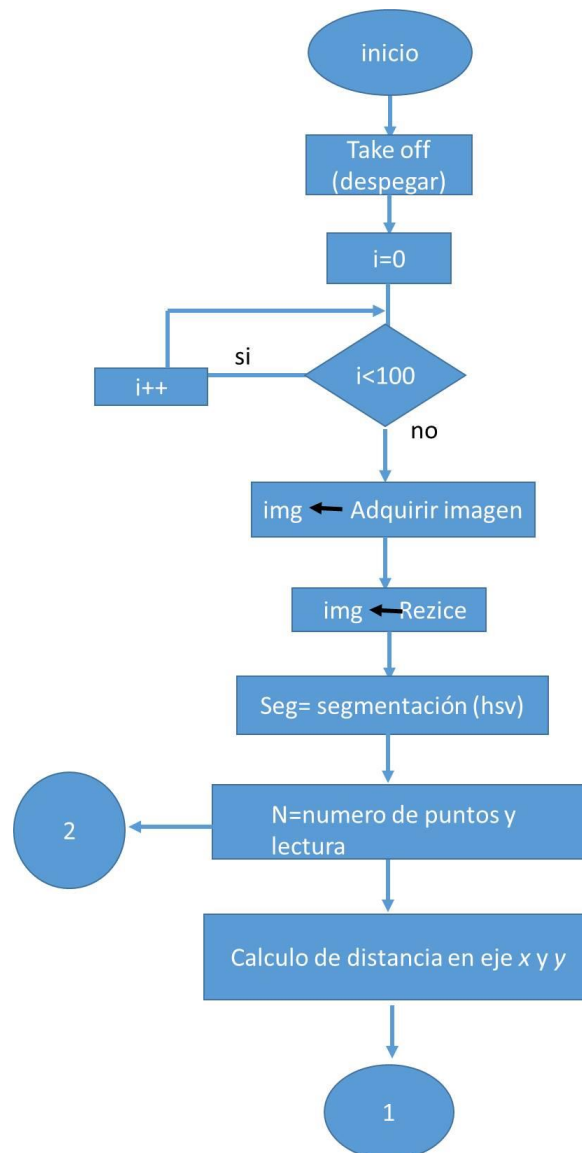
Como en las anteriores pruebas, se realizó un control proporcional, cabe mencionar, que se toma en cuenta que se tiene que relacionar las coordenadas del dron, con las coordenadas de imagen ya que, de no hacerlo, el dron no se moverá de manera correcta. Para una explicación más sencilla se realizó la siguiente tabla.

RELACIÓN DE COORDENADAS	
Drone	Imagen
Z	Z
Y	X
X	Y

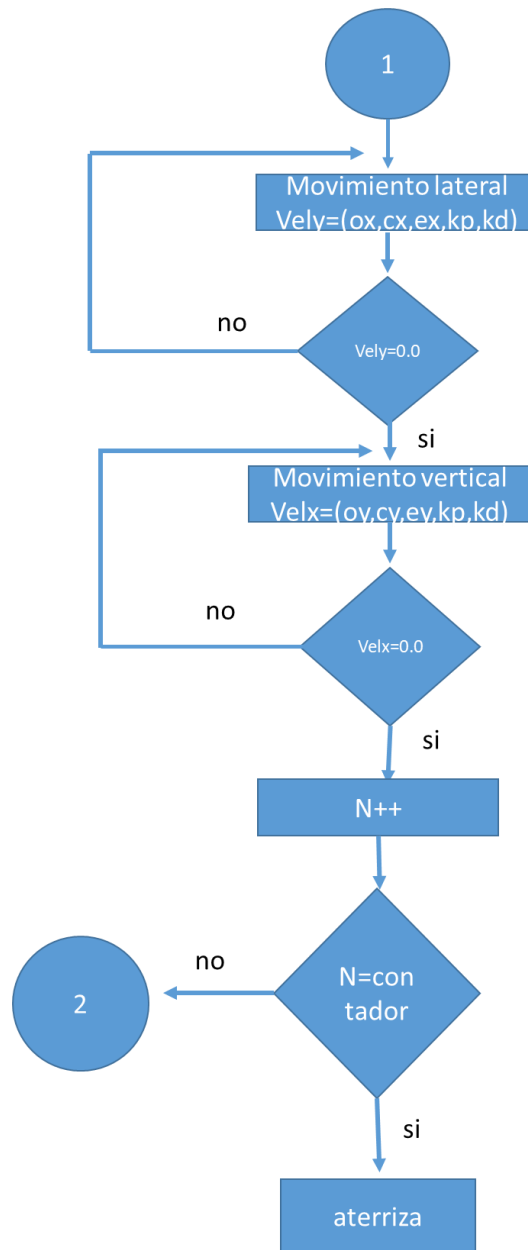
Se usa la ecuación obtenida en la *imagen 46*, se inserta un valor de  $x$ , el cual es la distancia que nosotros deseamos recorrer con el vehículo aéreo no tripulado tanto para el eje  $x$  y  $y$ , el resultado de la ecuación nos da el tiempo que se necesita para recorrer esa distancia.

Para que el dron se mueva en los ejes  $x$ ,  $y$ , se sintonizó por medio del controlador proporcional derivativo y se representa en la ecuación (14).

Cabe mencionar, que el valor de referencia que se utiliza, es el tiempo que se necesita para hacer el recorrido que se desea, el valor actual es el tiempo que está transcurriendo mientras se hace el recorrido. Para realizar la prueba ya mencionada, se utilizó el siguiente diagrama de flujo.



En el diagrama de flujo, se observa la instrucción del despegue, después se hace un contador para que se establezca el drone, si el contador es igual a 100 se adquiere la imagen, segmentada y se obtienen las referencias. Posteriormente, se introducen los puntos que deseamos y se calcula la distancia de los ejes  $x$  y  $y$ .



Por último, se hacen los movimientos laterales y horizontales, si el contador es igual al número de puntos insertados anteriormente aterriza el dron pero si no es igual se vuelve a leer los puntos y a calcular la distancia para que el dron vaya a ese punto nuevo.

En el video mostrado en el link <https://youtu.be/zbDI30JMHso> se puede observar como el vehículo aéreo no tripulado despegar y se desplaza sobre los puntos de referencia marcados con círculos de un color característico.

## 5.6 Aplicación

En la actualidad, en la Ciudad de México se vive una situación peligrosa, ya que con el paso del tiempo sigue aumentando los casos de secuestros de cualquier género y edad. La mayoría de los secuestros, son realizados con ayuda de automóviles ya que, llegan a subir a la persona rápidamente y con ello pueden dispersarse en cualquier lugar o escondites donde no se encuentran con cámaras de seguridad. También el índice de robos de automóviles va aumentando. Por lo tanto, se propone la siguiente solución.

Con la ayuda de un vehículo aéreo no tripulado, se puede encontrar rápidamente a cualquier carro sospechoso que se encuentre en áreas de poca seguridad, así como también enviar las coordenadas de GPS a los policías y así encontrar más rápidamente a personas desaparecidas y así disminuir los casos de secuestros. El auto va a ser identificado por medio del color y diseño.

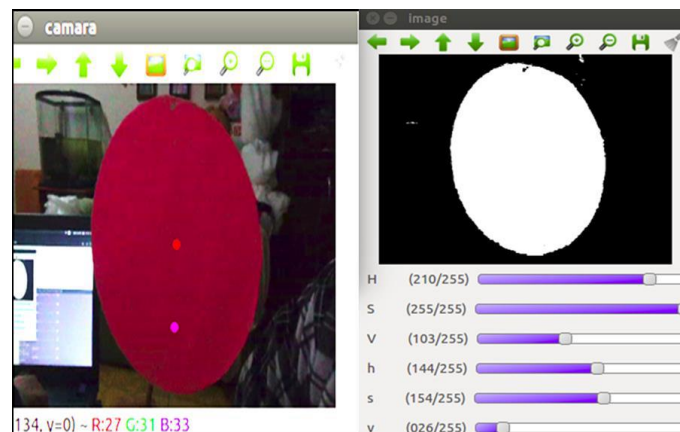
Para eso se realizó una respectiva prueba que consiste en que el dron tiene que seguir un automóvil, para ello, se tiene que segmentar algo característico y único de un carro en este caso sería un marcador en el automóvil.



**Imagen 50.** Prueba de la aplicación.

Esto se hace, con la finalidad de ayudar a la policía al momento de una persecución de un auto y de esta forma sea más fácil localizar el mismo. Para realizar esta prueba se realizó el siguiente proceso.

Primero se conecta a la cámara de drone por medio de un tópicos, posteriormente verificamos si la imagen que tenemos es correcta ya que en algunas ocasiones el drone tiene algún error de conexión y se congela la imagen. Si la imagen es correcta la cámara se dará una inclinación de  $-90^\circ$ , con ayuda de un tópicos diferente al anterior. Esto se realizó con la finalidad de que solo se visualice el círculo que se tendrá en la parte superior del carro.

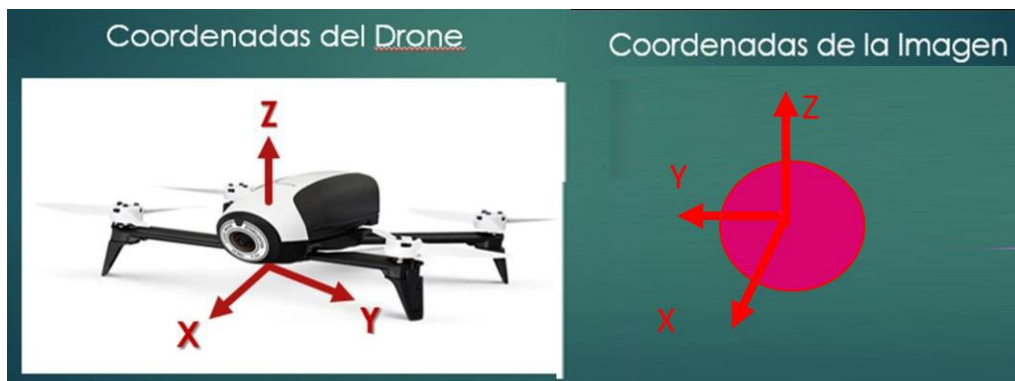


**Imagen 51.** Segmentación del círculo.

De la **imagen 51**, el lado izquierdo se encuentra la fotografía original la cual es el círculo que va a seguir el drone y la visualización de otros objetos, esta misma se encuentra de lado derecho, se observa la segmentación, es decir, el círculo rosa que es el objeto de importancia el cual se va a perseguir.

Se da la instrucción que el drone despegue por medio de un tópico **bebop/takeoff**. Posteriormente, nos percatamos que, a la hora del despegue, el drone no tiene estabilidad, esto se debe al aire que genera al despegar y produce perturbaciones, por ello, indicamos que se espere un determinado tiempo para que se estabilice y ejecute los movimientos necesarios para seguir el objeto.

Ya realizada la segmentación del objeto se realizó el controlador, en este caso, se utilizó un proporcional derivativo ya que, a la hora de realizar las pruebas, se obtuvieron resultados aceptables con ese controlador. Se toma en cuenta que se tiene que relacionar las coordenadas del drone, con las coordenadas de imagen ya que, de no hacerlo, el drone no se moverá de manera correcta.



**Imagen 52.** Relación de las coordenadas del drone con la imagen.

De la **imagen 52**, se observan las relaciones que hay en las coordenadas del drone y de la imagen. Como en casos anteriores, se diseña una tabla donde se indican las relaciones entre las coordenadas.

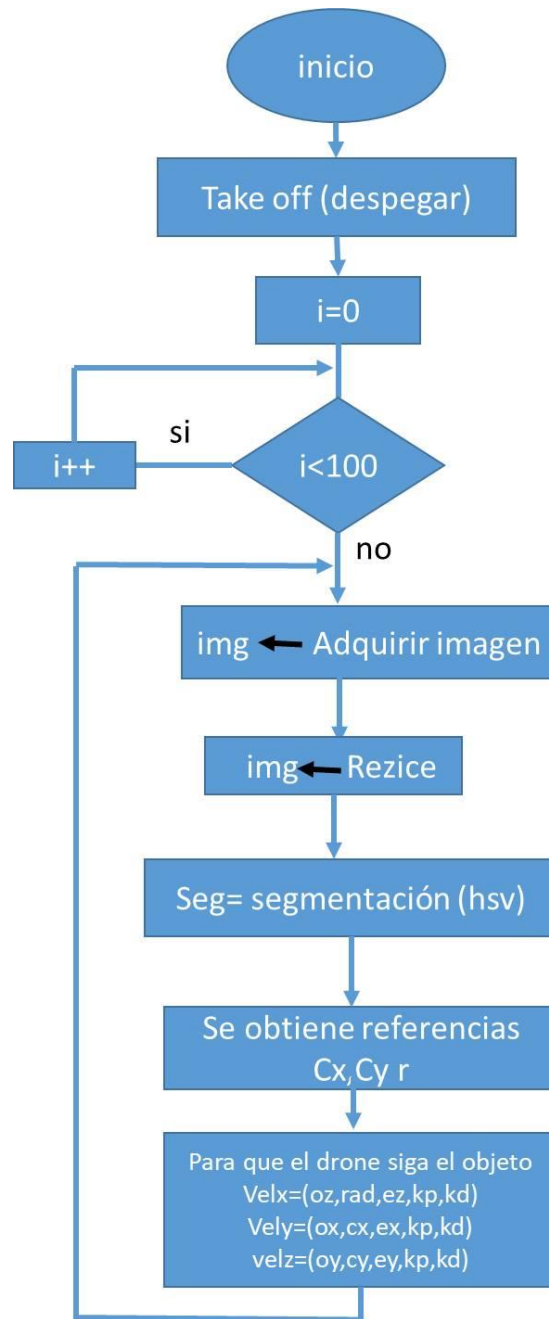
RELACION DE COORDENADAS	
Drone	Imagen
Z	Z
Y	X
X	Y

Con los datos de la tabla, se decide hacer el controlador Proporcional derivativo (PD). El valor de referencia para el eje **Z** del drone, se obtuvo a prueba y error ya que se proponen valores del radio del círculo y se van modificando dependiendo de que tanto se acerque el drone al objeto segmentado. El valor actual, es el radio que tiene el círculo segmentado.

Para los ejes **Y** y **X** del vehículo aéreo no tripulado, se utiliza el centro óptico de la imagen que es de 320x240 pixeles pero en este caso, se tuvieron problemas al realizar las pruebas, se llegaba a pausar la imagen en la computadora (PC) por lo tanto, se cambió la resolución de la imagen a 160x120 pixeles, se utiliza como valores de referencia en el controlador el centro de la imagen y como valor actual el centroíde de la imagen segmentada.

Para el cálculo de las velocidades, se realizaron por medio del controlador ya mencionado en la ecuación **14**. Las velocidades del drone, se mandan por medio del tópico *bebop/cmd\_vel* y por último si deseamos aterrizar el drone se hace por medio del tópico *bebop/land*.

Para realizar la prueba ya menciona se realizó el siguiente diagrama de flujo.



Del diagrama de flujo anterior, se puede observar, que primero se da la instrucción de despegue, después se hace un contador con la finalidad de que se estabilice el drone, si el contador es igual a 100, se adquiere la imagen, se segmenta y posteriormente se obtienen las referencias dónde después se hace el control en cada eje del drone y se envían las respectivas velocidades.

En el link que se anexa [https://youtu.be/ihk\\_aybk5Ho](https://youtu.be/ihk_aybk5Ho) se aprecia como el drone sigue un carro con un objeto, en esta ocasión es un círculo de color rosa es movido por este.

## Capítulo 6. Conclusión y trabajo futuro

En este trabajo se realizó para saber el procedimiento técnico que conlleva el vuelo de un drone. Una de las primordiales características que se tomaron en cuenta fue la utilización de un controlador proporcional derivativo, ya que es una de las estructuras de un drone para que se mantenga estable, es decir, sin perturbaciones por aire exterior a la hora que se encuentra volando.

Si no se instala un buen controlador a un vehículo aéreo no tripulado, llega a tener fácilmente perturbaciones por los cambios de viento que hay en el medio ambiente. Para ello, se recurrió a implementar un controlador, primero fue un proporcional con el cual, se tuvieron buenos resultados, pero en situaciones de aire extrema había mucha perturbación, por lo que se recurrió a un proporcional derivativo en el cual, tanto en espacios cerrados o abiertos se tuvieron buenos resultados.

Otra de las circunstancias que se tomaron en cuenta en este proyecto es saber la configuración y segmentación de la imagen, ya que es la base de varias pruebas que se realizaron con el drone.

Se observó que, para realizar una buena segmentación, depende de la luz ambiente o del lugar donde se trabajen las pruebas ya mencionadas, también para poder segmentar se tiene varias técnicas, se utilizó en este trabajo fue la segmentación por color en el espacio color HSV.

Por último, algunos sensores del dron, como el de odometría funciona, pero siempre se tenía que verificar su comportamiento en cada superficie, en la cual se tenga que volar el dron por ello se optó por utilizar un temporizador para que este se mueva de manera lateral u horizontal.

La forma en que esperábamos realizar una comparación cualitativa de los resultados era por medio de la participación del TMR, sin embargo, no se pudo realizar esto debido a la pandemia resultado del COVID-19, esto llevo a que se cancelara el TMR en los últimos dos años.

Este trabajo en un futuro se puede realizar la implementación en el tema de la persecución de autos, uno de los estudios que se puede seguir trabando en esta tesis es, que la cámara del dron tenga la capacidad de poder identificar los números y letras de la placa de un auto y así tener fácilmente una persecución de un auto que va en su trayectoria y no poderse confundir en caso de que algún otro auto con el mismo modelo llegue a pasar a lado del vehículo perseguido y con la ayuda del GPS mandar la ubicación a las autoridades.

También otro trabajo a futuro que se puede llevar a cabo con esta tesis es la realización de las pruebas del TMR donde se ocupa la colaboración de otro dron (pruebas con dos drones), para así tener una mayor posibilidad de ganar un primer lugar en la competencia y darle un buen prestigio a la universidad. Para poder realizar las pruebas de dos drones que tiene que realizar la investigación de cómo llevar a cabo la conectividad de dos drones al mismo tiempo con una sola PC.

## Bibliografía

(1) <https://actualidad.rt.com/actualidad/view/80396-vehiculos-aereos-tripulados-hitos-historico> consultado, 15 noviembre 2019

(2) Abreu, Violeta Mesa China y Lidia Izquierdo “Los Drones: Su aplicación en el mundo de la comunicación”, 18 de mayo 2015, pag.9

(3) <https://solodronesbaratos.com/tipos-de-drone/> consultado 20 noviembre del 2019

(4) MARTIN RUIPEREZ PABLO. “Diseño y Fabricación de un dron universidad politécnica de Venezuela”, Sin año de Edición, pag.31

(5) ESENZIALE, “TODAS LAS PARTES DE LOS DRONES. EXPLICADAS AL DETALLE”, Sin año de Edición, pag.1, <https://esenziale.com/tecnologia/partes-drone/>

(6) Bueno Diego, “Motor eléctrico brushless: Funcionamiento y características”, sin año de edición, pag.1 <https://lmeconizadoelarenal.files.wordpress.com/2013/11/motores-brushless.pdf>

(7) Peter Corke, “Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB® second, completely revised”. Springer, 2017, vol. 118.

(8) Martinez, A. (2014). ROS/Concepts. Obtenido de Recuperado el 08 de 2016 <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>: <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>, Consultada 7 de noviembre 2019

(9) <https://es.mathworks.com/help/ros/ug/exchange-data-with-ros-publishers-and-subscribers.html;jsessionid=e548a62ae82facf0b389585f4c19>. (s.f.), Consultada 6 enero 2020

- (10) Creative Commons. (28 de Noviembre de 2016). Ubuntu documentation. Recuperado el 2016, de OpenCV: <https://help.ubuntu.com/community/OpenCV>, Consultada 7 noviembre 2020
- (11) Carrillo Paz Alí José, “Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado”, Ed. UNERMB, (2011), pag.189
- (12) Abreu, V. M. “Los Drones Su aplicación en el mundo de la comunicación” (18 de mayo de 2015). Pág. 9.
- (13) Bueno, D. “Motor eléctrico brushless: Funcionamiento y características”. (sin año de edición), Pág. 1.
- (14) Camazón, J. N. (2011). “Sistemas operativos monopuesto.” España : Editex.
- (15) Castillo, P. G. (enero 2007). “Modelado y Estabilización de un Helicóptero.” *RIAI Revista Iberoamericana de Automática e Infomática*, Pág. 41-57.
- (16) Commons, C. (2016, 11 28). “Ubuntu documentation”. Retrieved from <https://help.ubuntu.com/community/OpenCV>
- (17) ESENZIALE. (sin año de edición). “Todas las partes de los drones. Explicadas al detalle.” *ESENZIALE*, Pág. 1.
- (18) <http://docs.python.org.ar/tutorial/3/real-index.html>. Retrieved from <http://docs.python.org.ar/tutorial/3/real-index.html>
- (17) <http://mundrone.blogspot.com/p/historia-de-los-drones.html>.
- (18) <http://wiki.ros.org/es>. (2018, FEBRERO 18).
- (19) <https://actualidad.rt.com/actualidad/view/80396-vehiculos-aereos-tripulados-hitos-historicos>.
- (20) <https://bebop-autonomy.readthedocs.io/en/latest/>. Retrieved from <https://bebop-autonomy.readthedocs.io/en/latest/>

- (21) <https://es.mathworks.com/help/ros/ug/exchange-data-with-ros-publishers-and-subscribers.html;jsessionid=e548a62ae82facf0b389585f4c19>.
- (22) MARTÍN, P. R. “Diseño y fabricación de un dron.” *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA*, Pág. 22.
- (23) Vera Pablo, Noviembre 2017, “Autolocalización visual para robots móviles y aplicaciones.” Cinvestav México, S/Ed.
- (24) García Michell, Año 2020, “Seguimiento de una trayectoria de un dron mediante ROS y SLAM”, Universidad del Cauca, S/Ed.
- (25) Caltech, “Camera Calibration Toolbox for Matlab”, en línea, visto en [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)
- (26) ROS, en línea visto es: <https://www.ros.org/>
- (27) Python, en línea, visto en : <https://www.python.org/>