



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

## **DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: DISEÑO DE UN SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN DE  
OBJETIVOS EN TIERRA BASADO EN EL SENSOR ELECTROOPTICO  
SEO D1(SEO D2)**

**AUTOR: ZURITA CHANGO, MARCO ANTONIO**

**DIRECTOR: DR. AGUILAR CASTILLO, WILBERT GEOVANNY**

**2019**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *"DISEÑO DE UN SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN DE OBJETIVOS EN TIERRA BASADO EN EL SENSOR ELECTROOPTICO SEO D1(SEO D2)"*, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor *ZURITA CHANGO MARCO ANTONIO* para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 03 de enero del 2018

Atentamente,

Dr. Wilbert Geovanny Aguilar Castillo

DIRECTOR



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

#### AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ZURITA CHANGO MARCO ANTONIO**, con cedula de identidad N° 0704458272, declaro que este trabajo de titulación "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN DE OBJETIVOS EN TIERRA BASADO EN EL SENSOR ELECTROOPTICO SEO D1(SEO D2)**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 08 de junio del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Zurita Chango". La firma está escrita sobre una línea horizontal punteada.

Marco Antonio Zurita Chango



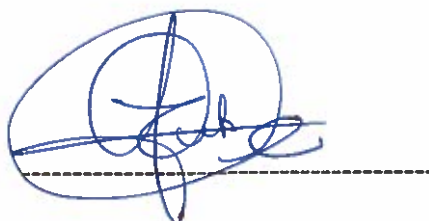
## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

#### AUTORIZACIÓN

Yo, **ZURITA CHANGO MARCO ANTONIO**, autorizo a la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN DE OBJETIVOS EN TIERRA BASADO EN EL SENSOR ELECTROOPTICO SEO D1(SEO D2)**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 08 de junio del 2018



Marco Antonio Zurita Chango

#### DEDICATORIA

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi padre Marco Zurita quien me enseñó a emocionarme con la ingeniería y la ciencia, a ver a las matemáticas como un desafío al cual no debía rendirme.

A mi madre Aida Chango por todo el apoyo que siempre me brindó en todas las decisiones que tome, por enseñarme que la educación es lo más importante y el regalo más grande que pudo darme.

A mis hermanos Christopher y Karla, quienes me han sabido llenar de amor fraternal y de muchos momentos alegres.

Marco A. Zurita C.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres por ser mi apoyo y fortaleza en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi sobrina Isabela por llenarme de cariño, por las tardes de juegos y los momentos que pase viéndote crecer.

A mis hermanos quienes siempre me han dado su ayuda en todo momento.

A toda mi familia en Ecuador, en Italia y EE.UU quienes a pesar de la distancia me han sabido hacer llegar todo su cariño.

A mis mejores amigos Franklin, Tania y Marlon quienes han llegado a conocerme muy bien y ocupar un lugar muy especial en mi corazón.

Al Dr, Wilbert Aguilar por compartir sus conocimientos y brindar un gran apoyo durante la realización del proyecto, deseándole éxitos en su vida profesional

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN .....	i
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN .....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
RESUMEN .....	x
ABSTRACT .....	xi
CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Estación en Tierra .....	2
1.1.2. Sensor Electrooptico .....	5
1.2. Justificación e importancia.....	8
1.3. Alcance del proyecto .....	10
1.4. Objetivos.....	13
1.4.1. Objetivo general.....	13
1.4.2. Objetivos específicos .....	13
CAPÍTULO II. ....	15
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Cinemática Directa de un Robot Manipulador.....	15
2.1.1. Algoritmo de Denavit-Hartenberg .....	20
2.2. Cartografía Matemática .....	24
2.2.1. Representación UTM.....	25
2.2.2. Conversión de Coordenadas UTM a Geográficas y Viceversa .....	29
2.3. Dispositivos de Adquisición de Datos en Vuelo. ....	33
2.3.1. Inertial Navegation System INS .....	33
2.3.2. Acelerómetro .....	34

2.3.3. Sistema de Posicionamiento Global .....	36
CAPÍTULO III .....	37
3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN .....	37
3.1. Cálculo de la Cinemática Directa del Sensor electrooptico. ....	37
3.2. Implementación del Sistema de Geolocalización por medio de Software. ....	44
3.2. Simulaciones del Sistema de Geolocalización.....	57
CAPÍTULO V .....	66
4. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	66
4.1. Implementación de Software en Estación en Tierra .....	66
4.2. Pruebas de Funcionamiento en Diversos Escenarios. ....	68
4.3. Estimación del Error del Sistema de Geolocalización. ....	75
CAPÍTULO IV .....	83
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
5.1 Conclusiones .....	83
5.2 Recomendaciones .....	84
Bibliografía .....	86



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Tabla de parámetros WGS 84</i> .....	30
<b>Tabla 2</b> <i>Tabla de sistemas asociados</i> .....	39
<b>Tabla 3</b> <i>Tabla de parámetros D-HS6</i> .....	40
<b>Tabla 4</b> <i>Tabla de valores para sistema S0</i> .....	47
<b>Tabla 5</b> <i>Tabla de valores para sistema S6</i> .....	49
<b>Tabla 6</b> <i>Tabla de valores Parámetros Escenario 1</i> .....	58
<b>Tabla 7</b> <i>Tabla de resultados Escenario 1</i> .....	59
<b>Tabla 8</b> <i>Tabla de valores Parámetros Escenario 2</i> .....	61
<b>Tabla 9</b> <i>Tabla de resultados Escenario 2</i> .....	62
<b>Tabla 10</b> <i>Tabla de valores Parámetros Escenario 3</i> .....	64
<b>Tabla 11</b> <i>Tabla de resultados Escenario 3</i> .....	65
<b>Tabla 12</b> <i>Tabla de valores para estimación del error en condiciones de simulación</i> .....	78
<b>Tabla 13</b> <i>Tabla de valores para estimación del error en condiciones de PRUEBA</i> .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de bloques del sistema de vigilancia y reconocimiento.....	2
<b>Figura 2.</b> Pantalla HMI del sistema de vigilancia y reconocimiento.....	3
<b>Figura 3.</b> Joystick utilizado en el sistema de vigilancia y reconocimiento.....	4
<b>Figura 4.</b> Equipos del sistema de comunicación.....	5
<b>Figura 5.</b> Ejemplo de sensor electrooptico.....	6
<b>Figura 6.</b> Placa electrónica de control y comunicación.....	8
<b>Figura 7.</b> Movimiento de Aeronave en vuelo.....	11
<b>Figura 8.</b> Diagrama de Bloques de Alcance del Proyecto.....	12
<b>Figura 9.</b> Datos a presentar en el Sistema.....	13
<b>Figura 10.</b> Ilustración Cinemática Inversa y Directa.....	16
<b>Figura 11.</b> Robot planar de 2 Grados de Libertad.....	18
<b>Figura 12.</b> Parámetros para un eslabón Giratorio.....	19
<b>Figura 13.</b> Robot SCARA Ejemplo metodología Denavit-Hartenberg.....	24
<b>Figura 14.</b> Representación Conforme Gauss.....	26
<b>Figura 15.</b> Distribución de Zonas UTM (Husos).....	27
<b>Figura 16.</b> Detalle de un Huso.....	28
<b>Figura 17.</b> Esquema Sistema de Navegación Inercial.....	34
<b>Figura 18.</b> Principio de Funcionamiento acelerometro.....	35

<b>Figura 19.</b> Identificación de Elementos Sensor electrooptico.....	37
<b>Figura 20.</b> Sistemas asociados al Giroestabilizador Aéreo .....	38
<b>Figura 21.</b> Sistema de Coordenadas S0 (X,Y,Z respectivamente Azul, Rojo, Amarillo) .....	46
<b>Figura 22.</b> Sistema S6 con respecto a S0 sin rotaciones.....	48
<b>Figura 23.</b> Sistema S6 con respecto a S0 rotación q5 en 45 grados.....	50
<b>Figura 24.</b> Sistema S6 con respecto a S0 rotación q4 y q5 en 45 grados.....	50
<b>Figura 25.</b> Sistema S6 con respecto a S0 rotación q1, q2, q3, q4, y q5.....	51
<b>Figura 26.</b> Proyección de la recta en R3 y puntos de Intersección con Plano Z=0.....	53
<b>Figura 27.</b> Puntos de Intersección NO VALIDOS con Plano Z=0.....	54
<b>Figura 28.</b> Simulación Parámetros 1 en MATLAB.....	58
<b>Figura 29.</b> Simulación Parámetros 1 en MATLAB (Vista Superior) .....	59
<b>Figura 30.</b> Ubicación de Objetivo parámetros 1 en Google Maps .....	60
<b>Figura 31.</b> Simulación Parámetros 2 en MATLAB.....	61
<b>Figura 32.</b> Simulación Parámetros 2 en MATLAB (Vista Superior) .....	62
<b>Figura 33.</b> Ubicación de Objetivo parámetros 2 en Google Maps .....	63
<b>Figura 34.</b> Simulación Escenario 3 .....	64
<b>Figura 35.</b> Bloque de MATLAB scrip en LabVIEW.....	66
<b>Figura 36.</b> Implementación MATLAB script en LabVIEW .....	67
<b>Figura 37.</b> HMI con coordenadas del Objetivo .....	68
<b>Figura 38.</b> Pantalla HMI Plataforma de Formación .....	69
<b>Figura 39.</b> Vista satelital Sello CID-FAE .....	69
<b>Figura 40.</b> Pantalla HMI Prevención CID-FAE .....	70
<b>Figura 41.</b> Vista satelital Prevención CID-FAE.....	70
<b>Figura 42.</b> Pantalla HMI Parqueadero SOLCA.....	71
<b>Figura 43.</b> Vista satelital Vehículos en Solca .....	71
<b>Figura 44.</b> Pantalla HMI Bloque techo rojo SOLCA.....	72
<b>Figura 45.</b> Vista satelital Bomba de Agua en Solca .....	72
<b>Figura 46.</b> Pantalla HMI Intersección Calles Ambato .....	73
<b>Figura 47.</b> Vista satelital intersección de calles.....	73
<b>Figura 48.</b> Pantalla HMI edificio José Martí.....	74
<b>Figura 49.</b> Vista satelital Edificio José Julián Martí .....	74
<b>Figura 50.</b> Error producido por q4 y q5 .....	76
<b>Figura 51.</b> Error producido q4+1.5, y q5+1.5 .....	77
<b>Figura 52.</b> Representación tabla de error .....	79
<b>Figura 53.</b> Alcance sistema geo localización y error en coordenadas (Sangolqui).....	81
<b>Figura 54.</b> Alcance sistema geo localización y error en coordenadas (Pasaje).....	82

## RESUMEN

Este trabajo de investigación busca determinar las coordenadas geográficas de un objeto en un terreno de interés mediante la aplicación de la metodología Denavit-Hartenberg para el sistema de vigilancia y reconocimiento desarrollado en el CID-FAE (SEO-D1). El SEO-D1 a pesar de no ser un robot al cual comúnmente se aplica la metodología D-H, se le da este enfoque siendo que el mismo posee ciertos atributos a los cuales se puede realizar su respectivo símil a los atributos de un robot. Una vez establecida la orientación se ve necesaria la aplicación de cartografía matemática para la ubicación geográfica tanto en coordenadas UTM como en coordenadas geográficas del objeto de interés. Las pruebas realizadas en simulación basándose en las capacidades reales de los equipos que conforman en el SEO-D1 dan como resultado los valores de alcance máximo del sistema en relación a valores tolerables de error. La exactitud del sistema depende directamente de los valores recibidos de los múltiples instrumentos que posee el SEO-D1 (INS, altímetro, y Servomotores). La estimación de las coordenadas de un objeto de interés en tiempo real proporcionará información en apoyo de las operaciones militares, en lineamiento a las políticas de la seguridad nacional y defensa del territorio nacional.

### **Keywords–**

- **Denavit-Hartenberg Algorithm**
- **Mathematical Cartography**
- **Cadena Cinemática**

## **ABSTRACT**

This research work seeks to determine the geographic coordinates of an object in a field of interest through the application of Denavit-Hartenberg methodology for the surveillance and recognition system developed in the CID-FAE (SEO-D1) The SEO-D1 despite not being a robot to which commonly applies the D-H methodology, is given this approach being that it has certain attributes to which you can make their respective simile to the attributes of a robot. Once the orientation is established, it is necessary to apply mathematical cartography for the geographic location in UTM coordinates as well as in geographic coordinates of the object of interest.

The tests carried out in simulation based on the real capabilities of the teams that make up the SEO-D1 result in the maximum scope values of the system in relation to tolerable error values. The accuracy of the system depends directly on the values received from the multiple instruments that SEO-D1 has (INS, altimeter, and Servomotors). The estimation of the coordinates of an object of interest in real time will provide information in support of military operations, in line with the policies of national security and defense of the national territory.

### **Keywords–**

- **Denavit-Hartenberg Algorithm**
- **Mathematical Cartography**
- **Cinematic chain**

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

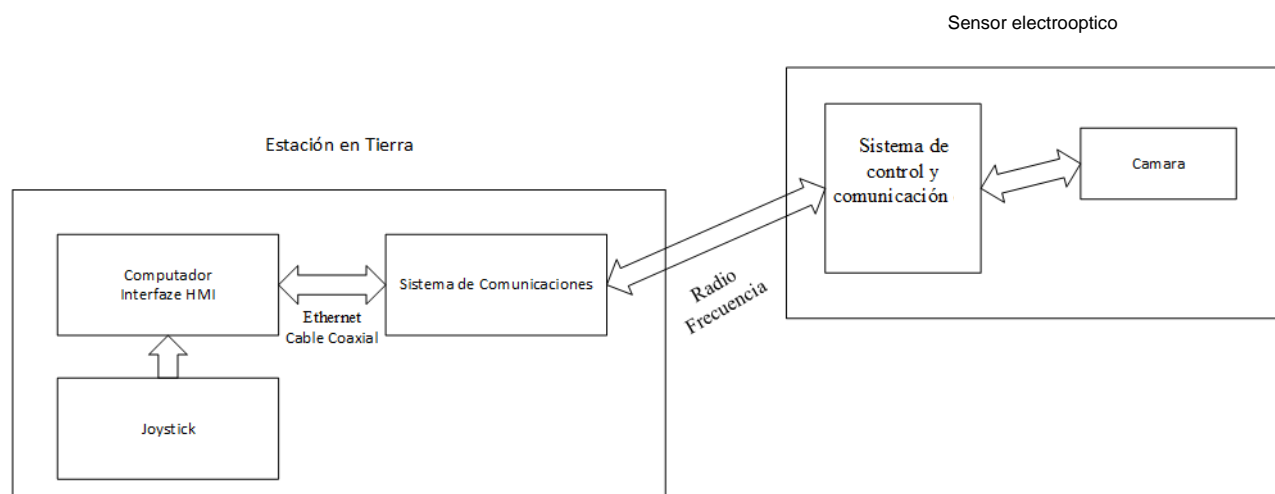
#### 1.1. Antecedentes

El Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana CIDFAE fue creado el 4 de Mayo de 1998, mediante Directiva No. R-001-CL-H-97, teniendo como predecesor al Departamento de Ingeniería Aeronáutica, el cual se creó en el año 1994 en el Centro de Mantenimiento FAE de la ciudad de Latacunga (FAE). Las secciones con que se inició el CIDFAE fueron: Aerodinámica, Estructuras, Materiales Compuestos, Propulsión, Adquisición de Datos, Telemática, Dispositivos Electrónicos, Control, Guiado y Navegación, entre otros (Jara-Olmedo A. , Medina-Pazmiño, Tozer, Aguilar, & Pardo, 2018), (Jara-Olmedo A. , y otros, 2018).

Dentro de los proyectos emblemáticos desarrollados en ese centro de investigación, existe el sistema de vigilancia y reconocimiento desarrollado en el CIDFAE, que tiene sus orígenes a inicios del 2012. Este sistema surge de la necesidad de capturar imágenes en tiempo real para aplicaciones de vigilancia y reconocimiento, (Pardo, Aguilar, & Toulkeridis, 2017), (Aguilar W. G., y otros, Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers and Saliency Maps, 2017), (Aguilar W. G., y otros, Real-Time Detection and Simulation of Abnormal Crowd Behavior, 2017), (Aguilar W. G., y otros, 2017), (Aguilar W. G., y otros, 2017), (Aguilar W. G., y otros, Cascade Classifiers and Saliency Maps Based People Detection, 2017).

Al momento se tiene como línea base información técnica elaborada por el personal de investigadores que desarrollaron el sistema de vigilancia y reconocimiento como: informes, manuales, software implementado, diagramas eléctricos, que servirán de apoyo para continuar con el proyecto “sensor electroóptico de vigilancia y reconocimiento para aeronaves tripuladas de la FAE”.

El sistema de vigilancia y reconocimiento desarrollado en el CID FAE está conformado por una estación en tierra y el sensor electrooptico. Como se detalla en la *Figura 1*.



**Figura 1.** Diagrama de bloques del sistema de vigilancia y reconocimiento

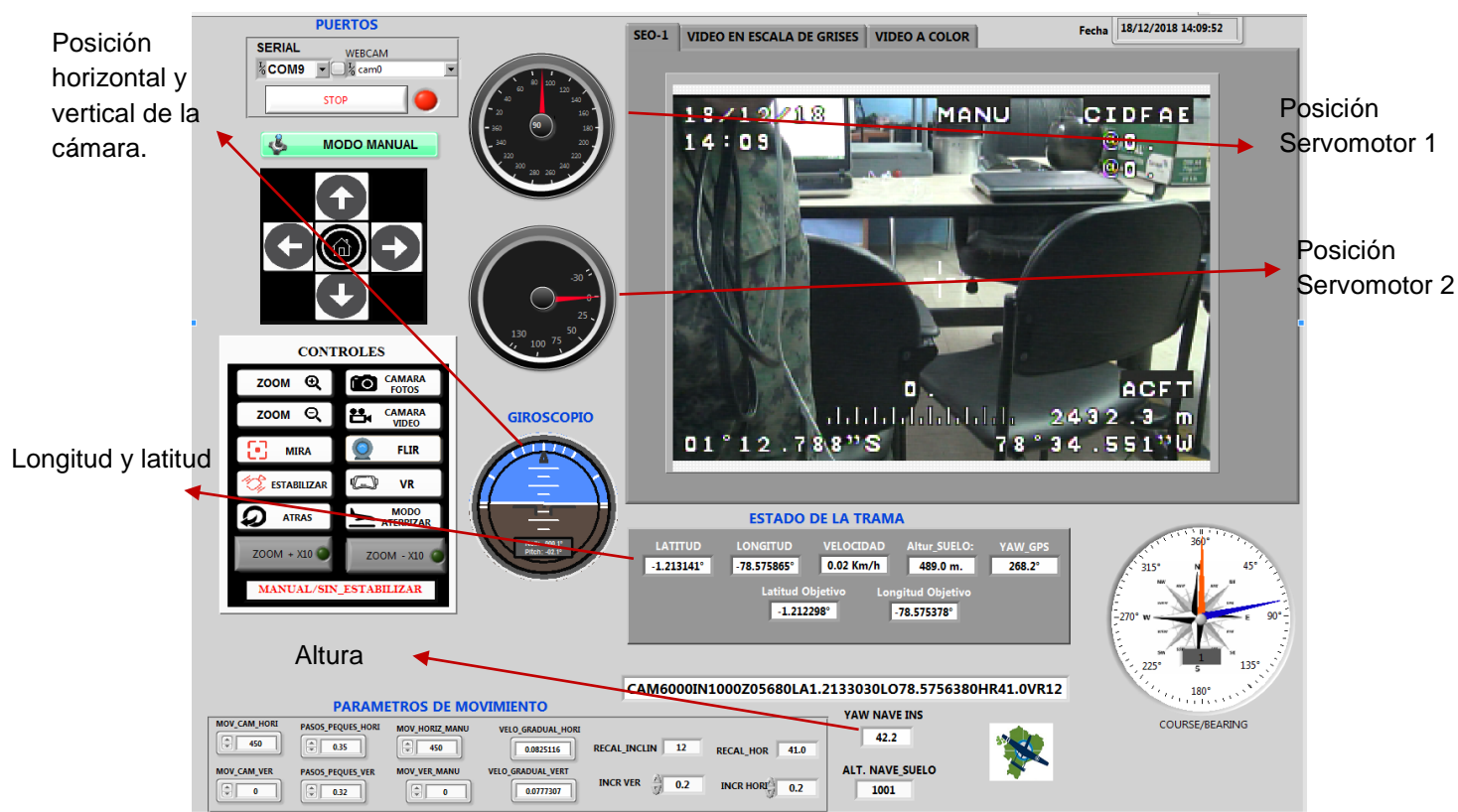
### 1.1.1. Estación en Tierra

La estación en tierra está conformada por: una interfaz HMI desarrollada en Labview, un joystick, y la tarjeta de comunicación.

### 1.1.1.1 Interfaz HMI

En la interfaz HMI (COPADATA, 2019) se puede visualizar en tiempo real información relevante del sistema durante su operación en vuelo como: imágenes de la cámara, altura de vuelo, coordenadas geográficas, ángulo de orientación de la cámara, etc.

La HMI permite la configuración básica de parámetros del sistema como: sensibilidad ante el movimiento del joystick, y la selección de los puertos de comunicación.

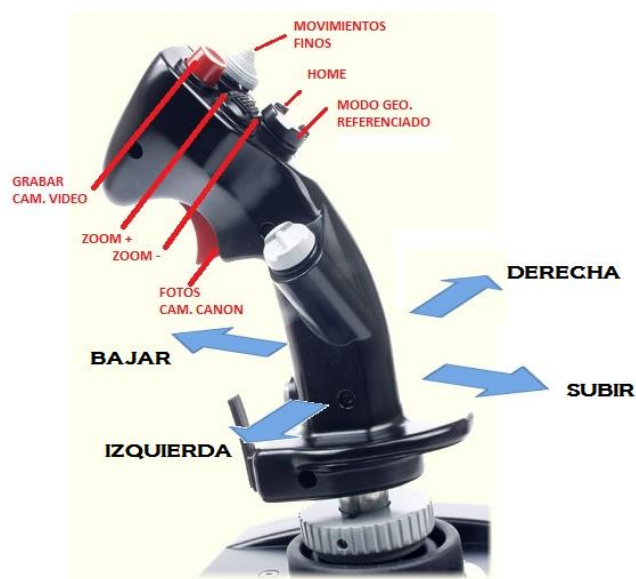


**Figura 2.** Pantalla HMI del sistema de vigilancia y reconocimiento

Fuente: (Rafael, 2014)

### 1.1.1.2 Joystick

El joystick utilizado para controlar la cámara es un joystick mecánico (THRUSTMASTER, 2019) con un puerto serial USB. Cada uno de sus 7 botones y 2 grados de libertad se encuentran configurados para realizar acciones sobre la cámara como: Grabación de video, captura de imágenes, zoom +, zoom -, cambio de orientación de la cámara, etc. Según se muestra en la *Figura 3*.



**Figura 3.** Joystick utilizado en el sistema de vigilancia y reconocimiento

Fuente: (Rafael, 2014)



### 1.1.1.3 Sistema de Comunicación

La comunicación que existe entre la estación en tierra y el sensor electrooptico es por radiofrecuencia. La velocidad de transmisión del sistema es de 19200 baudios y un alcance comprobado de hasta 80 Km.



**Figura 4.** Equipos del sistema de comunicación

### 1.1.2. Sensor Electrooptico

El sensor Electrooptico ó Giroestabilizador Aéreo (Alava Ingenieros, 2019) es el componente que se instala en la aeronave, sistema ya desarrollado y probado en múltiples misiones. El sistema posee 2 grados de libertad. Si bien, en la literatura existen múltiples algoritmos de estabilización digital del sistema (Aguilar & Angulo, Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles, 2016), (Aguilar & Angulo, Real-time video stabilization without phantom movements for micro aerial vehicles, 2014), (Aguilar & Angulo, Robust video stabilization based on motion intention for low-cost micro aerial vehicles, 2014), (Aguilar, Angulo, & Pardo, Motion intention optimization for multicopter robust video stabilization, 2017), (Aguilar & Angulo,

Estabilización robusta de vídeo basada en diferencia de nivel de gris, 2013), (Aguilar & Angulo, Compensación y aprendizaje de efectos generados en la imagen durante el desplazamiento de un robot, 2012), (Aguilar & Angulo, Compensación de los efectos generados en la imagen por el control de navegación del robot Aibo ERS 7, 2012), estos algoritmos no son recomendable para problemas en los que la estimación requiera ser altamente precisa.

Este sensor está conformado por el sistema de control y comunicación, una cámara y la estructura mecánica.



**Figura 5.** Ejemplo de sensor electrooptico

Fuente: (Rafael, 2014)

### **1.1.2.1 Sistema de control y comunicación**

El sistema de control y comunicación del sensor electrooptico se compone de los siguientes elementos

- **Radio RS 232:** Sistema que permite la comunicación inalámbrica entre el sensor electrooptico y la estación en tierra.
- **Sensor INS (PLATAFORMA INERCIAL):** Sistema de ayuda a la navegación que usa un computador, sensores de movimiento (acelerómetros) y sensores de rotación giroscópicos para calcular continuamente la posición, orientación, y velocidad (dirección y rapidez de movimiento) de un objeto en movimiento sin necesidad de referencias externas.
- **GPS:** Para la estimación de la posición se utiliza el Sistema de Posicionamiento Global (en inglés, GPS; Global Positioning System). El GPS es una herramienta muy útil, utilizada en la actualidad para conocer la posición de un objeto o persona en movimiento, respecto a las coordenadas geográficas, estos datos del GPS ya son accesibles en la estación en tierra y se ven reflejadas en la HMI.
- **Actuadores:** Salidas del sistema de control de orientación de la cámara.
- **Sensor Altímetro:** Instrumento de medición que indica la diferencia de altitud entre el punto donde se encuentra localizado y un punto de referencia. (Miguel Muñoz, 2019)
- **Microcontrolador:** Circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Permite la integración y comunicación de los elementos del sistema de control y comunicación. (HETPRO, 2019)
- **Sistema de alimentación:** Sistema que provee diferentes niveles de voltaje DC de alimentación.



**Figura 6.** Placa electrónica de control y comunicación

Fuente: (Rafael, 2014)

En el presente trabajo de investigación se pretende realizar el diseño de un sistema de geolocalización de objetivos, basado en un sensor laser que permita conocer la distancia entre el sistema en vuelo y un objetivo en tierra, y la localización global del objetivo. Este sensor laser deberá integrarse al sistema de control y comunicación de la cámara.

## **1.2. Justificación e importancia**

Luego de que las negociaciones entre el gobierno del presidente Juan Manuel Santos y las FARC, dieran como resultado la firma de un acuerdo de paz el 24 de noviembre del 2016 (Gobierno de Colombia; Rafael, 2014), algunos grupos disidentes miembros de esta organización decidieron no acogerse a este acuerdo, por lo que se mantienen realizando sus actividades ilegales en el sector de la frontera norte con Colombia (Gómez López, 2013).

La Constitución de la República del Ecuador (Asamblea Constituyente, 2008), en el Art. 158 establece la Misión fundamental de las FF.AA. como sigue: “Las Fuerzas Armadas tienen como misión fundamental la defensa de la soberanía y la integridad territorial”. Así mismo, dentro de los objetivos estratégicos de las FF.AA. se tiene el Objetivo No. 10 que hace mención de lograr “Incrementar los niveles de desarrollo tecnológico y el fortalecimiento de la investigación de FF.AA.”.

Por otra parte, la misión de la Fuerza Aérea Ecuatoriana dice “Desarrollar el poder militar aéreo para la consecución de los objetivos institucionales, que garanticen la defensa, contribuyan con la seguridad y desarrollo de la Nación” (FAE).

El CID-FAE como parte de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, se alinea a las políticas de seguridad y defensa, desarrollando proyectos tecnológicos y científicos con un enfoque militar. El sistema de vigilancia y reconocimiento desarrollado en el CID FAE, cumple con estas políticas, cumpliendo tareas de vigilancia y reconocimiento en tiempo real de objetivos en tierra.

El presente proyecto de tesis propone la integración del sistema de geolocalización de objetivos al sistema de vigilancia y reconocimiento, proveyendo al sistema de una nueva funcionalidad. El sistema de geolocalización presentará coordenadas geográficas en longitud y latitud de objetivos en tierra, información que es de suma importancia para la planificación de las operaciones militares.

Con el desarrollo del sistema de geolocalización, se dará un impulso al desarrollo de las capacidades operativas en la Fuerza Aérea por medio de nuevas tecnologías. El

uso de esta tecnología estará apegada a las actividades de seguridad y defensa de la nación. Además, esta tecnología puede ser extrapolada para su uso en aplicaciones de índole civil.

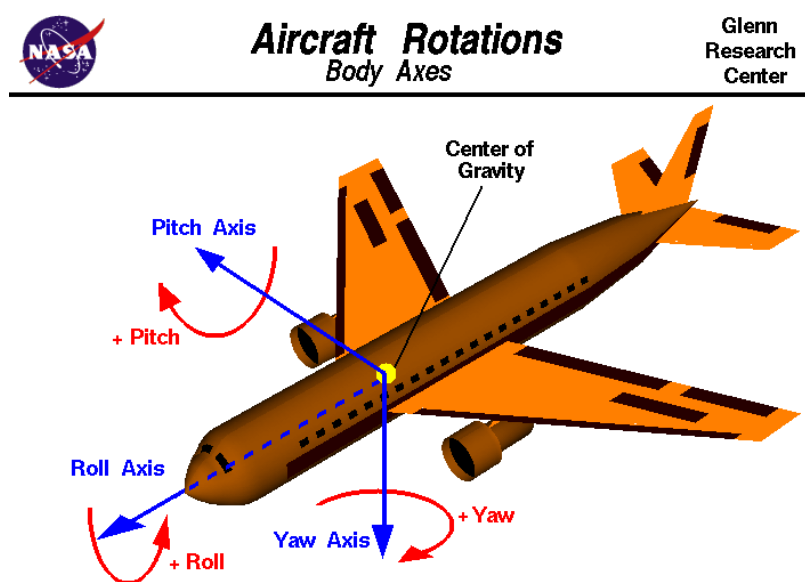
### **1.3. Alcance del proyecto**

El presente proyecto se enfoca en el diseño de un sistema de geolocalización de objetivos en tierra que pueda ser integrado al sistema de vigilancia y reconocimiento desarrollado en el CID FAE.

En el sistema de vigilancia y reconocimiento se gestiona diferente tipo de información provista por los elementos del sistema de control y comunicación. La información más relevante para la realización de este proyecto es dada por la plataforma INS y el GPS. Mediante la plataforma INS se puede determinar la pose y rotación de la cámara, mientras que el GPS nos dará su posición geográfica.

Los datos adquiridos por la plataforma INS serán utilizados para el diseño de un sistema de estimación de la pose de la cámara. Dicha estimación de pose es importante debido a que la orientación de la cámara montada en una aeronave cambia constantemente como producto de las maniobras que deban realizarse en vuelo. Existen diferentes enfoques para la estimación de la pose, entre los cuales se destacan los basados en múltiples cámaras (Aguilar, Manosalvas, Guillén, & Collaguazo, 2018) y sensores RGB-D (Aguilar, y otros, Visual SLAM with a RGB-D Camera on a Quadrotor UAV Using on-Board Processing, 2017), (Aguilar, y otros, Real-Time 3D Modeling with a RGB-D Camera and On-Board Processing, 2017), (Aguilar, y otros, On-Board Visual

SLAM on a UGV Using a RGB-D Camera, 2017), no obstante se optó por un enfoque basado en información inercial debido a la robustez del mismo. Los movimientos realizados por las aeronaves son descritos por medio del pitch, yaw y el roll (Drones, 2019) como se muestra en la *Figura 7*.

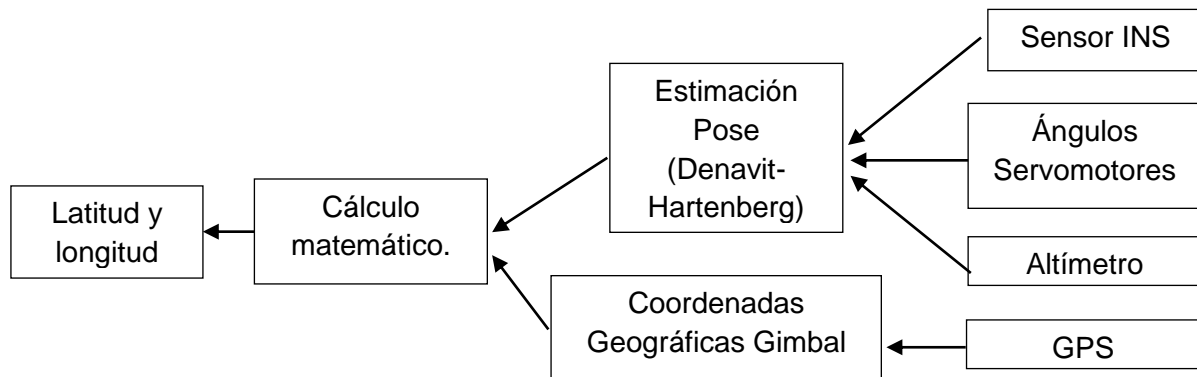


**Figura 7.** Movimiento de Aeronave en vuelo

Fuente: NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA)-  
PAGINA WEB

El conjunto de datos adquiridos por la plataforma INS, GPS y el altímetro serán tratados por medio del desarrollo de la metodología de Denavit-Hartenberg, para la estimación de la pose de la lente de la cámara, y será implementado mediante software compatible con la HMI del sistema de vigilancia y reconocimiento debido a que esta interfaz ya está desarrollada. Lo que se realizara es su modificación para presentar

nuevos datos de latitud y longitud del objetivo en tierra. Esto se ve esquematizado en la *Figura 8*.



**Figura 8.** Diagrama de Bloques de Alcance del Proyecto

Fuente: Autor

Una vez desarrollado el sistema de geolocalización de objetivos, se deberán realizar pruebas de desempeño, basándose en la exactitud (Minitab, 2019) de las coordenadas geográficas dadas por el sistema.

Los resultados obtenidos por el sistema deberán ser presentados en la HMI, de manera que el operador pueda ver estos datos en tiempo real como se muestra en la *Figura 9*.





**Figura 9.** Datos a presentar en el Sistema

Fuente: Autor

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de geolocalización de objetivos en tierra en tierra basado en el sensor electrooptico SEO D1(SEO D2)

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un sistema de estimación de pose de la cámara a bordo del sensor electrooptico.
- Estimar el posicionamiento del objetivo en tierra (Latitud y Longitud) basado en la pose estimada del sensor electrooptico y el empleo de técnicas de cartografía matemática.
- Realizar simulaciones del sistema de geolocalización por medio de MATLAB.

- Determinar el desempeño del sistema (Precisión y alcance) mediante experimentación del sistema y análisis de resultados

## CAPÍTULO II.

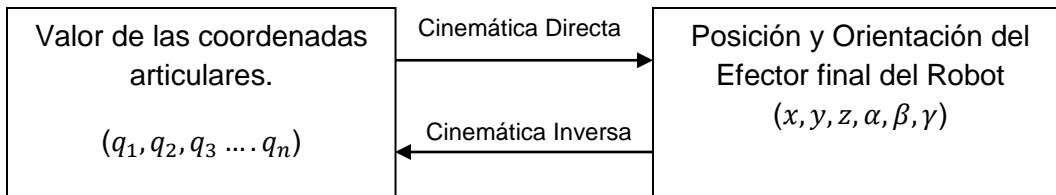
### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Cinemática Directa de un Robot Manipulador

La cinemática de un robot manipulador estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de coordenadas. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares.

A pesar de que no existe ningún robot manipulador dentro de los sistemas que conforman el sistema electroóptico SEO-D1, para el diseño del sistema de geolocalización es necesario conocer la orientación del sensor electrooptico que va a ser montado en la aeronave. Para lo cual el cálculo de la cinemática de un robot manipulador brinda una solución a esta necesidad.

Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot; el primero de ellos se conoce como el problema cinemático directo, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, tomando de referencia un sistema fijo deseado y conociendo sus características y los parámetros de sus articulaciones; el segundo, denominado problema cinemático inverso, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.



**Figura 10** Ilustración Cinemática Inversa y Directa

Fuente: (Baturone, 2001)

Nuestro interés se enfocara en el problema cinemático directo, encaminado a obtener la orientación del extremo final del sensor electrooptico conociendo los valores adoptados por cada una de las articulaciones.

Para poder determinar la cinemática directa de nuestro objeto de estudio es necesario conocer los valores que adoptaran las articulaciones, así como los valores de las diferentes distancias físicas (parámetros geométricos) del sensor electrooptico. Para esto se considerará al sensor electrooptico en vuelo como un robot manipulador con 5 grados de libertad: 2 grados de libertad propios del sensor electrooptico sumados a 3 grados de libertad inherentes a una aeronave en vuelo (Pitch, Yaw y Roll), estos valores ya son conocidos y se ven reflejados en el HMI como se aprecia en la **Figura 2**

La resolución del problema cinemático directo consiste en establecer las relaciones existentes entre la localización espacial del efector final y los valores adoptados por cada una de las articulaciones del robot. Como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$x = f_x(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$$

$$y = f_y(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$$

$$z = f_z(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$$

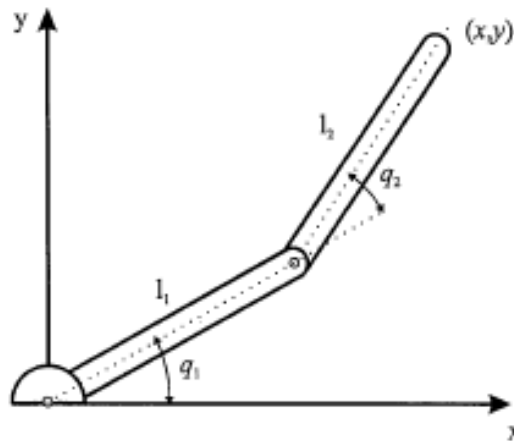
$$\alpha = f_\alpha(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$$

$$\beta = f_\beta(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$$

$$\gamma = f_\gamma(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$$

Donde  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  representan la ubicación y orientación espacial del efector final del robot, mientras que  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$  son los valores adoptados por las articulaciones del robot.

Para la obtención de estas relaciones se presentan alternativas como la aproximación geométrica utilizando ecuaciones geométricas y relaciones trigonométricas (Lung-Wen TSAI, 1999), pero se ha visto que esta alternativa es utilizada cuando el robot manipulador no posee muchas articulaciones, debido al aumento en la complejidad del cálculo de estas relaciones en robots manipuladores con un considerable número de articulaciones.



**Figura 11** Robot planar de 2 Grados de Libertad

Fuente: (Barrientos, 1997)

En el caso del robot manipulador de la ilustración anterior con tan solo 2 grados de libertad es fácil determinar estas relaciones:

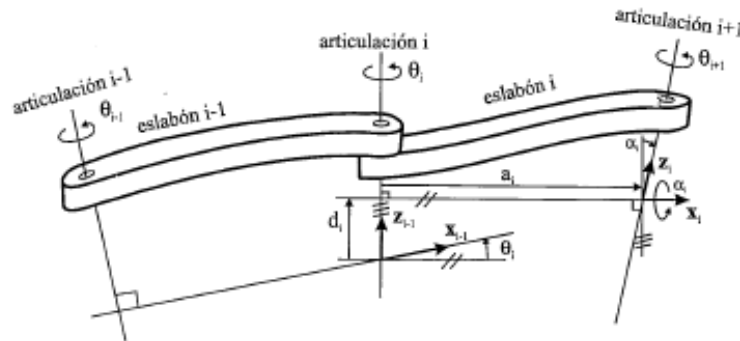
$$x = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$y = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2)$$

Esta aproximación geométrica no es conveniente para nuestro problema, debido a que el sensor electrooptico posee 5 grados de libertad como ya se estableció, para lo cual una alternativa de solución es el planteamiento de un método sistemático basado en la utilización de las matrices de transformación homogénea.

En general, un robot de  $n$  grados de libertad está formado por  $n$  eslabones unidos por  $n$  articulaciones, de forma que cada par articulación-eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia solidario

a él y, utilizando las transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot.



**Figura 12** Parámetros para un eslabón Giratorio

Fuente: (Barrientos, 1997)

La matriz de transformación homogénea es simbolizada por  ${}^{i-1}A_i$ , y representa la posición y orientación relativa del sistema  $i - 1$  con respecto al sistema  $i$ . Es decir que  ${}^0A_1$  describe la posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón con respecto al sistema de referencia solidario a la base, así también  ${}^1A_2$  describe la posición y orientación del segundo eslabón con respecto al primero, esto aplicaría para cada uno de los eslabones del robot.

Conociendo esto se establece que la matriz  ${}^{i-1}A_i$  es una representación parcial del robot manipulador, y al ser necesario una representación total de la cadena cinemática se recurre a la matriz  ${}^0A_k$  resultante del producto de las matrices  ${}^{i-1}A_i$  con  $i$  desde 1 hasta  $k$ . De esta manera se puede establecer la posición y orientación del

sistema solidario con el segundo eslabón del robot con respecto al sistema de coordenadas de la base a través de la matriz  ${}^0A_2$ , donde:

$${}^0A_2 = {}^0A_1 {}^1A_2$$

Del mismo modo la matriz  ${}^0A_3$  representa la posición y orientación del sistema solidario con el tercer eslabón del robot con respecto al sistema de coordenadas de la base.

$${}^0A_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3$$

Cuando se considera todos los grados de libertad, a la matriz  ${}^0A_k$  se le puede denominar T. Así dado nuestro sensor electrooptico con 5 grados de libertad, se tiene que la posición y orientación del eslabón final respecto a la base vendrá dado por la matriz T:

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6$$

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 2.1.1. Algoritmo de Denavit-Hartenberg

Denavit y Hartenberg propusieron en 1955 un método matricial para establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas a las cuales denominaremos  $S_i$



ligado a cada eslabón  $i$  de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. (Barrientos, 1997) (Aníbal Ollero Baturone, 2001).

Para el desarrollo de la metodología de Denavit-Hartenberg es de suma importancia la correcta colocación de los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón, y su asociación será posible mediante 4 transformaciones básicas que dependen de las características geométricas del eslabón. (ASADA, 1986)

Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones:

1. Rotación alrededor del eje  $Z_{i-1}$  un ángulo  $\theta_i$ .
2. Traslación a lo largo de  $Z_{i-1}$  una distancia  $d_i$ ; vector  $\mathbf{d}_i(0,0,d_i)$ .
3. Traslación a lo largo de  $X_i$  una distancia  $a_i$ ; vector  $\mathbf{a}_i(0,0,a_i)$ .
4. Rotación alrededor del eje  $X_i$  un ángulo de  $\alpha_i$ .

Las transformaciones a efectuarse seguirán siempre este orden por la propiedad de no conmutación de las matrices. Por tanto se tendrá la siguiente representación:

$${}^{i-1}A_i = \mathbf{T}(\mathbf{z}, \theta_i) \mathbf{T}(0,0, d_i) \mathbf{T}(a_i, 0,0) \mathbf{T}(\mathbf{x}, \alpha_i)$$

$${}^{i-1}A_i$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cos(\theta_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cos(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cos(\theta_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde  $\theta_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $d_i$ , y  $a_i$  son parámetros del eslabón  $i$ , necesarios de identificar para la obtención de la matriz  ${}^{i-1}A_i$ , y posterior obtención de la matriz  ${}^0A_k$ .

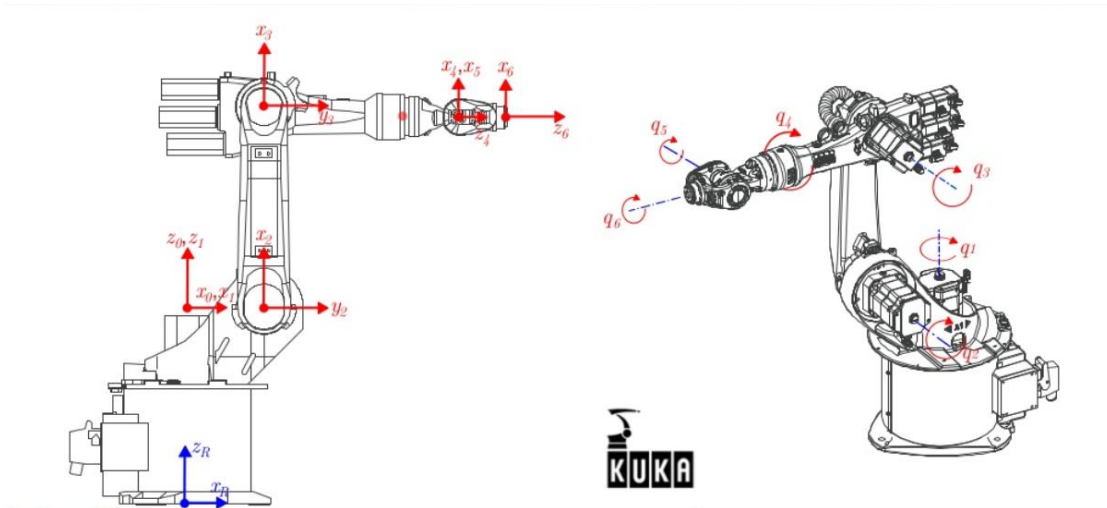
Para tal efecto se trabajara con el algoritmo de Denavit-Hartenberg el cual describe una serie de pasos para la resolución del problema cinemático.

Estos pasos se encuentran descritos en (Barrientos, 1997).

1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con  $n$  (último eslabón móvil). Se enumerará como eslabón 0 a la base fija del robot.
2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en  $n$ .
3. Localizar el eje de cada articulación. Si ésta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
4. Para  $i$  de 0 a  $n - 1$  situar el eje  $z_i$  sobre el eje de la articulación  $i + 1$ .
5. Situar el origen del sistema de la base  $\{S_0\}$  en cualquier punto del eje  $z_0$ .  
Los ejes  $x_0$  e  $y_0$  se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con  $z_0$ .

6. Para  $i$  de 1 a  $n - 1$ , situar el sistema  $\{S_i\}$  (solidario al eslabón  $i$ ) en la intersección  $z_i$  con la línea normal común a  $z_{i-1}$  y  $z_i$ . Si ambos ejes se cortasen se situaría  $\{S_i\}$  en el punto de corte. Si fuesen paralelos  $\{S_i\}$  se situaría en la articulación  $i + 1$ .
7. Situar  $x_i$  en la línea normal común a  $z_{i-1}$  y  $z_i$ .
8. Situar  $y_i$  de modo que forme un sistema dextrógiro con  $x_i$  y  $z_i$ .
9. Situar el sistema  $\{S_n\}$  en el extremo del robot de modo que  $z_n$  coincida con la dirección de  $z_{n-1}$  y  $x_n$  sea normal a  $z_{n-1}$  y  $z_n$ .
10. Obtener  $\theta_i$  como el ángulo que hay que girar en torno a  $z_{i-1}$  para que  $x_{i-1}$  y  $x_i$  queden paralelos.
11. Obtener  $d_i$  como la distancia medida a lo largo de  $z_{i-1}$ , que habría que desplazar  $\{S_{i-1}\}$  para que  $x_{i-1}$  y  $x_i$  quedasen alineados.
12. Obtener  $a_i$  como la distancia medida a lo largo de  $x_i$  (que ahora coincidiría con  $x_{i-1}$ ) que habría que desplazar el nuevo  $\{S_{i-1}\}$  para que su origen coincidiese con  $\{S_i\}$ .
13. Obtener  $\alpha_i$  como el ángulo que habría que girar en torno a  $x_i$  (que ahora coincidiría con  $x_{i-1}$ ), para que el nuevo  $\{S_{i-1}\}$  coincidiese totalmente con  $\{S_i\}$ .
14. Obtener las matrices de transformación  ${}^{i-1}A_i$ .
15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot  $T = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$ .

16. La matriz  $T$  define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las  $n$  coordenadas articulares.



**Figura 13** Robot KUKA Ejemplo metodología Denavit-Hartenberg

Fuente: (Sierra, 2019)

## 2.2. Cartografía Matemática

La cartografía es la ciencia que se ocupa del trazado de las cartas geográficas. Las cartas geográficas, también llamadas mapas, son representaciones sobre un plano de toda o una parte de la superficie de la tierra. Para efectuar esta representación se empleará una determinada proyección de la mencionada superficie terrestre de referencia sobre un plano (Gamboa, 2009).

La representación de la superficie de referencia (esfera o elipsoide de revolución) (Misra, 1989) sobre una superficie plana, sin que haya deformaciones es geoméricamente imposible. Siempre se producirán deformaciones angulares, lineales o superficiales al representar en un plano la superficie terrestre. Es por ello que las representaciones del plano deben buscar la menor deformación posible.

Para el diseño del sistema de geo localización se ha convenido el uso de la representación UTM por su amplio uso a nivel mundial, la cual tiene sus orígenes en su aplicación para las operaciones militares.

### **2.2.1. Representación UTM**

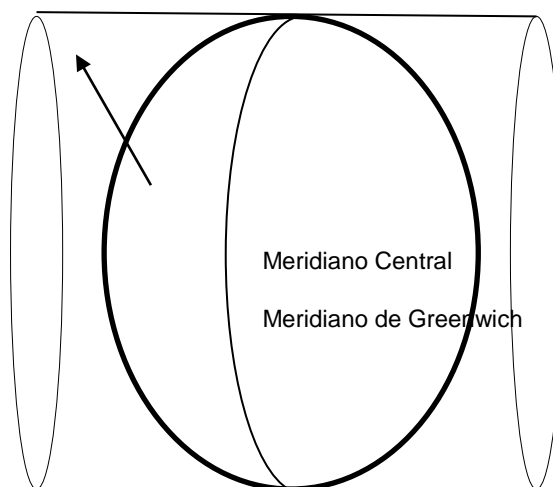
La representación UTM (Universal Transversal Mercator) es una representación cartográfica basada en la representación analítica conforme de Gauss, aplicada de forma sistemática a porciones iguales de la superficie terrestre, cubriendo prácticamente toda su extensión.

La representación UTM tiene su origen en los EEUU (Juan Peña Llopis, 1987) y fue diseñada después de la Segunda Guerra Mundial (1947) con fines militares con el fin de una cartografía adecuada y de coordenadas rectangulares a escala mundial. Para la confección de esta cartografía en Europa, se estableció el datum geodésico de Postdam, con el elipsoide Internacional o de Hayford como referencia, con la finalidad de adoptar la misma referencia geodésica.

Mediante la aplicación de los fundamentos de la representación de Gauss en su diseño, se consiguió que la UTM gozara de la propiedad de conformidad, lo que la

hacía muy adecuada para la resolución de problemas geodésicos directamente en coordenadas UTM, así como la resolución de problemas militares como el tiro artillero. Posteriormente su interés fue en aumento, siendo adoptada internacionalmente (España en 1968) tras la recomendación de la Asociación Internacional de Geodesia (I.A.G).

Como ya se mencionó la representación UTM basa sus principios en la representación conforme a Gauss la cual utiliza en su representación la figura geométrica de un cilindro alrededor de la Tierra (representada por un elipsoide), pero a medida que la representación conforme Gauss se aleje del meridiano central (Meridiano de Greenwich) las deformaciones alcanzarían valores considerables.

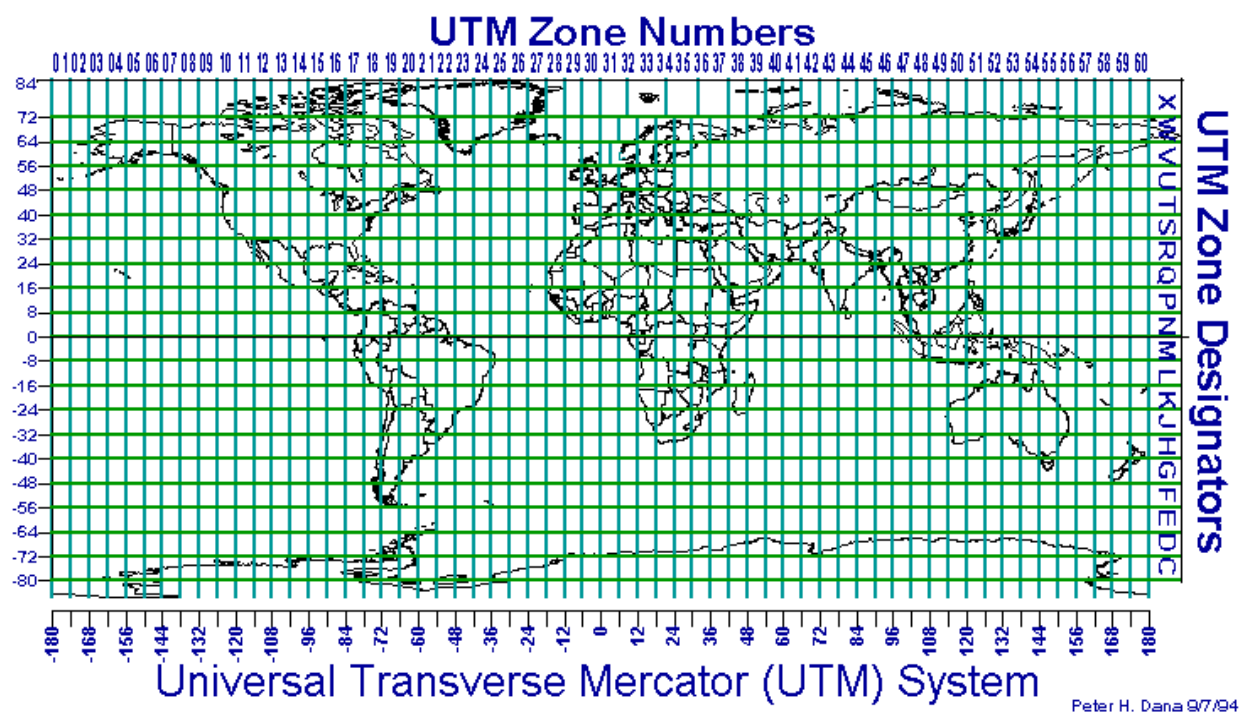


**Figura 14** Representación Conforme Gauss

Fuente: Autor

Para evitar este inconveniente en la representación UTM recurre a la rotación del cilindro alrededor del elipsoide dividiendo a la superficie terrestre en 60 husos iguales

de  $6^{\circ}$  de amplitud, que constituyen 60 representaciones de Gauss, pero referidas cada una de ellas al meridiano central del huso correspondiente.

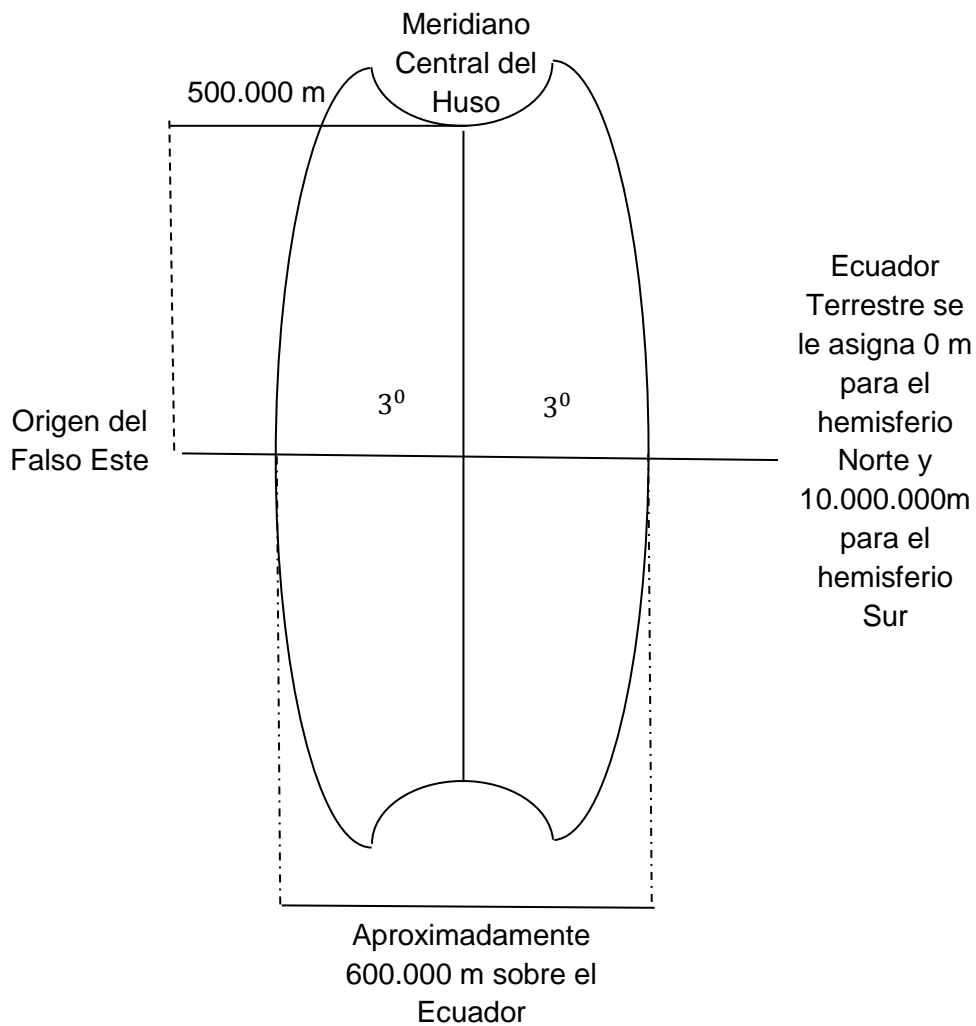


**Figura 15** Distribución de Zonas UTM (Husos)

Fuente: (Franco, 2018)

Desde el meridiano central de la Zona UTM a cada borde, existe una amplitud de  $3^{\circ}$ , siendo la anchura del huso de  $6^{\circ}$ . Para evitar que el uso de coordenadas horizontales negativas, se desplaza el origen de coordenadas horizontales 500.000 metros hacia el Oeste del meridiano central, de forma que el valor de la abscisa X, correspondiente al meridiano central, es de 500.000 m. A este nuevo origen de abscisas se le conoce con el nombre de falso este. Las coordenadas verticales se cuentan a partir de cero, desde el Ecuador, en el hemisferio norte, y en hemisferio sur,

para que no existan coordenadas Y negativas, se desplaza el origen 10.000.000 metros hacia el Sur.



**Figura 16** Detalle de un Huso

Fuente: Autor



### **2.2.2. Conversión de Coordenadas UTM a Geográficas y Viceversa**

Los cálculos para realizar las transformaciones de coordenadas geográficas a coordenadas UTM se basan en el trabajo de (Ortiz, 2018) en la implementación de las fórmulas planteadas por Alberto Cotticia y Luciano Surace en el “Boletino di Geodesia e Science Affini” num. 1, mismas que fueron utilizadas en la tesis de grado “Implementación de un Sistema MDF-GIS de Detección, Localización y Monitoreo de Descargas Atmosféricas en Tiempo Real” (Andrea, Byron, Jorge, Inti, & Aguilar, 2018)

Para emplear las fórmulas anteriormente mencionadas se debe establecer el sistema de referencia geodésico a utilizarse (Ruano Miguel, 2019). Estos sistemas son necesarios debido a que la tierra no es una esfera perfecta y mediante los mismos se puede asignar puntos sobre la superficie terrestre.

Entre los sistemas de referencia más utilizados se puede mencionar los siguientes:

- WGS84, Sistema geodésico mundial que data de 1984.
- ED50, Datum europeo de 1950.
- ETRS89, Sistema de referencia terrestre europeo de 1989 muy similar al WGS84.
- NAD83, Datum estadounidense de 1983 el cual es muy similar al WGS84.
- PSAD56, Datum provisional sudamericano de 1956.
- SIRGAS, Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

Para el sistema de Geo-localización desarrollado se utilizara el sistema WGS 84.  
(Civil, 2019) (C. Boucher, 2001).

### Tabla 1

*Tabla de parámetros WGS 84.*

<b>Parámetros Básicos WGS 84</b>	<b>Valor</b>
Semieje Mayor a	6.378.137,0 m
Semieje Menor b	6.356.752,31424 m
Achatamiento f	1/298.257223563

A partir de estos parámetros las Ecuaciones de Surace y Cotticia son desarrolladas.

$\varphi$  =Latitud

$\lambda$  =Longitud

$$e = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a}$$

$$e' = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a}$$

$$c = \frac{a^2}{b^2}$$

$$Huso = \text{Entero de } \left[ \frac{\text{Longitud}}{6} + 31 \right]$$

$$\lambda_0 = Huso \cdot 6 - 183$$

$e$  = Excentricidad

$e'$  = Segunda Excentricidad

$a$  = Semieje Mayor

$b$  = Semieje Menor

$c$  = Radio polar de Curvatura

$\lambda_0$  = Meridiano Central

$k_0$  = Factor de escala de proyección UTM 0.9996

**Para el paso de Geográficas a UTM:**

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$$

$$A = \cos(\varphi) \cdot \sin(\Delta \lambda)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \ln \left[ \frac{1 + A}{1 - A} \right]$$

$$\eta = \arctan \left( \frac{\tan(\varphi)}{\cos(\Delta \lambda)} \right) - \varphi$$

$$v = \frac{c}{(1 + e'^2 \cdot \cos^2(\varphi))^{1/2}} \cdot k_0$$

$$\zeta = \frac{e'^2}{2} \cdot \xi^2 \cdot \cos^2(\varphi)$$

$$A_1 = \sin(2\varphi)$$

$$A_2 = A_1 \cdot \cos^2(\varphi)$$

$$J_2 = \varphi + \frac{A_1}{2}$$

$$J_4 = \frac{3 \cdot J_2 + A_2}{4}$$

$$J_6 = \frac{5 \cdot J_4 + A_2 \cos^2(\varphi)}{3}$$

$$\alpha = \frac{3}{4} \cdot e'^2$$

$$\beta = \frac{5}{3} \cdot \alpha^2$$

$$\gamma = \frac{35}{27} \cdot \alpha^3$$

$$B_{\Phi} = k_0 \cdot c \cdot (\varphi - \alpha \cdot J_2 + \beta \cdot J_4 - \gamma \cdot J_6)$$

$$X = \xi \cdot v \cdot \left(1 + \frac{\zeta}{3}\right) + 500000$$

$$Y = \eta \cdot v \cdot (1 + \zeta) + B_{\Phi}$$

### Para el paso de UTM a Geográficas:

Tratamiento previo de X y Y

$$X = X - 500.000$$

$$Y = \begin{cases} Y, & \varphi > 0 \\ Y - 10000000, & \varphi \leq 0 \end{cases}$$

$$\varphi' = \frac{Y}{6366197.724 \cdot K_0}$$

$$v = \frac{c}{(1 + e'^2 \cdot \cos^2(\varphi'))^{1/2}} \cdot K_0$$

$$a = \frac{X}{v}$$

$$A_1 = \sin(2\varphi')$$

$$A_2 = A_1 \cdot \cos^2(\varphi')$$

$$J_2 = \varphi' + \frac{A_1}{2}$$

$$J_4 = \frac{3 \cdot J_2 + A_2}{4}$$

$$J_6 = \frac{5 \cdot J_4 + A_2 \cdot \cos^2(\varphi')}{3}$$

$$\alpha = \frac{3}{4} \cdot e'^2$$

$$\beta = \frac{5}{3} \cdot \alpha^2$$

$$\gamma = \frac{35}{27} \cdot \alpha^3$$

$$B_{\Phi} = k_0 \cdot c \cdot (\varphi' - \alpha \cdot)$$

$$b = \frac{Y - B_{\Phi}}{v}$$

$$\zeta = \frac{e'^2 \cdot a^2}{2} \cdot \cos^2(\varphi')$$

$$\xi = a \cdot \left[1 - \frac{\zeta}{3}\right]$$

$$\eta = b \cdot (1 - \zeta) + \varphi'$$

$$\sin(h. \xi) = \frac{\exp^{\xi} - \exp^{-\xi}}{2}$$

$$\Delta\lambda = \arctan\left(\frac{\sin(h. \xi)}{\cos(\eta)}\right)$$

$$\tau = \arctan(\cos(\Delta\lambda) \cdot \tan(\eta))$$

$$\text{Longitud} = \lambda = \Delta\lambda + \lambda_0$$

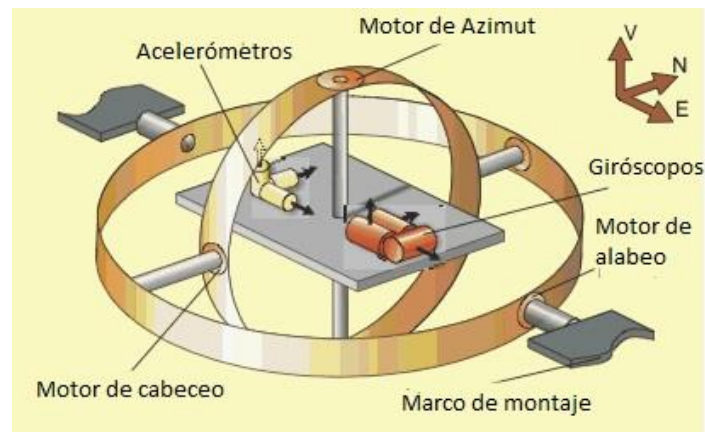
$$\text{Latitud} = \varphi = \varphi' + \left[1 + e'^2 \cdot \cos^2(\varphi') - \frac{3}{2} \cdot e'^2 \cdot \sin(\varphi') \cdot \cos(\varphi') \cdot (\tau - \varphi')\right] \cdot (\tau - \varphi')$$

## 2.3. Dispositivos de Adquisición de Datos en Vuelo.

### 2.3.1. Inertial Navigation System INS

Un Sistema de Navegación Inercial (INS) es un sistema de ayuda a la navegación presente en aeronaves, embarcaciones, misiles y naves espaciales, (VECTORNAV, 2019), (Orbea, y otros, Vertical take off and landing with fixed rotor, 2017), (Aguilar, Angulo, & Costa-Castello, Autonomous Navigation Control for Quadrotors in Trajectories Tracking, 2017), (Orbea, y otros, Math Model of UAV Multi

Rotor Prototype with Fixed Wing Aerodynamic Structure for a Flight Simulator, 2017), (Aguilar, Angulo, Costa, & Molina, 2014). Para su funcionamiento el INS se basa en giróscopos y acelerómetros, que proporcionan información para el cálculo de la posición, orientación y velocidad de un cuerpo en movimiento con respecto a un sistema de referencia dado.



**Figura 17** Esquema Sistema de Navegación Inercial

Fuente: (Franco, 2018)

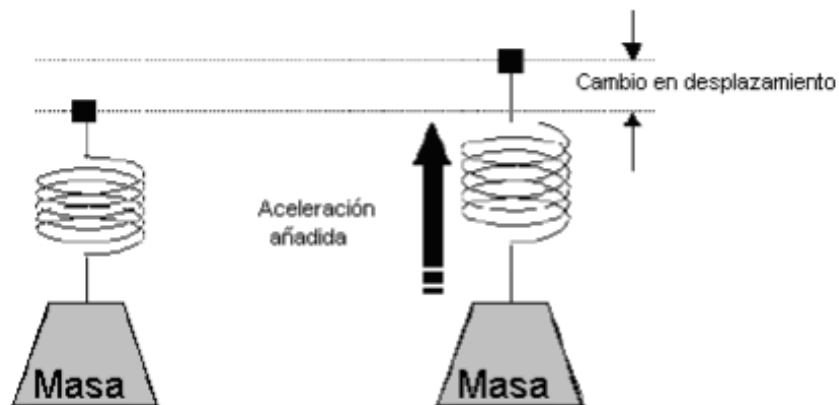
Estos dispositivos funcionan sin necesidad de ayudas externas (como estaciones en tierra), lo que permite su portabilidad y utilización en distintas aplicaciones civiles como militares.

### 2.3.2. Acelerómetro

Un acelerómetro es un sensor que permite medir la vibración que está sintiendo un cuerpo o máquina, transformándola en una magnitud eléctrica que por medio de un

acondicionador refleja la medida de velocidad y desplazamiento además de la determinación de formas de onda y frecuencia (Sergio A. Gómez S.).

Los primeros acelerómetros se basaban en la detección y estimación de la aceleración que experimentaba un cuerpo (masa inercial interna) sujeta a un elemento elástico como se puede observar en la *Figura 18*.



**Figura 18** Principio de Funcionamiento acelerómetro

Fuente: (Franco, 2018)

Las leyes de Newton (J.W. Kane, 2007) se aplican para el cálculo de la aceleración.

$$F = m \cdot a$$

$$F = k \cdot x.$$

$$a = k \cdot x/m$$

Donde F es la fuerza, m la masa, a la aceleración, x es la variación de distancia y k el coeficiente de elasticidad.

En la actualidad existen muchas tecnologías utilizadas en los acelerómetros (piezo-resistivos, térmicos, laser, galgas, etc), y su uso dependerá del tipo de aplicación en que van a ser utilizados.

### **2.3.3. Sistema de Posicionamiento Global**

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una asistencia proporcionada por el Gobierno de los Estados Unidos y administrado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. El sistema de Posicionamiento Global brinda información sobre posicionamiento, navegación y cronometría. (Gobierno de los Estados Unidos).

Los dispositivos GPS se conectan a 24 satélites que orbitan la tierra, de los cuales recibe información para posicionar en el mapa el objeto de interés para el usuario.

El principio de funcionamiento de un GPS es el siguiente:

1. Los satélites GPS emiten señales de radio que proporcionan su ubicación, estado y hora precisa desde los relojes atómicos de a bordo.
2. Las señales de radio GPS viajan a través del espacio a la velocidad de la luz, más de 299.792 km/segundo.
3. Un dispositivo GPS recibe las señales de radio, anotando su hora exacta de llegada, y las utiliza para calcular su distancia de cada satélite a la vista.
4. Una vez que un dispositivo GPS conoce su distancia de al menos cuatro satélites, puede utilizar la geometría para determinar su ubicación en la Tierra en tres dimensiones.

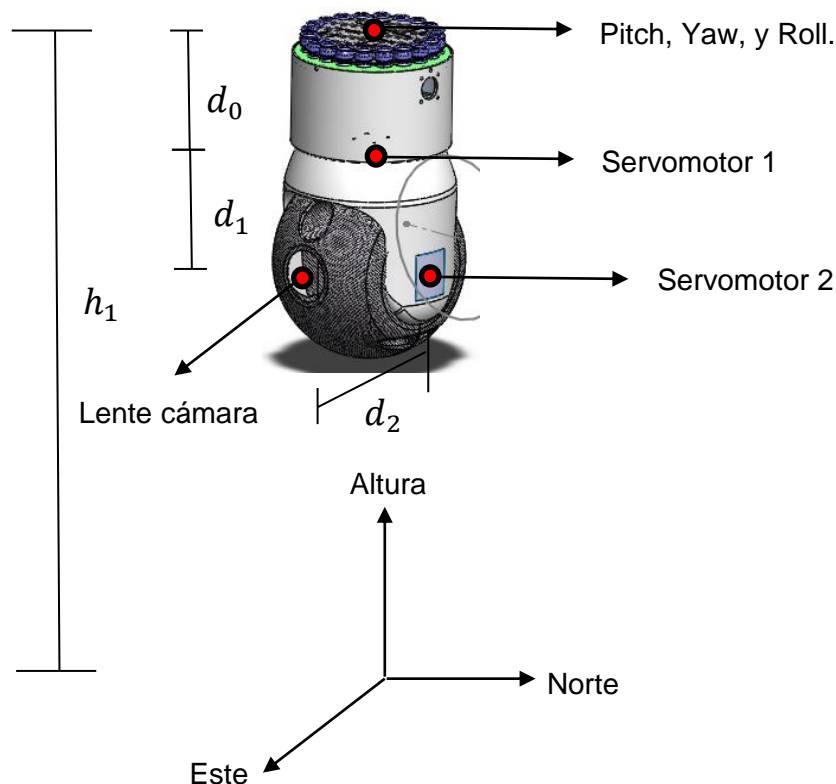


## CAPÍTULO III

### 3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN

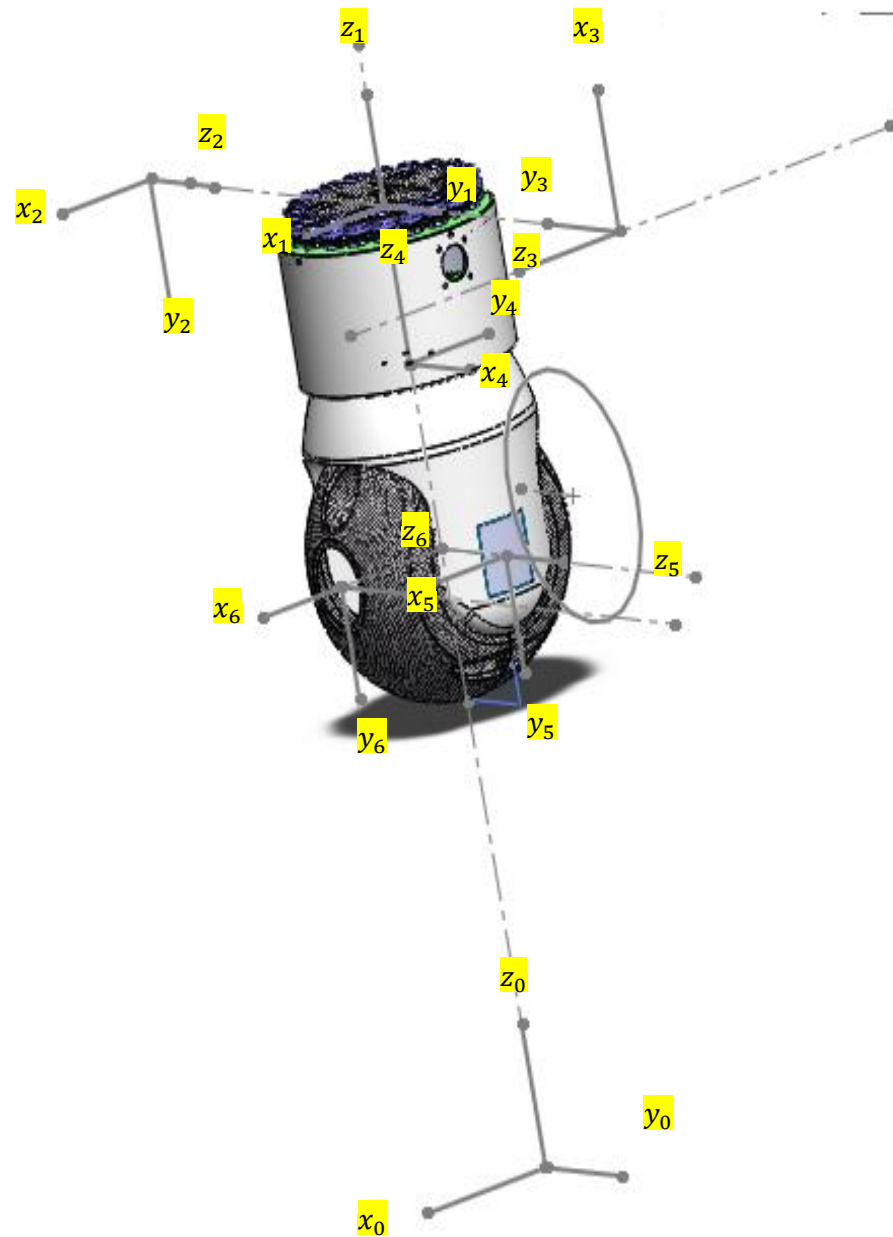
#### 3.1. Cálculo de la Cinemática Directa del Sensor electrooptico.

Para el cálculo de la cinemática directa del sistema Giroestabilizador Aéreo se empleó el algoritmo de Denavit-Hartenberg mismo que se encuentra descrito en el capítulo 2.1.1. Siguiendo los pasos descritos se determina las características y se establece los sistemas de ejes coordenados sobre el Sensor electrooptico.



**Figura 19** Identificación de Elementos Sistema Giroestabilizador Aéreo

Fuente: Autor

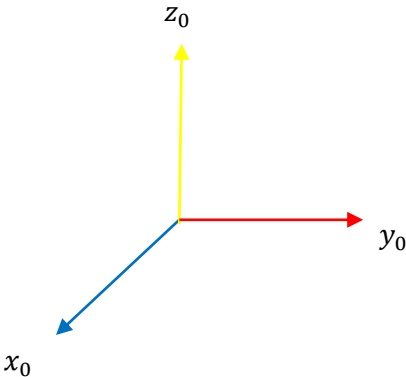
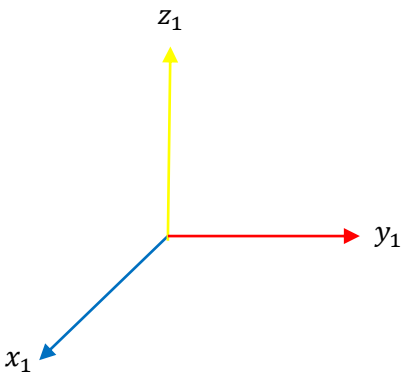
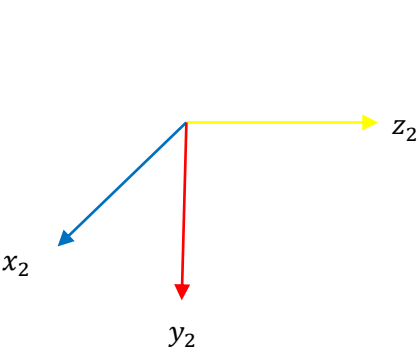
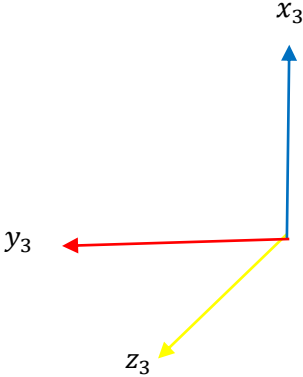
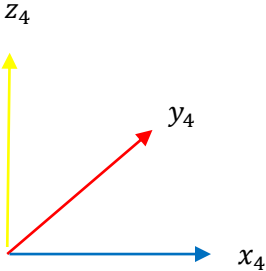
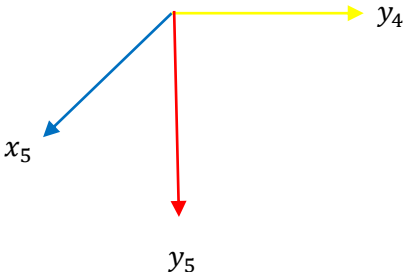


**Figura 20** Sistemas asociados al Giroestabilizador Aéreo

Fuente: Autor

**Tabla 2**

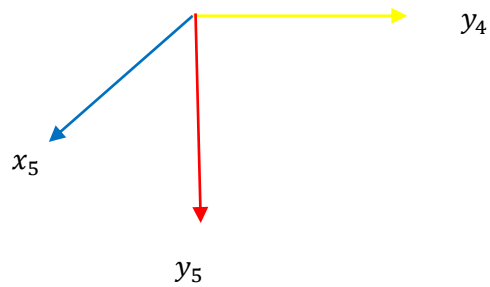
*Tabla de sistemas asociados.*

Sistema $S_0$ (Altímetro)	Sistema $S_1$ (Yaw)
	
Sistema $S_2$ (Pitch)	Sistema $S_3$ (Roll)
	
Sistema $S_4$ (Servomotor 1I)	Sistema $S_5$ (Servomotor 2I)
	

---

**Sistema  $S_6$  (Lente de la cámara)**

---



Establecido los sistemas de ejes coordenados del Sensor electrooptico se siguen los pasos descritos en el capítulo 2.1.1 para determina los parámetros Denavit-Hartenberg.

**Tabla 3**

*Tabla de parámetros D-H*

Articulación		$\theta_{zi-1}$	$d_{zi-1}$	$a_{xi}$	$\alpha_{xi}$
${}^0A_1$	1	0	$h_1$	0	0
${}^1A_2$	2	$q_1$	0	0	-90
${}^2A_3$	3	$q_2 - 90$	0	0	-90
${}^3A_4$	4	$q_3 - 90$	0	$-d_0$	-90
${}^4A_5$	5	$q_4 - 90$	$-d_1$	0	-90
${}^5A_6$	6	$q_5$	0	$+d_2$	0

Con estos parámetros se estable las matrices de transformación homogéneas

${}^{i-1}A_i$ .

$${}^{i-1}A_i = \mathbf{T}(\mathbf{z}, \theta_i) \mathbf{T}(0,0, d_i) \mathbf{T}(a_i, 0,0) \mathbf{T}(\mathbf{x}, \alpha_i)$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(0) & -\sin(0) & 0 \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

${}^1A_2$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 \\ 0 & \sin(-90) & \cos(-90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & -\sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

${}^2A_3$ 

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_2 - 90) & -\sin(q_2 - 90) & 0 & 0 \\ \sin(q_2 - 90) & \cos(q_2 - 90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 \\ 0 & \sin(-90) & \cos(-90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_2 - 90) & -\sin(q_2 - 90) & 0 & 0 \\ \sin(q_2 - 90) & \cos(q_2 - 90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_2 - 90) & 0 & -\sin(q_2 - 90) & 0 \\ \sin(q_2 - 90) & 0 & \cos(q_2 - 90) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

 ${}^3A_4$ 

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_3 - 90) & -\sin(q_3 - 90) & 0 & 0 \\ \sin(q_3 - 90) & \cos(q_3 - 90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 \\ 0 & \sin(-90) & \cos(-90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_3 - 90) & -\sin(q_3 - 90) & 0 & 0 \\ \sin(q_3 - 90) & \cos(q_3 - 90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_3 - 90) & 0 & -\sin(q_3 - 90) & -d_0 \cos(q_3 - 90) \\ \sin(q_3 - 90) & 0 & \cos(q_3 - 90) & -d_0 \sin(q_3 - 90) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

${}^4A_5$ 

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_4 - 90) & -\sin(q_4 - 90) & 0 & 0 \\ \sin(q_4 - 90) & \cos(q_4 - 90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 \\ 0 & \sin(-90) & \cos(-90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_4 - 90) & -\sin(q_4 - 90) & 0 & 0 \\ \sin(q_4 - 90) & \cos(q_4 - 90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_4 - 90) & 0 & -\sin(q_4 - 90) & 0 \\ \sin(q_4 - 90) & 0 & \cos(q_4 - 90) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

 ${}^5A_6$ 

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\sin(q_5) & 0 & 0 \\ \sin(q_5) & \cos(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(0) & -\sin(0) & 0 \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\sin(q_5) & 0 & 0 \\ \sin(q_5) & \cos(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\sin(q_5) & 0 & d_2 \cos(q_5) \\ \sin(q_5) & \cos(q_5) & 0 & d_2 \sin(q_5) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como ya se estableció en el capítulo anterior  ${}^{i-1}A_i$  establece la relación entre sistemas de coordenadas de eslabones continuos, nuestro interés estará en  ${}^0A_6$  la cual obtendremos de:

$$T = {}^0A_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6$$

$$T = {}^0A_5$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & -\sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(q_2 - 90) & 0 & -\sin(q_2 - 90) & 0 \\ \sin(q_2 - 90) & 0 & \cos(q_2 - 90) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(q_3 - 90) & 0 & -\sin(q_3 - 90) & -d_0 \cos(q_3 - 90) \\ \sin(q_3 - 90) & 0 & \cos(q_3 - 90) & -d_0 \sin(q_3 - 90) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(q_4 - 90) & 0 & -\sin(q_4 - 90) & 0 \\ \sin(q_4 - 90) & 0 & \cos(q_4 - 90) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\sin(q_5) & 0 & d_2 \cos(q_5) \\ \sin(q_5) & \cos(q_5) & 0 & d_2 \sin(q_5) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3.2. Implementación del Sistema de Geolocalización por medio de Software.

Una vez establecido todos los cálculos matemáticos necesarios para el sistema de Geolocalización, es necesario su implementación a través de un software compatible con el Sistema de vigilancia y reconocimiento SEO D-1. Para este propósito se optó por el software MATLAB el mismo que puede ser usado dentro de LabView.



El script formulado en MATLAB que representa a la matriz  ${}^{i-1}A_i$

```
function [z]= algoritmoDenivan(Theta,d, a, alpha)
matriz1=[cos(degtorad(Theta)) -sin(degtorad(Theta)) 0 0;
         sin(degtorad(Theta)) cos(degtorad(Theta)) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
matriz2=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 d; 0 0 0 1];
matriz3=[1 0 0 a; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
matriz4=[1 0 0 0; 0 cos(degtorad(alpha)) -sin(degtorad(alpha)) 0;
         0 sin(degtorad(alpha)) cos(degtorad(alpha)) 0; 0 0 0 1];
z=matriz1*matriz2*matriz3*matriz4;
end
```

Donde las matrices matriz1, matriz2, matriz3, matriz4 corresponden a  $\mathbf{T}(z, \theta_i)$   $\mathbf{T}(0,0, d_i)$   $\mathbf{T}(a_i, 0,0)$   $\mathbf{T}(x, \alpha_i)$  respectivamente, por tanto z nos da como resultado  ${}^{i-1}A_i$ .

La función recibirá como insumos para cada  ${}^{i-1}A_i$  los valores correspondientes a la matriz de transformación ya obtenida en el capítulo 3.2. Es decir que para  ${}^0A_1$  los valores de Theta,d, a, alpha serán 0,  $h_1$ , 0,0.

El script formulado en MATLAB representa a la matriz de Transformación  ${}^0A_5$

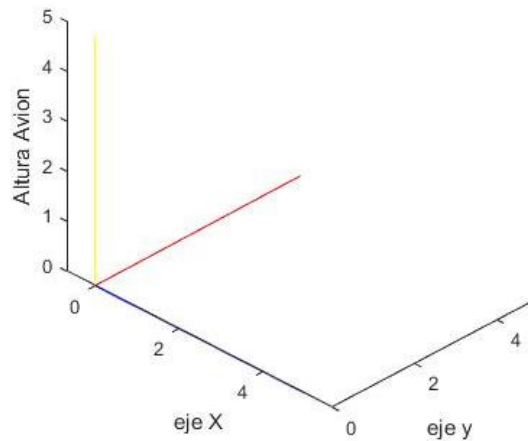
```
function [T]= algoritmoDenivan1(h,q1,q2, q3, q4, q5)
A0=algoritmoDenivan(0,h,0,0);
A1=algoritmoDenivan(q1,0,0,-90);
A2=algoritmoDenivan(q2-90,0,0,-90);
A3=algoritmoDenivan(q3-90,0,-0.08,-90);
A4=algoritmoDenivan(q4-90,-0.1,0,-90);
A5=algoritmoDenivan(q5,0,0.04,0);
T=A0*A1*A2*A3*A4*A5;
end
```

Los valores de h,q1,q2, q3, q4, q5 se ingresara de manera constante y en tiempo real para el cálculo continuo de la matriz de Transformación. Estos valores

corresponderán a la Altura, Yaw, Pitch, Roll, Primer Servomotor, y Segundo Servomotor respectivamente.

Para poder visualizar la posición y orientación del sistema de coordenadas  $S_0$ , se realizó el siguiente Script:

```
hold on
ax=5; %valor arbitrario para gráfica del eje x
ay=5; %valor arbitrario para gráfica del eje y
az=5; %valor arbitrario para gráfica del eje z
axis equal
x=plot3([0;ax],[0;0],[0;0],'b');
y=plot3([0;0],[0;ay],[0;0],'r');
z=plot3([0;0],[0;0],[0;az],'y');
xlabel('eje X')
ylabel('eje y')
zlabel('Altura Avion')
```



**Figura 21** Sistema de Coordenadas  $S_0$  (X,Y,Z respectivamente Azul, Rojo, Amarillo)

Fuente: Autor

En la Figura anterior los ejes graficados son líneas entre dos puntos representados en una matriz de  $4 \times 1$ .

**Tabla 4***Tabla de valores para sistema S0*

<b>Eje x</b>	
Punto Inicial	Punto Final
$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
<b>Eje y</b>	
Punto Inicial	Punto Final
$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 5 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
<b>Eje z</b>	
Punto Inicial	Punto Final
$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \\ 1 \end{bmatrix}$

Para poder representar el sistema de coordenadas  $S_6$  con respecto a  $S_0$  se utiliza la matriz de transformación sabiendo que:

$$\begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{ó} \quad \begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = T * \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

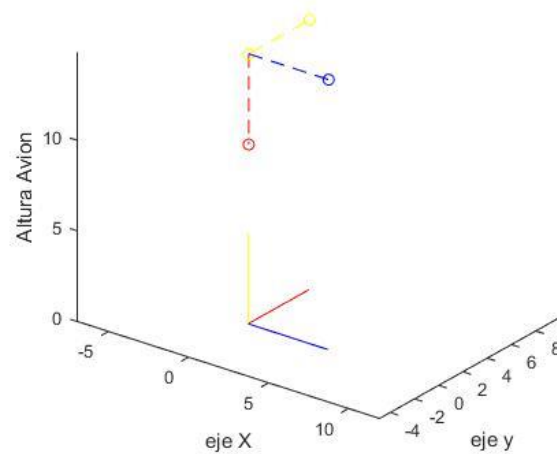
Es por ello que cada uno de los puntos de cada eje debe ser multiplicado por la matriz de transformación para poder obtener la gráfica del sistema de coordenadas  $S_6$  con respecto a  $S_0$ .

```
T=algoritmoDenivan1(15,0,0,0,0,0); %no existe rotaciones solo elevación
x0=T*[0;0;0;1];
y0=T*[0;0;0;1];
```

```

z0=T*[0;0;0;1];
x1=T*[ax;0;0;1];
y1=T*[0;ay;0;1];
z1=T*[0;0;az;1];
x2=plot3([x0(1,1);x1(1,1)],[x0(2,1);x1(2,1)],[x0(3,1);x1(3,1)'],'--bo');
y2=plot3([y0(1,1);y1(1,1)],[y0(2,1);y1(2,1)],[y0(3,1);y1(3,1)'],'--ro');
z2=plot3([z0(1,1);z1(1,1)],[z0(2,1);z1(2,1)],[z0(3,1);z1(3,1)'],'--yo');

```



**Figura 22** Sistema S6 con respecto a S0 sin rotaciones.

Fuente: Autor

Una vez ejecutado el Script podemos obtener los puntos correspondientes al sistema de coordenadas  $S_6$  los cuales fueron graficados con líneas entrecortadas.

**Tabla 5**

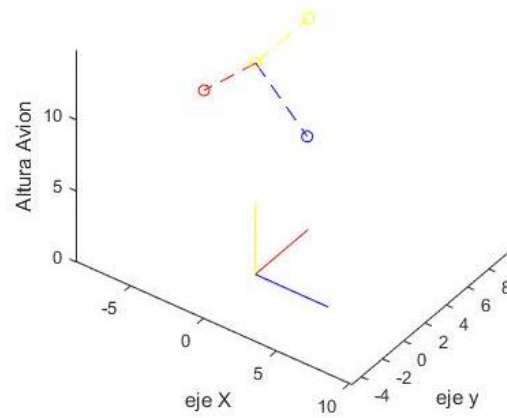
*Tabla de valores para sistema S6*

<b>Eje x</b>	
Punto Inicial	Punto Final
$\begin{bmatrix} 0.04 \\ 0 \\ 14.9 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5.04 \\ 0 \\ 14.9 \\ 1 \end{bmatrix}$
<b>Eje y</b>	
Punto Inicial	Punto Final
$\begin{bmatrix} 0.04 \\ 0 \\ 14.9 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.04 \\ 0 \\ 9.90 \\ 1 \end{bmatrix}$
<b>Eje z</b>	
Punto Inicial	Punto Final
$\begin{bmatrix} 0.04 \\ 0 \\ 14.9 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.04 \\ 5 \\ 14.90 \\ 1 \end{bmatrix}$

Como se puede apreciar la *Figura 22* coincide con la *Figura 20* donde graficamos el sistema de coordenadas  $S_0$  y  $S_6$ .

De la misma manera se puede realizar cambios en de cada una de las articulaciones móviles y se podrá apreciar la posición y orientación del sistema  $S_6$  con respecto a  $S_0$ .

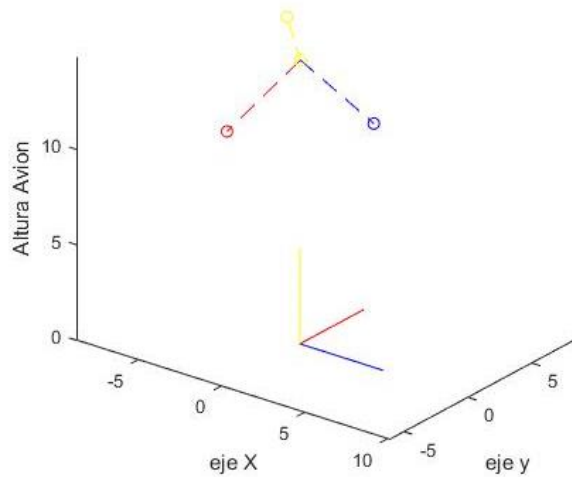
Con  $T = \text{algoritmoDenivan1}(15, 0, 0, 0, 0, 45)$ ; tendremos:



**Figura 23** Sistema S6 con respecto a S0 rotación  $q_5$  en 45 grados.

Fuente: Autor

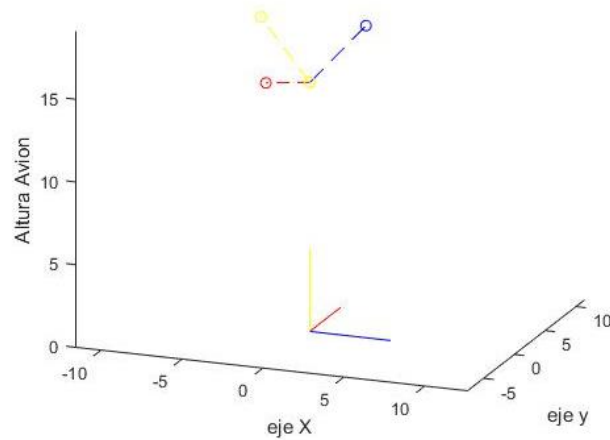
Con  $T = \text{algoritmoDenivan1}(15, 0, 0, 0, 45, 45)$ ; tendremos:



**Figura 24** Sistema S6 con respecto a S0 rotación  $q_4$  y  $q_5$  en 45 grados.

Fuente: Autor

Con  $T = \text{algoritmoDenivan1}(15, 30, 10, 90, 45, 27)$ ; tendremos:



**Figura 25** Sistema  $S_6$  con respecto a  $S_0$  rotación  $q_1, q_2, q_3, q_4, y q_5$ .

Fuente: Autor

Una vez establecido la orientación del sistema de coordenadas  $S_6$  se infiere que el eje X de dicho sistema corresponde a la dirección donde apunta la cámara del sistema SEO D-1. Como ya se mencionó cada eje graficado del sistema de coordenadas  $S_6$  corresponde a dos puntos obtenidos de la multiplicación de la matriz de transformación  $T$  con los puntos de referencia del sistema  $S_0$ . Estos puntos obtenidos serán utilizados para obtener una ecuación de la recta en el espacio  $R^3$  misma que podría extenderse por todo el espacio tridimensional, pero que para nuestro propósito solo será necesario establecer los puntos de la recta que intersectan con el plano  $Z = 0$ . (Claude Irwin, 1973)

Las ecuaciones simétricas de la recta son las siguientes (KINDLE, 1987):

:

$$\frac{x - x_0}{v_1} = \frac{y - y_0}{v_2} = \frac{z - z_0}{v_3}$$

$$v_1 = x_1 - x_0$$

$$v_2 = y_1 - y_0$$

$$v_3 = z_1 - z_0$$

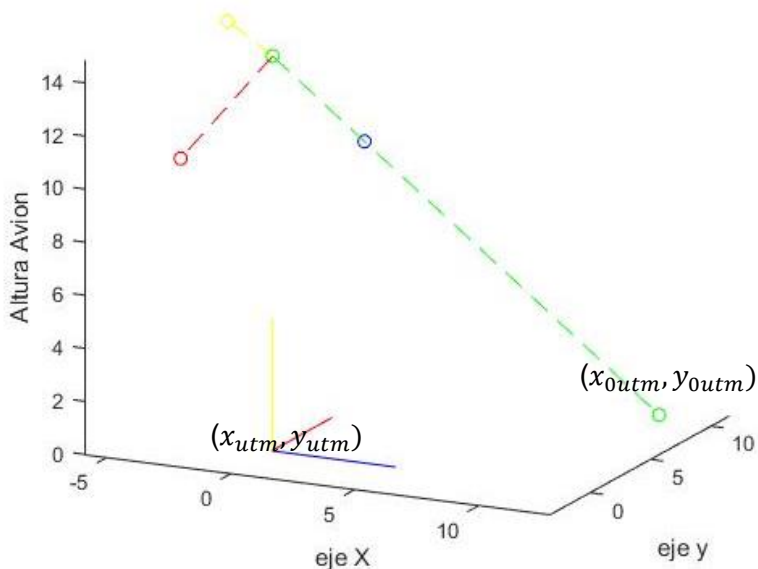
Conocido dos puntos y con la consideración de  $Z = 0$ , se puede despejar las ecuaciones para obtener los puntos X, Y en el plano  $Z = 0$ .

$$y = \frac{-z_0 * v_2}{v_3} + y_0$$

$$x = \frac{-z_0 * v_1}{v_3} + x_0$$

De esta manera se puede tener una recta que representa la proyección de la lente de la cámara hacia el suelo.

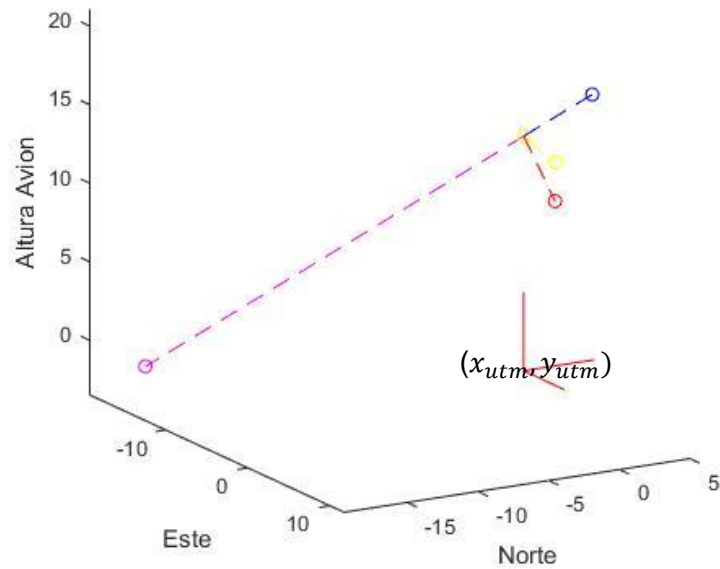




**Figura 26** Proyección de la recta en R3 y puntos de Intersección con Plano  $Z=0$

Fuente: Autor

Una vez obtenido los valores de X y Y que intersectan plano  $Z=0$  estos puntos se los denominara  $x_{outm}, y_{outm}$ , los cuales son los valores diferenciales en X y Y con respecto al sistema  $S_0$ . En el caso de que la pendiente de la recta proyectada resulte negativa los valores de X y Y que intersectan el plano  $Z=0$  no serán válidos y  $x_{outm}, y_{outm}$  serán igual a 0.



**Figura 27** Puntos de Intersección NO VALIDOS con Plano  $Z=0$

Fuente: Autor

Para poder representar las condiciones de la recta se establece el siguiente

Script.

```

v=x1-x0;
mo=-x1(3,1)/v(3,1);
if mo>0 %condición para evitar valores no acordes
    y0utm=mo*v(2,1)+x1(2,1);
    x0utm=mo*v(1,1)+x1(1,1);
    gps=[x0utm;y0utm;0];

    laser=plot3([x0(1,1);gps(1,1)], [x0(2,1);gps(2,1)], [x0(3,1);gps(3,1)
    ], '--mo');
else
    y0utm=0;
    x0utm=0;
    gps=[x0utm;y0utm;0];
end

```

Para determinar las coordenadas geográficas que representan los puntos  $x_{outm}, y_{outm}$ , será necesario primero pasar las coordenadas geográficas del sensor electrooptico a UTM ( $x_{utm}, y_{utm}$ ). De esta manera las coordenadas del objetivo en tierra estará dada por:

$$x_{target} = x_{utm} + x_{outm}$$

$$y_{target} = y_{utm} + y_{outm}$$

Finalmente los valores de  $x_{target}$  y  $y_{target}$  se los pasara a coordenadas geográficas dándonos así la localización geográfica del objetivo al que apunta la cámara.

Para la conversión de las coordenadas geográfica a UTM y viceversa se implementan las fórmulas del capítulo 2.2.2 en un script de MATLAB.

#### Coordenadas Geográficas a UTM:

```
function [x,y,meridianoC]=geoautmCotticia(latitud,longitud)

a=6378388; %semieje mayor
b=6356911.946; %semiejemenor
e1=(a^2-b^2)/a^2;%excentricidad 1
e1=sqrt(e1);
e2=(a^2-b^2)/b^2;%excentricidad 2
e2=sqrt(e2);
c=a^2/b; %radio polar de curvatura
k0=0.9996;
Huso=floor(abs(longitud/6+31));%huso
meridianoC=Huso*6-183;
DeltaLambda=degtorad(longitud)-(meridianoC*pi/180);
A=cos(degtorad(latitud))*sin(DeltaLambda);
xi=1/2*log((1+A)/(1-A));
Eta=atan(tan(degtorad(latitud)))/cos(DeltaLambda)-degtorad(latitud);
ni=k0*c/sqrt((1+e2^2*(cos(degtorad(latitud))^2)));
zeta=(e2^2/2)*xi^2*(cos(degtorad(latitud))^2);
a1=sin(2*degtorad(latitud));
a2=a1*(cos(degtorad(latitud))^2);
```

```

j2=degtorad(latitud)+a1/2;
j4=((3*j2)+a2)/4;
j6=((5*j4)+a2*(cos(degtorad(latitud))^2))/3;
alfa=3/4*e2^2;
beta=5/3*alfa^2;
gamma=35/27*alfa^3;
Bfi=k0*c*(degtorad(latitud)-(alfa*j2)+(beta*j4)-(gamma*j6));
x=xi*ni*(1+zeta/3)+500000;
if latitud<0
y=Eta*ni*(1+zeta)+Bfi+10000000;
else
y=Eta*ni*(1+zeta)+Bfi ;
end
end

```

### Coordenadas UTM a Geográficas:

```

function [latitud,longitud]=utmageoCotticia(X,Y,latitud,meridianoC)

if latitud>0
    y=Y;
else
    y= Y-10000000;
end
a=6378388; %semieje mayor
b=6356911.946; %semiejemenor
e1=(a^2-b^2)/a^2;%excentricidad 1
e1=sqrt(e1);
e2=(a^2-b^2)/b^2;%excentricidad 2
e2=sqrt(e2);
c=a^2/b; %radio polar de curvatura
k0=0.9996;

fiprima=y/(6366197.724*k0);
ni=k0*c/sqrt((1+e2^2*cos(fiprima)^2));
a=(X-500000)/ni;
A1=sin(2*fiprima);
A2=A1*cos(fiprima)^2;
J2=fiprima+A1/2;
J4=(3*J2+A2)/4;
J6=(5*J4+A2*cos(fiprima)^2)/3;
alfa=(3/4)*e2^2;
beta=5/3*alfa^2;
gamma=35/27*alfa^3;
Bfi=k0*c*(fiprima-alfa*J2+beta*J4-gamma*J6);
bi=(y-Bfi)/ni;
zeta=((e2^2*a^2)/2)*cos(fiprima)^2;
xi=a*(1-zeta/3);
eta=bi*(1-zeta)+fiprima;
sen=(exp(xi)-exp(-xi))/2;
deltal=atan(sen/cos(eta));

```

```

tau=atan(cos(deltal)*tan(eta));
longitud=deltal/pi*180+meridianoC;
fira=fiprima+(1+e2^2*cos(fiprima)^2-
3/4*e2^2*sin(fiprima)*cos(fiprima))*(tau-fiprima);
latitud=fira/pi*180;
end

```

### 3.2. Simulaciones del Sistema de Geolocalización

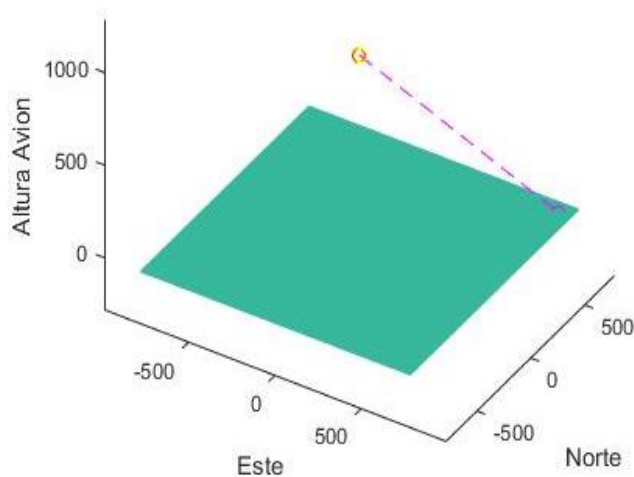
Para realizar las simulaciones del sistema de Geolocalización de Objetivos en MATLAB se debe partir de parámetros ya obtenidos por la estación en tierra, valores tales como la Altura, Yaw, Pitch, Roll, variación de ángulo del servomotor 1, variación de ángulo del servomotor 2, y las coordenadas geográficas del sensor electrooptico cuando se encuentra en determinado periodo de tiempo. Es importante mencionar que, a diferencia de la detección de objetivos o regiones de interés (Aguilar, Casalglla, & Pólit, Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles, 2017), (Aguilar, Salcedo, Sandoval, & Cobeña, 2017), (Aguilar, Casalglla, Pólit, Abad, & Ruiz, Obstacle Avoidance for Flight Safety on Unmanned Aerial Vehicles, 2017), (Aguilar, Casalglla, & Pólit, Obstacle Avoidance for Low-Cost UAVs, 2017), la localización del objetivo se basa en las coordenadas del centro de la imagen.

**Tabla 6**

*Tabla de valores Parámetros Escenario 1*

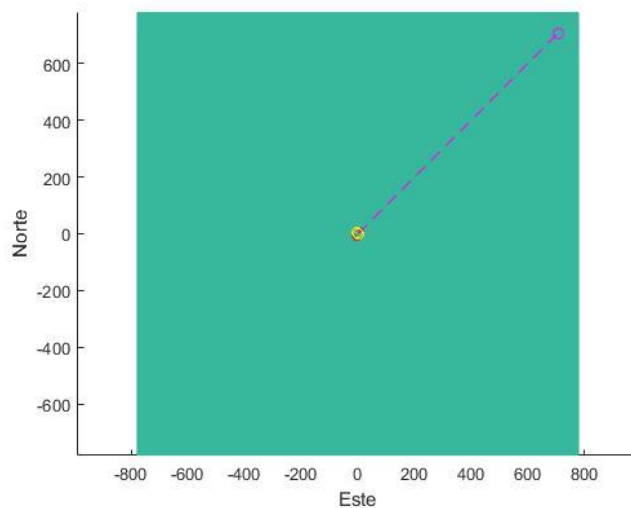
Parámetro	Valor
<b>Coordenadas Geográficas (Sensor electrooptico)</b>	(1.285309,-78.834736)
<b>Altura</b>	1000 m
<b>Yaw</b>	0°
<b>Pitch</b>	0°
<b>Roll</b>	0°
<b>Servomotor 1</b>	45°
<b>Servomotor 2</b>	45°

Con estos valores conocidos los resultados obtenidos son los siguientes:



**Figura 28** Simulación Parámetros 1 en MATLAB

Fuente: Autor



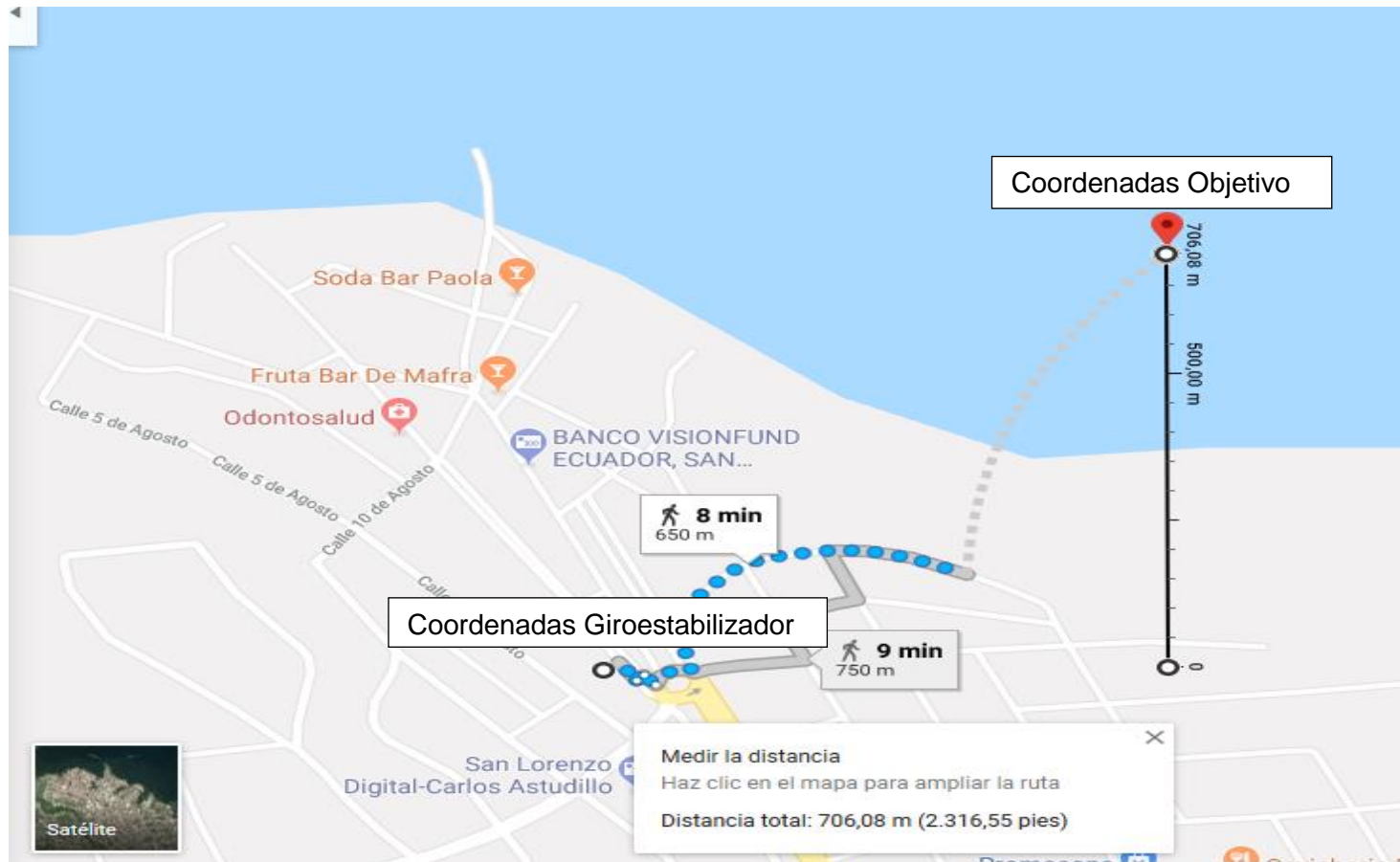
**Figura 29** Simulación Parámetros 1 en MATLAB (Vista Superior)

Fuente: Autor

### Tabla 7

*Tabla de resultados Escenario 1*

Parámetro	Valor
<b>Xutm (Giroestabilizador Aereo)</b>	7.409466249039110e+05
<b>Yutm (Giroestabilizador Aereo)</b>	1.421692420845669e+05
<b>xoutm</b>	7.070360705084230e+02
<b>youtm</b>	7.070360705084230e+02
<b>xtarget</b>	7.416536609744194e+05
<b>ytargat</b>	1.428762781550754e+05
<b>Coordenadas del Objetivo</b>	(1.291695931165799,- 78.828379873412587)



**Figura 30** Ubicación de Objetivo parámetros 1 en Google Maps

Fuente: (Google, 2018)

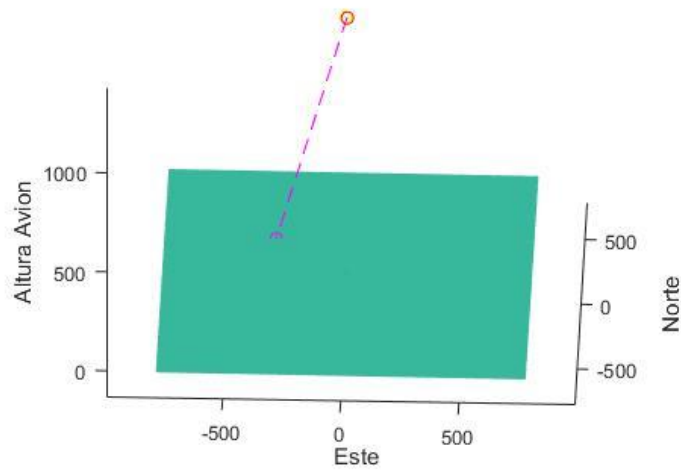


**Tabla 8**

Tabla de valores Parámetros Escenario 2

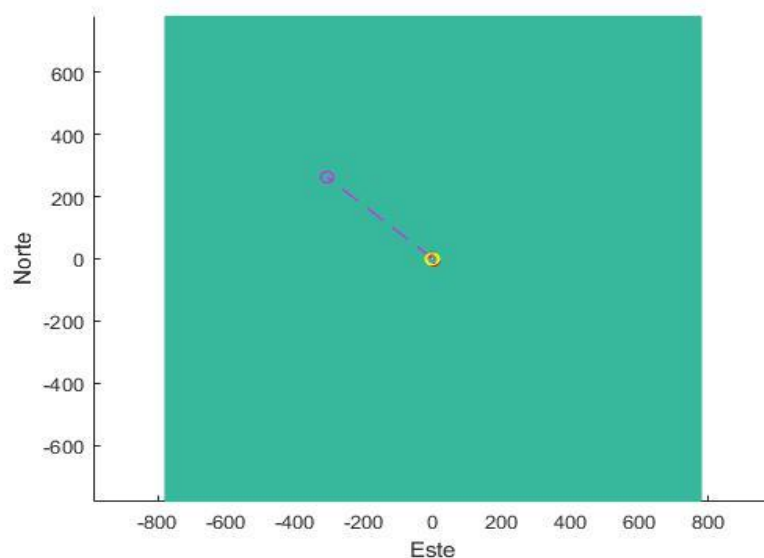
Parámetro	Valor
Coordenadas Geográficas (Sensor electrooptico)	(-3.329319, -79.808271)
Altura	1300 m
Yaw	150 <sup>0</sup>
Pitch	-10 <sup>0</sup>
Roll	5 <sup>0</sup>
Servomotor 1	-45 <sup>0</sup>
Servomotor 2	80 <sup>0</sup>

Con estos valores conocidos los resultados obtenidos son los siguientes:



**Figura 31** Simulación Parámetros 2 en MATLAB

Fuente: Autor



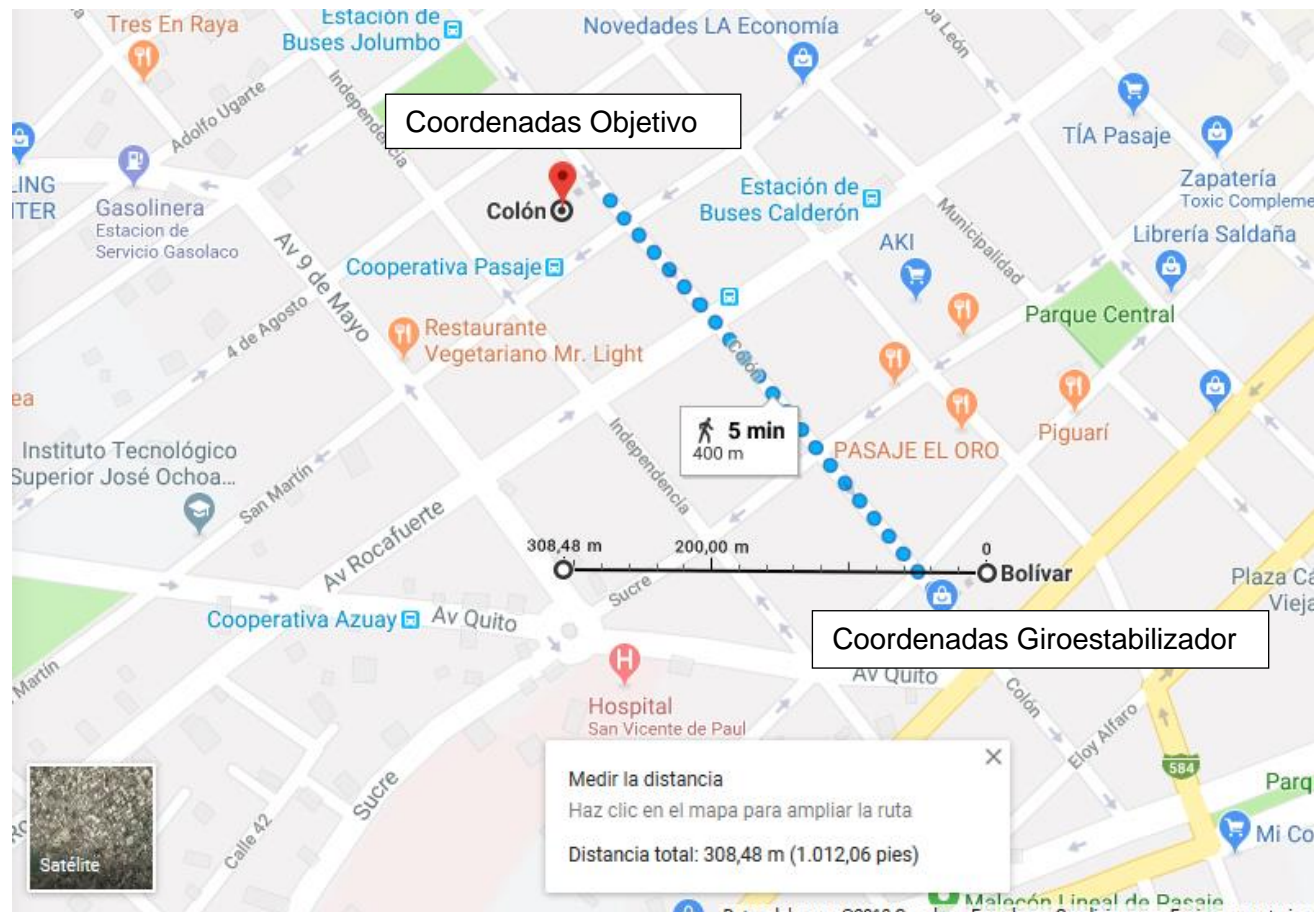
**Figura 32** Simulación Parámetros 2 en MATLAB (Vista Superior)

Fuente: Autor

### Tabla 9

*Tabla de resultados Escenario 2*

Parámetro	Valor
<b>Xutm (Giroestabilizador Aereo)</b>	6.324020433548414e+05
<b>Yutm (Giroestabilizador Aereo)</b>	9.631921889423288e+06
<b>xoutm</b>	-3.088892207635133e+02
<b>youtm</b>	2.630028991630563e+02
<b>xtarget</b>	6.320931541340780e+05
<b>ytargt</b>	9.632184892322451e+06
<b>Coordenadas del Objetivo</b>	(-3.326945156607703,- 79.811053707639246)



**Figura 33** Ubicación de Objetivo parámetros 2 en Google Maps

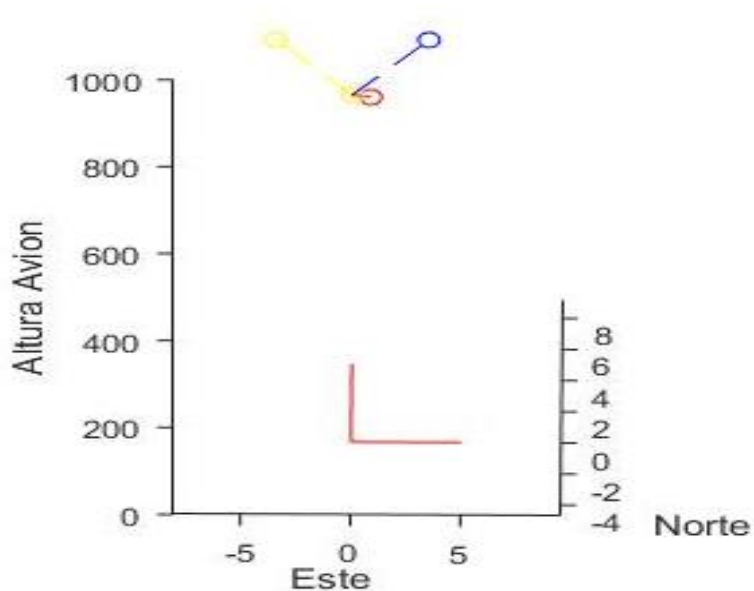
Fuente: (Google, 2018)

**Tabla 10**

*Tabla de valores Parámetros Escenario 3*

Parámetro	Valor
<b>Coordenadas Geográficas (Sensor electrooptico)</b>	(-3.329319, -79.808271)
Altura	800 m
Yaw	0 <sup>0</sup>
Pitch	-10 <sup>0</sup>
Roll	0 <sup>0</sup>
Servomotor 1	45 <sup>0</sup>
Servomotor 2	0 <sup>0</sup>

Con estos valores conocidos los resultados obtenidos son los siguientes:



**Figura 34** Simulación Escenario 3

Fuente: Autor

En este escenario la lente de la cámara está apuntando hacia el cielo por lo que las coordenadas geográficas del objetivo serán simplemente las coordenadas geográficas del sensor electrooptico.

**Tabla 11***Tabla de resultados Escenario 3*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Xutm (Giroestabilizador Aereo)</b>	6.324020433548414e+05
<b>Yutm (Giroestabilizador Aereo)</b>	9.631921889423288e+06
<b>xoutm</b>	0
<b>youtm</b>	0
<b>xtarget</b>	6.324020433548414e+05
<b>ytargat</b>	9.631921889423288e+06
<b>Coordenadas del Objetivo</b>	(-3.329319, -79.808271)

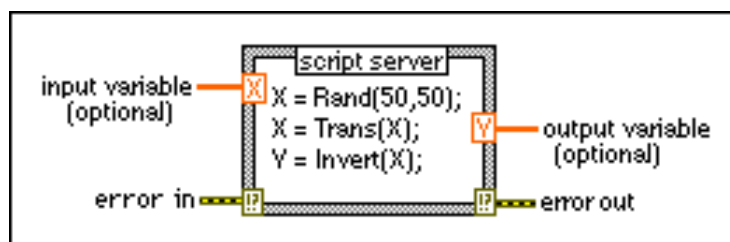
## CAPÍTULO V

### 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1. Implementación de Software en Estación en Tierra

Ya que el HMI de la estación en tierra fue desarrollado completamente en labview se vio necesario la utilización de la herramienta MATLAB script para labVIEW para la implementación del sistema de Geolocalización.

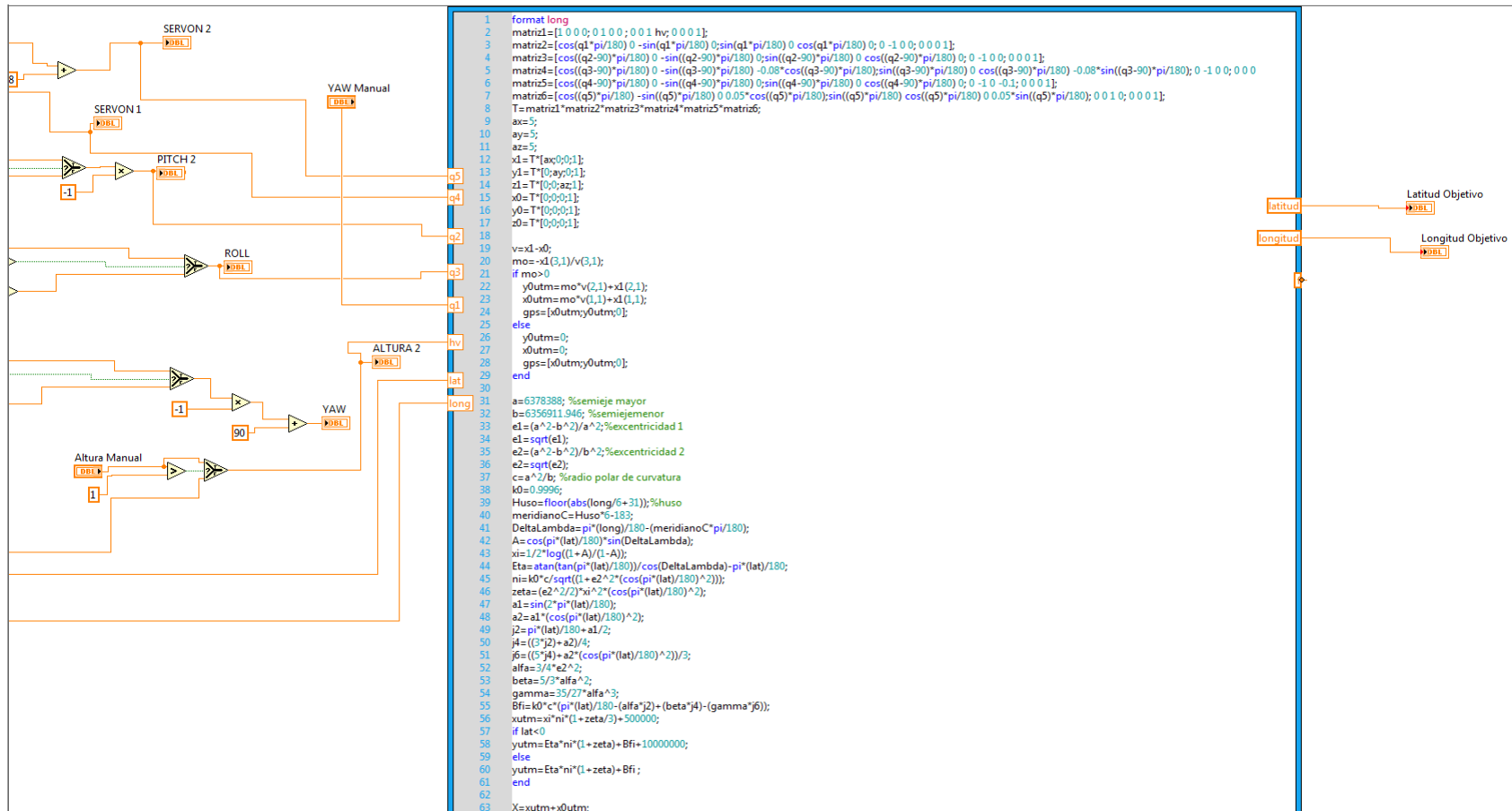
La herramienta MATLAB script permite escribir líneas de código utilizando las variables existentes dentro de Labview y a su vez permite mostrar las variables obtenidas en el script.



**Figura 35** Bloque de MATLAB scrip en LabVIEW.

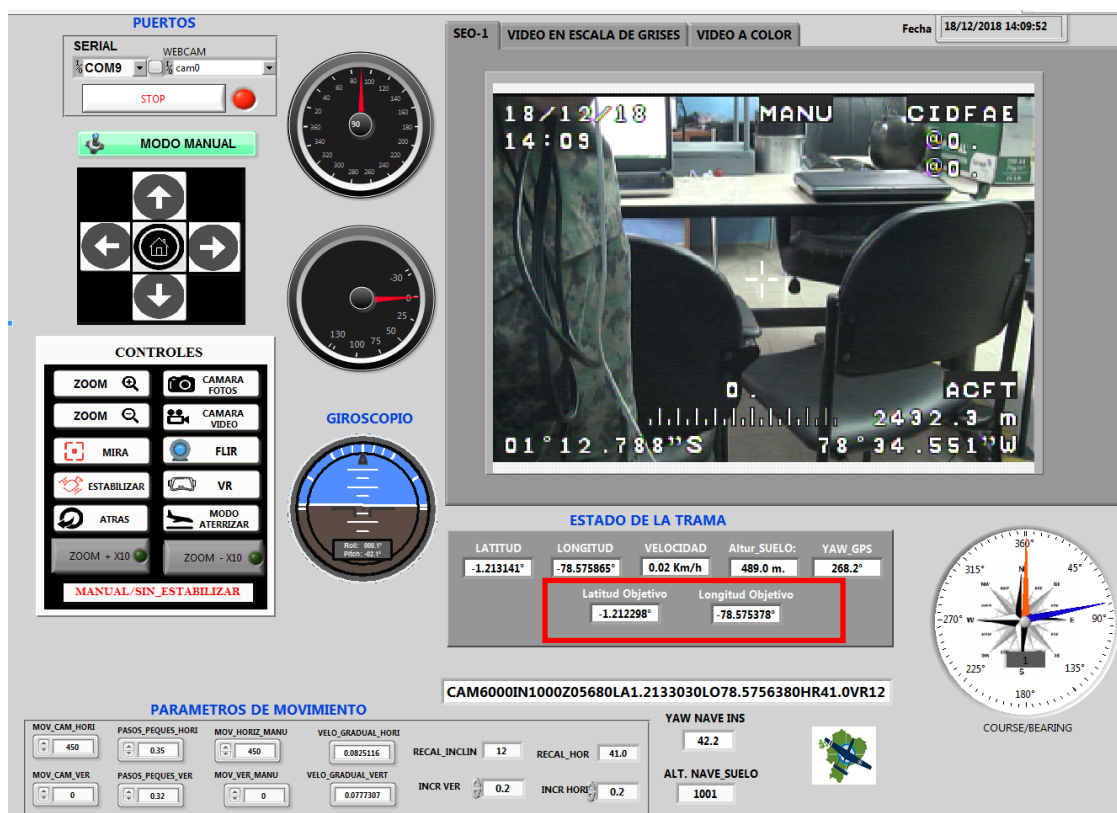
Fuente: (Instrument, 2018)

Las variables de entradas serán los valores de altura (Hv), Yaw (q1), Pitch (q2), Roll (q3), Servomotor 1 (q4), Servomotor 2 (q5), latitud y longitud del Gimbal, mientras que las variables de salida serán la longitud y latitud del objetivo al cual apunta la cámara.



**Figura 36** Implementación MATLAB script en LabVIEW

Fuente: Autor



**Figura 37** HMI con coordenadas del Objetivo

Fuente: Autor

#### 4.2. Pruebas de Funcionamiento en Diversos Escenarios.

Para las pruebas del sistema de Geolocalización se utilizó 3 diferentes ubicaciones elevadas y se apuntó a 2 objetivos diferentes, para posteriormente ingresar las coordenadas del objetivo en Google Maps y así verificar la efectividad del sistema.

**Ubicación:** Torre de Control (5 m)

**Objetivo:** Sello del CID-FAE

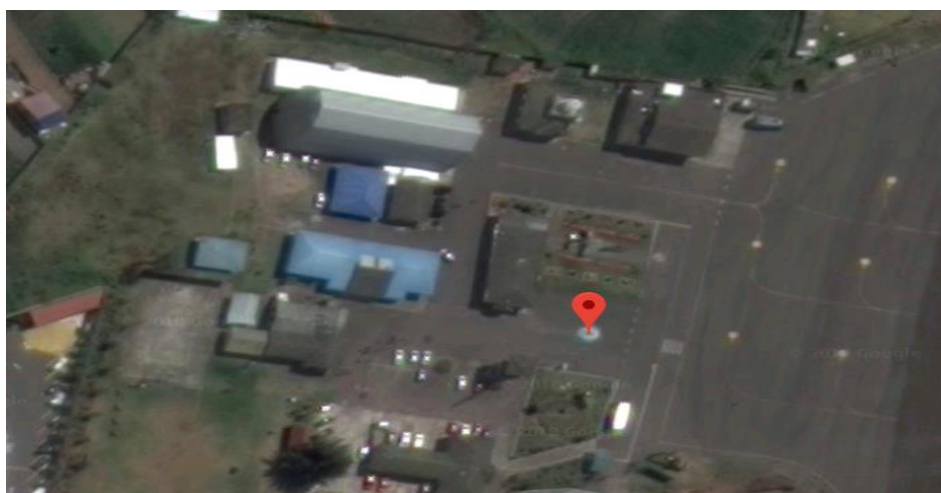




**Figura 38** Pantalla HMI Plataforma de Formación

Fuente: Autor

Latitud Objetivo	Longitud Objetivo
-1.213747	-78.575850



**Figura 39** Vista satelital Sello CID-FAE

Fuente: Autor

**Ubicación:** Torre de Control (5 m)

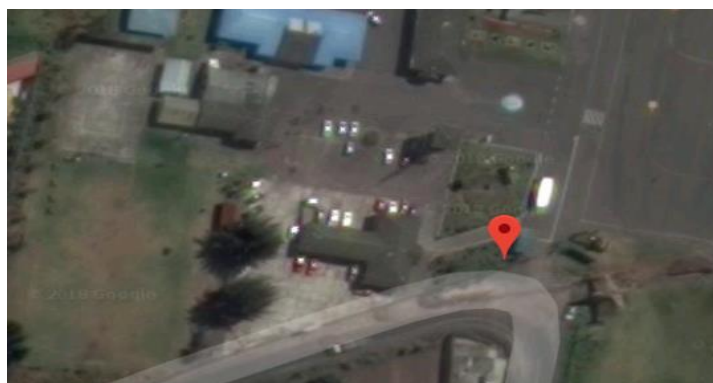
**Objetivo:** Prevención CID-FAE



**Figura 40** Pantalla HMI Prevención CID-FAE

Fuente: Autor

Latitud Objetivo	Longitud Objetivo
-1.214142	-78.575866



**Figura 41** Vista satelital Prevención CID-FAE

Fuente: Autor

**Ubicación:** Edificio de Solca (13 m)

**Objetivo:** Vehículos Estacionados.



**Figura 42** Pantalla HMI Parqueadero SOLCA

Fuente: Autor

Latitud Objetivo	Longitud Objetivo
-1.213904	-78.577730



**Figura 43** Vista satelital Vehículos en Solca

Fuente: Autor

**Ubicación:** Edificio de Solca (13 m)

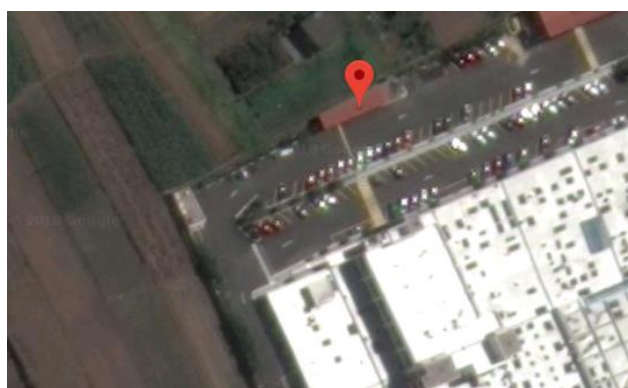
**Objetivo:** Bloque bombas de Agua.



**Figura 44** Pantalla HMI Bloque techo rojo SOLCA

Fuente: Autor

Latitud Objetivo	Longitud Objetivo
-1.213744	-78.577858



**Figura 45** Vista satelital Bomba de Agua en Solca

Fuente: Autor

**Ubicación:** Edificio José Julián Martí (10 m)

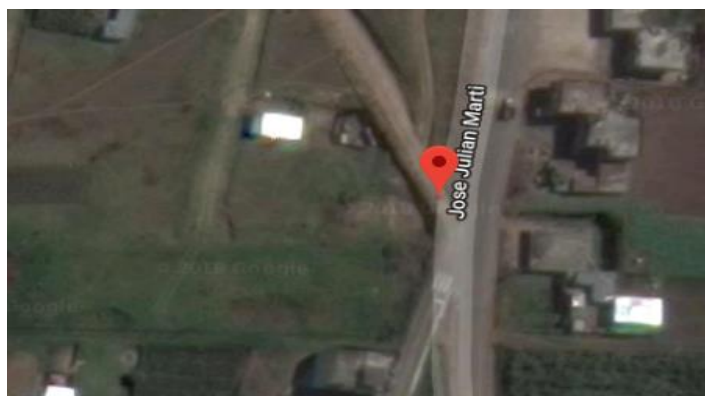
**Objetivo:** Intersección de calles



**Figura 46** Pantalla HMI Intersección Calles Ambato

Fuente: Autor

Latitud Objetivo	Longitud Objetivo
-1.213264	-78.570904



**Figura 47** Vista satelital intersección de calles

Fuente: Autor



**Ubicación:** Edificio José Julián Martí

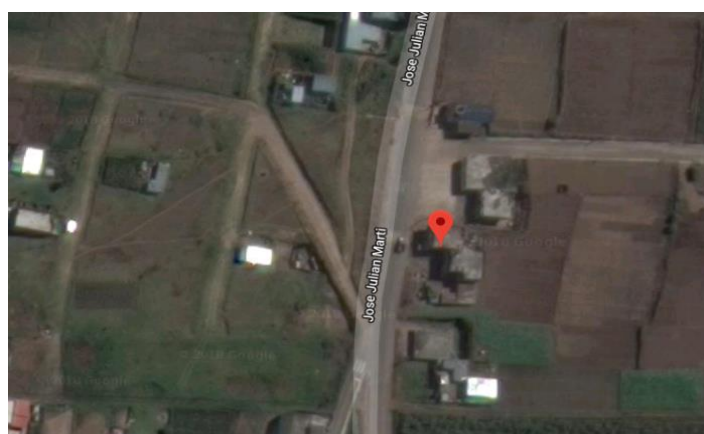
**Objetivo:** Parte Inferior del Edificio José Julián Martí



**Figura 48** Pantalla HMI edificio José Martí

Fuente: Autor

Latitud Objetivo	Longitud Objetivo
-1.213087	-78.570691



**Figura 49** Vista satelital Edificio José Julián Martí

Fuente: Autor

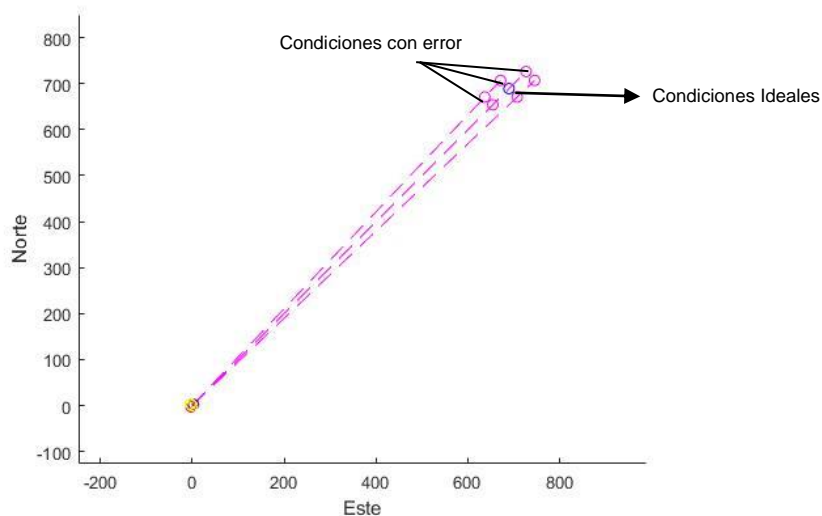
### 4.3. Estimación del Error del Sistema de Geolocalización.

Debido a que el sistema de Geolocalización de objetivos utiliza como datos los valores de las rotaciones de cada articulación, su exactitud dependerá de la resolución de los elementos electrónicos que proveen esta información en el SEO-D1 (IMU y los servomotores).

La IMU utilizada en el sensor electróptico SEO-D1 es la MicroStrain 3DM-GX5-25 misma que presenta una resolución en su actitud menor al 0.01 grados (Sensing, 2019) por lo que no es un valor significativo para el cálculo del error, mientras que los servomotores utilizados para realizar los giros de la cámara servo Hitec HS-785HB (Servocity, 2019) presentaron en la práctica una sensibilidad de aproximadamente 1.5 grados. Es por ello que los valores de las coordenadas geográficas estarán altamente influenciados por los valores de  $q_4$  y  $q_5$ .

Para determinar estos valores de error nos enfocaremos en la proyección de la recta en R3 misma que representa la orientación de la lente de la cámara, esto se ve en la *Figura 26*.

Concentrándonos únicamente en la recta proyectada podemos analizar el alcance en horizontal y la variación del alcance (error en metros) producido por la resolución de  $q_4$  y  $q_5$ .

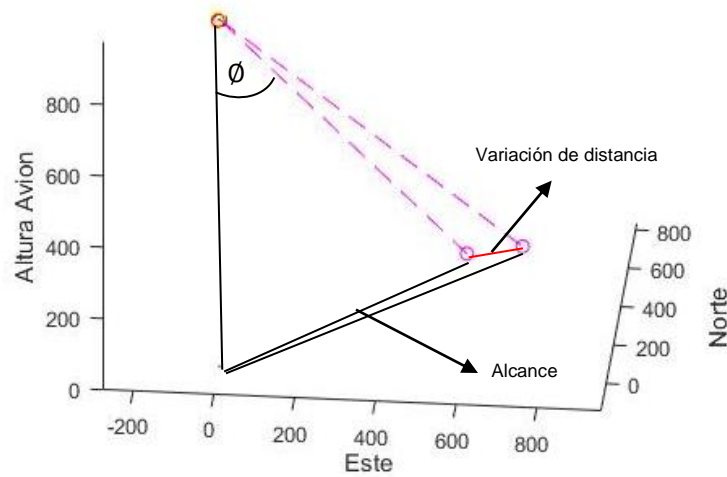


**Figura 50** Error producido por q4 y q5

Fuente: Autor

La condición de error con la variación de distancia más alta se produce con  $(q4+1.5, q5+1.5)$  y  $(q4-1.5, q5-1.5)$ , por lo que para realizar la tabla para el cálculo del error se tomaran estas condiciones. El cálculo del error se basará además de la altura a la cual el SEO-D1 ha sido probado en múltiples misiones de vuelo (3200 pies ó 975 m).





**Figura 51** Error producido  $q4+1.5$ , y  $q5+1.5$

Fuente: Autor

El cálculo del error estará dado por  $\Delta y$  y  $\Delta x$  los cuales son los valores diferenciales entre los valores en condiciones ideales y los valores en condiciones con error Figura 50.

$$\Delta y = |y(q4, q5) - y(q4 \pm 1.5, q5 \pm 1.5)|$$

$$\Delta x = |x(q4, q5) - x(q4 \pm 1.5, q5 \pm 1.5)|$$

Y la variación de la distancia vendrá dada por:

$$\text{variacion distancia} = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2}$$

Una vez determinado estos valores el cálculo final del error vendrá dado por el Error Cuadrático Medio (RMSE) sobre  $\Delta y$  y  $\Delta x$ . En vista que RMSE es utilizado ampliamente en aplicaciones donde se compara dos conjuntos de datos. (ArcGeek, 2019) (T. Chai, 2014) (Freedman, 1993)

$$RMSE(\Delta y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y)^2}{n}} \quad RMSE(\Delta x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x)^2}{n}}$$

Tabla 12

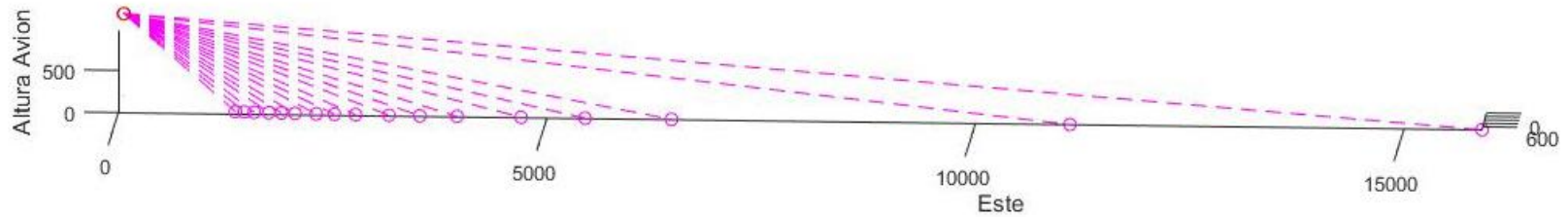
Tabla de valores para estimación del error en condiciones de simulación

	Q4	Q4 +/- error	Q5	Q5 +/- error	$\emptyset$	$\emptyset$ +error	Alcance	Diferencial x	Diferencial x cuadrado	Diferencial y	Diferencial y cuadrado	Variación de Distancia	Variación de Distancia (%)	
1	5	3.5	5	3.5	84,99948	86,4996	1,1143E+04	4,8090E+03	2,3126E+07	1,8914E+00	3,5774E+00	4808,989233	43,1565%	
2	5	6.5	5	6.5	84,99948	83,499332	1,1143E+04	2599,1704	6,7557E+06	2,55700791	6,5383E+00	2599,171662	23,3253%	
3	10	8.5	10	8.5	79,9989	81,499126	5,5289E+03	1,0066E+03	1,0133E+06	4,1025E+00	1,6830E+01	1006,629036	18,2066%	
4	10	11.5	10	11.5	79,9989	78,498815	5,5289E+03	749,345672	5,6152E+05	4,7604839	2,2662E+01	749,3607932	13,5535%	
5	15	13.5	15	13.5	74,9984492	76,498606	3,6384E+03	4,3415E+02	1,8849E+05	6,2823E+00	3,9468E+01	434,1956662	11,9338%	
6	15	16.5	15	16.5	74,9984492	73,49829	3,6384E+03	358,727209	1,2869E+05	6,927728477	4,7993E+01	358,7940971	9,8614%	
7	20	18.5	20	18.5	69,997923	71,498081	2,6785E+03	2,4612E+02	6,0575E+04	8,4144E+00	7,0802E+01	246,2635304	9,1941%	
8	20	21.5	20	21.5	69,997923	68,497764	2,6785E+03	214,265136	4,5910E+04	9,042248974	8,1762E+01	214,4558483	8,0066%	
9	25	23.5	25	23.5	64,9973941	66,497553	2,0906E+03	1,6136E+02	2,6036E+04	1,0482E+01	1,0988E+02	161,6962767	7,7343%	
10	25	26.5	25	26.5	64,9973941	63,497236	2,0906E+03	144,892254	2,0994E+04	11,08795246	1,2294E+02	145,3158903	6,9508%	
11	30	28.5	30	28.5	59,9968674	61,497025	1,6885E+03	1,1560E+02	1,3364E+04	1,2471E+01	1,5552E+02	116,2741049	6,8861%	
12	30	31.5	30	31.5	59,9968674	58,496711	1,6885E+03	105,89141	1,1213E+04	13,04926992	1,7028E+02	106,6924278	6,3186%	
13	35	33.5	35	33.5	54,9963515	56,496505	1,3923E+03	8,7735E+01	7,6974E+03	1,4364E+01	2,0632E+02	88,90290498	6,3855%	
14	35	36.5	35	36.5	54,9963515	53,4962	1,3923E+03	81,4238049	6,6298E+03	14,91127455	2,2235E+02	82,77790836	5,9456%	
15	40	38.5	40	38.5	49,9958575	51,496002	1,1618E+03	6,9157E+01	4,7826E+03	1,6148E+01	2,6076E+02	71,01680261	6,1127%	
16	40	41.5	40	41.5	49,9958575	48,495715	1,1618E+03	64,7292365	4,1899E+03	16,65979549	2,7755E+02	66,8387825	5,7531%	
17	45	42.5	45	42.5	44,9953	46,495532	9,7484E+02	5,5841E+01	3,1182E+03	1,7809E+01	3,1716E+02	58,61176429	6,0124%	
18	45	46.5	45	46.5	44,9953	43,195246	9,7484E+02	52,5302309	2,7594E+03	18,28152513	3,3421E+02	55,6204937	5,7056%	
19	50	48.5	50	48.5	39,99499	41,495108	8,1798E+02	4,5697E+01	2,0882E+03	1,9335E+01	3,7383E+02	49,6192836	6,0661%	
20	50	51.5	50	51.5	39,99499	38,494883	8,1798E+02	43,0831178	1,8562E+03	19,76412143	3,9062E+02	47,40016385	5,7948%	
									Error cuadrático Medio (1-20)		1264,6195		12,7103479	
									Error cuadrático Medio (10-20)		75,959782		16,4578293	

**Tabla 13**

*Tabla de valores para estimación del error en condiciones de prueba*

	Altura	Alcance en Horizontal	$\emptyset$	x UTM sistema	x UTM Google Maps	y UTM sistema	y UTM Google Maps	diferencial x	diferencia x cuadrado	Diferencial y	diferencia y cuadrado	Variación de Distancia	Variación de Distancia (%)
<b>1</b>	5	22	77,19579914	7,6978E+05	7,6978E+05	9,8657E+06	9,8657E+06	1,4468E+00	2,0933E+00	8,8633E-01	7,8558E-01	1,6967E+00	7,7124%
<b>2</b>	5	37	82,3040178	7,6978E+05	7,6978E+05	9,8657E+06	9,8657E+06	3,5672E+00	1,2725E+01	4,3113E+00	1,8588E+01	5,5958E+00	15,1237%
<b>3</b>	13	37	72,0309211	7,6957E+05	7,6956E+05	9,8657E+06	9,8657E+06	4,7877E+00	2,2922E+01	5,5752E-01	3,1083E-01	4,8201E+00	13,0273%
<b>4</b>	13	43	74,40725191	7,6956E+05	7,6955E+05	9,8657E+06	9,8657E+06	4,6758E+00	2,1863E+01	1,2211E+00	1,4912E+00	4,8326E+00	11,2387%
<b>5</b>	10	46	77,73529193	7,7033E+05	7,7033E+05	9,8658E+06	9,8658E+06	1,7792E+00	3,1655E+00	2,7675E+00	7,6590E+00	3,2901E+00	7,1523%
<b>6</b>	10	1	5,710597961	7,7035E+05	7,7035E+05	9,8658E+06	9,8658E+06	3,3387E-01	1,1147E-01	2,2156E-01	4,9090E-02	4,0070E-01	40,0696%
Error cuadrático Medio									3,237307		2,1940597		

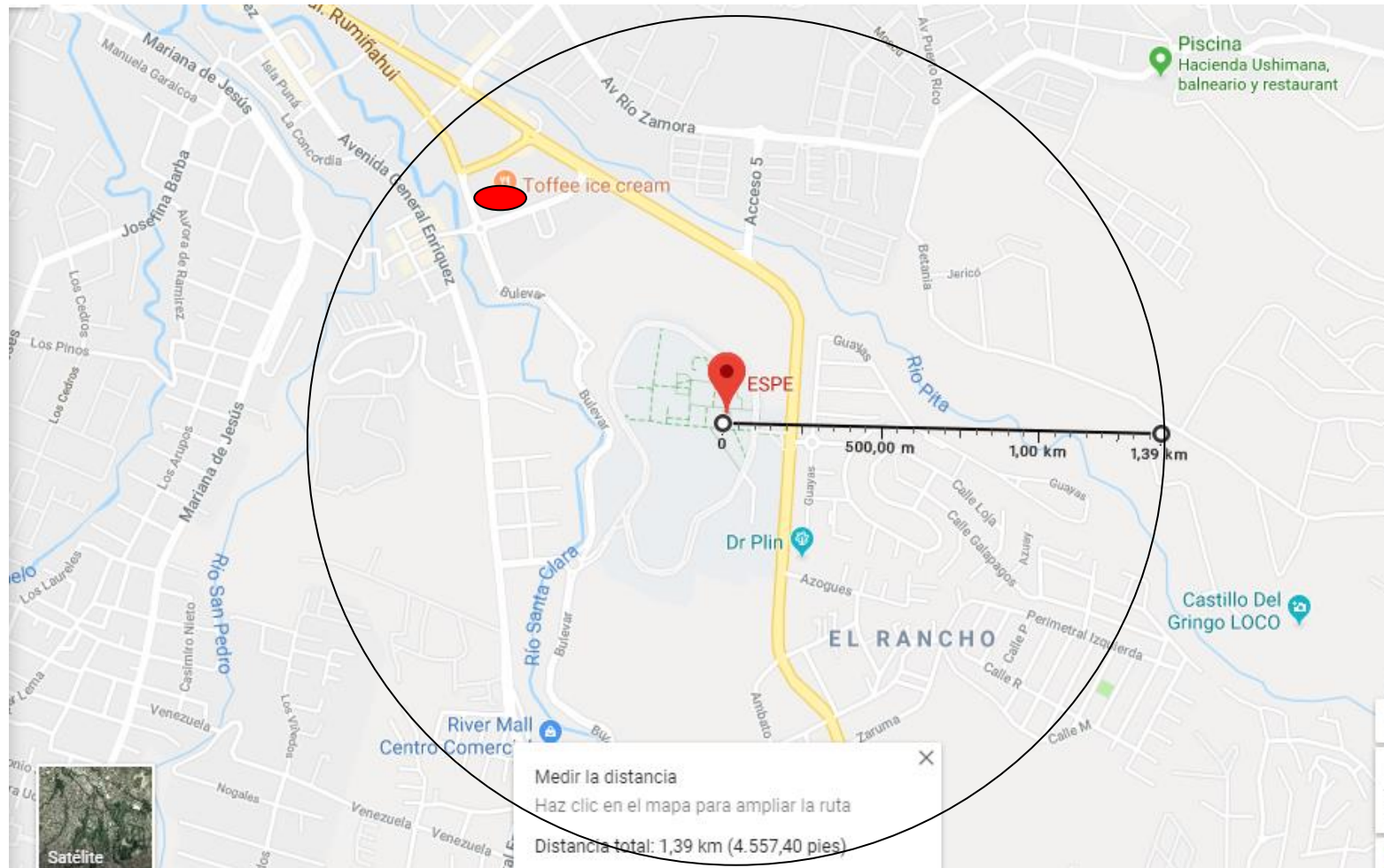


**Figura 52** Representación tabla 11 de error

Fuente: Autor

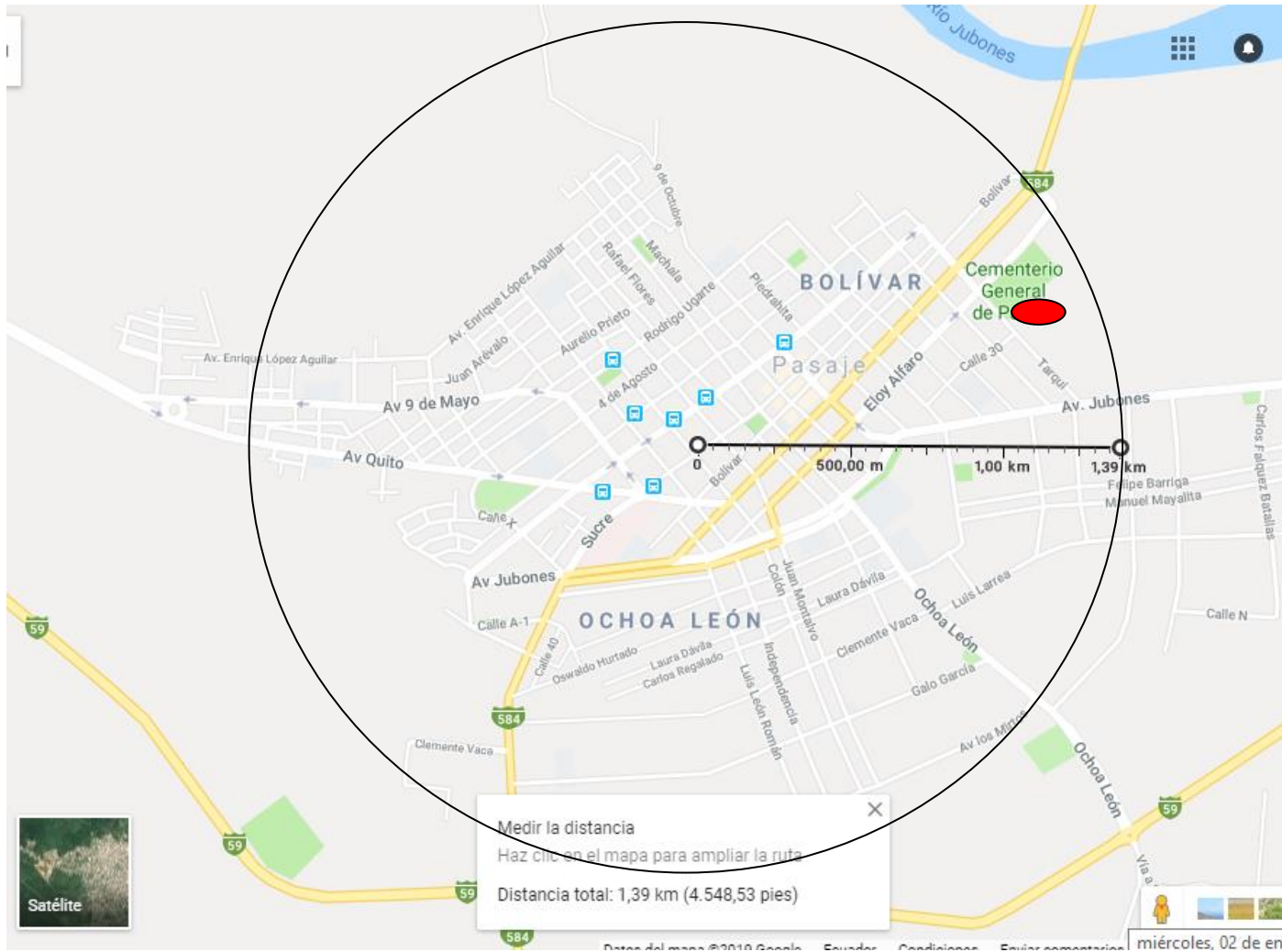
Como se observa en la tabla 11 y en la Figura 52 a medida que el ángulo  $\emptyset$  se aproxima a los 90 grados el alcance en horizontal es mayor y el error es considerablemente alto, mientras que al aproximarse a 0 los valores de alcance son menores pero poseen un error aceptable en metros.

En base a la Tabla 12 Se puede determinar bajo qué condiciones de error estará el sistema de Geolocalización al momento de sus operaciones en misiones de vuelos reales. Para visualizar esto se ha utilizado las condiciones de la fila 14 de la Tabla 12 En las ciudades de Sangolqui, y Pasaje.



**Figura 53** Alcance sistema geo localización y error en coordenadas (Sangolquí)

Fuente: Autor



**Figura 54** Alcance sistema Geocalización y error en coordenadas (Pasaje)

Fuente: Autor

## CAPÍTULO IV

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- El sistema de Geolocalización de objetivos permite incrementar las capacidades de vigilancia y reconocimiento aéreo en el Ecuador, siendo una alternativa de bajo costo a sistemas muchos más caros como los satélites de espionaje, tecnología a la que no tiene acceso Ecuador en la actualidad.
- El diseño del sistema de Geolocalización de objetivos se basó en la aplicación de la metodología de Denavit-Hartenberg para la estimación de la pose de la lente de la cámara, mientras que para el cálculo de coordenadas y transformaciones del sistema UTM a coordenadas geográficas y viceversa, se empleó las fórmulas presentadas por Alberto Cotticia y Luciano Surace en el “Boletino di Geodesia e Science Affini” num. 1,
- El sistema de Geolocalización contempla únicamente escenarios donde los terrenos sean planos o cuya geografía no posea en exceso accidente geográficos. Para poder contemplar estos escenarios será necesario la implementación de un dispositivo de medición de distancia entre la cámara y el objeto de interés para el cálculo correcto de sus coordenadas.
- La implementación del sistema de Geolocalización a las nuevas versiones del SEO-D1 será por medio de software, y este el bloque de código podrá ser reutilizado para todas las versiones futuras.

- Las simulaciones del sistema de Geolocalización permitieron visualizar los parámetros esperados, así como también realizar múltiples pruebas con escenarios distintos antes de las pruebas de concepto.
- La relación entre la exactitud y el alcance del sistema de Geolocalización estará condicionado en mayor medida por los valores de resolución que proveen los servomotores, si estos valores son mejorados el alcance será mayor y con menor error en la estimación de las coordenadas geográficas del objetivo.
- Con base en Tabla 12 y Tabla 12 se puede establecer los parámetros más adecuados para las operaciones militares, de esta manera se puede condicionar mediante software los valores aceptables, y presentar un mensaje de fuera de alcance a los valores que excedan el error permitido.

## **5.2 Recomendaciones**

- Las pruebas de concepto fueron realizadas en ubicaciones elevadas que no superaban los 30 metros, es necesario probar el sistema de Geolocalización bajo condiciones reales a fin de validar su alcance y exactitud.
- Para la implementación del sistema de Geolocalización en futuras versiones del SEO-D1 se recomienda tomar en cuenta las variaciones que puedan existir en la estructura física del Gimbal, ya que estas son consideradas al momento de plantear la tabla de parámetros Denavit-Hartenberg.
- Si se requiere el uso del sistema de Geolocalización en ubicaciones geográficas con muchos accidentes geográficos será necesario agregar un sensor de



medición de distancia, el cual será incorporado como si fuese una articulación prismática, en cuyo caso la matriz de transformación dará directamente la ubicación del objetivo en tierra.

- Para mejorar el alcance del sistema de Geolocalización es necesario mejorar la sensibilidad que presentan los servomotores en el Gimbal, ya que estos son los que más error producen al momento de probar el sistema.

## Bibliografía

- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2012). Compensación de los efectos generados en la imagen por el control de navegación del robot Aibo ERS 7. *VII Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*. Sangolquí, Ecuador.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2012). Compensación y aprendizaje de efectos generados en la imagen durante el desplazamiento de un robot. *X Simposio CEA de Ingeniería de Control*. Barcelona, Spain.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2013). Estabilización robusta de vídeo basada en diferencia de nivel de gris. *VIII Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*. Sangolquí, Ecuador.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2014). Real-time video stabilization without phantom movements for micro aerial vehicles. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 1, 1-13.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2014). Robust video stabilization based on motion intention for low-cost micro aerial vehicles. *11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. Barcelona, Spain.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2016). Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles. *Neural Processing Letters*, 43(2), 459-477.
- Aguilar, W. G., Angulo, C., & Costa-Castello, R. (2017). Autonomous Navigation Control for Quadrotors in Trajectories Tracking. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 287-297).
- Aguilar, W. G., Angulo, C., & Pardo, J. A. (2017). Motion intention optimization for multirotor robust video stabilization. *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucón, Chile.
- Aguilar, W. G., Angulo, C., Costa, R., & Molina, L. (2014). Control autónomo de cuadricópteros para seguimiento de trayectorias. *IX Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*. Sangolquí, Ecuador.
- Aguilar, W. G., Casalglla, V. P., & Pólit, J. L. (2017). Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles. *Electronics*, 6(1), 10.
- Aguilar, W. G., Casalglla, V. P., & Pólit, J. L. (2017). Obstacle Avoidance for Low-Cost UAVs. *IEEE 11th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*. San Diego.
- Aguilar, W. G., Casalglla, V. P., Pólit, J. L., Abad, V., & Ruiz, H. (2017). Obstacle Avoidance for Flight Safety on Unmanned Aerial Vehicles. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 575-584).

- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Abad, V., Ruiz, H., Parra, H., & Angulo, C. (2017). Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers and Saliency Maps. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 563-574).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Abad, V., Ruiz, H., Parra, H., & Lopez, W. (2017). Cascade Classifiers and Saliency Maps Based People Detection. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 501-510).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Luna, M. P., Abad, V., Ruiz, H., & Parra, H. (2017). Real-Time Detection and Simulation of Abnormal Crowd Behavior. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 420-428).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Ruiz, H., Moya, J. F., Luna, M. P., Abad, V., & Parra, H. (2017). Statistical Abnormal Crowd Behavior Detection and Simulation for Real-Time Applications. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 671-682).
- Aguilar, W. G., Luna, M., Moya, J., Abad, V., Parra, H., & Ruiz, H. (2017). Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers with MeanShift. *IEEE 11th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*. San Diego.
- Aguilar, W. G., Manosalvas, J. F., Guillén, J. A., & Collaguazo, B. (2018). Robust Motion Estimation Based on Multiple Monocular Camera for Indoor Autonomous Navigation of Micro Aerial Vehicle. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (págs. 547-561). Springer.
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). On-Board Visual SLAM on a UGV Using a RGB-D Camera. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 298-308).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). Real-Time 3D Modeling with a RGB-D Camera and On-Board Processing. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 410-419).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). Visual SLAM with a RGB-D Camera on a Quadrotor UAV Using on-Board Processing. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 596-606).
- Aguilar, W. G., Salcedo, V. S., Sandoval, D. S., & Cobeña, B. (2017). Developing of a Video-Based Model for UAV Autonomous Navigation. En *Communications in Computer and Information Science* (págs. 94-105).
- Alava Ingenieros. (5 de Enero de 2019). *Sistemas giroestabilizados de imagen*. Obtenido de <http://www.grupoalava.com/seguridad/productos/vigilancia-avanzada/sistemas-giroestabilizados-de-imagen/>

- Andrea, C. C., Byron, J. Q., Jorge, P. I., Inti, T. C., & Aguilar, W. G. (2018). Geolocation and Counting of People with Aerial Thermal Imaging for Rescue Purposes. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (págs. 171-182). Springer.
- Aníbal Ollero Baturone. (2001). *Robótica Manipuladores y robots móviles*. Barcelona: Marcombo.
- ArcGeek. (5 de Enero de 2019). *Cursos ARCGIS*. Obtenido de <https://acolita.com/que-es-el-error-cuadratico-medio-rmse/>
- ASADA, S. (1986). *Robot Analysis and Control*. Canada: John Wiley & Sons.
- Asamblea Constituyente. (2008). *Constitucion de la republica del ecuador*. Montecristi: Registro Oficial #449.
- Barcelona., P. O. (noviembre de 2018). *Astronomía esférica y mecánica celeste*. Obtenido de [www.publicacions.ub.edu/llibreweb/astro/astronomia\\_esferica/material/version\\_pdf/Tomo%201/2.1%20Elipsoide%20terrestre.pdf](http://www.publicacions.ub.edu/llibreweb/astro/astronomia_esferica/material/version_pdf/Tomo%201/2.1%20Elipsoide%20terrestre.pdf)
- Barrientos, A. (1997). *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill.
- Baturone, A. (2001). *Robotica: manipuladores y robots móviles*. Barcelona: Marcombo.
- C. Boucher, Z. A. (2001). ITRS, PZ-90 and WGS 84: current realizations. *Journal of Geodesy*, 613–619.
- Civil, B.-I. (5 de Enero de 2019). *Sistema Geodésico Mundial 1984-WGS84*. Obtenido de <http://ingecivilcusco.blogspot.com/2009/09/sistema-geodesico-mundial-1984-wgs84.html>
- Claude Irwin, S. F. (1973). *Matematicas elementales: nociones de aritmética, geometría, álgebra y trigonometría*. Barcelona : REVERTE.
- COPADATA. (5 de Enero de 2019). *Interfaz Hombre-Máquina (HMI)*. Obtenido de <https://www.copadata.com/es/soluciones-hmi-scada/interfaz-hombre-maquina-hmi/>
- di-soric GmbH & Co. KG. (s.f.). *di-soric*. Recuperado el 13 de Junio de 2018, de <https://www.di-soric.com/es/Sensores-laser-para-medicin-de-distancia-di-soric-30118.html>
- Drones, E. (5 de Enero de 2019). *What is Pitch, Roll and Yaw*. Obtenido de <https://emissarydrones.com/what-is-roll-pitch-and-yaw>
- FAE. (s.f.). *Centro de Investigación y Desarrollo de la FAE*. Recuperado el 12 de 06 de 2018, de <http://leon.260mb.net/>
- FAE. (s.f.). *FUERZA AEREA ECUATORIANA*. Recuperado el 12 de 06 de 2018, de <https://www.fuerzaaereaecuatorialiana.mil.ec/mision-y-vision/>

- Franco, A. R. (2018 de Diciembre de 2018). *Características de las coordenadas utm y descripción de este tipo de coordenadas*. Obtenido de [http://www.elgps.com/documentos/utm/coordenadas\\_utm.html](http://www.elgps.com/documentos/utm/coordenadas_utm.html)
- Freedman, P. P. (1993). *Estadística*. Barcelona: Antoni Bosch Editor.
- Gamboa, J. M. (2009). *Fundamentos para Cartografía Náutica*. JM ediciones, Cadiz.
- Gobierno de Colombia. (s.f.). *Oficina del Alto Comisionado por la Paz*. Recuperado el 2018 de 06 de 12, de <http://www.altocomisionadoparalapaz.gov.co/procesos-y-conversaciones/Paginas/Texto-completo-del-Acuerdo-Final-para-la-Terminacion-del-conflicto.aspx>
- Gobierno de los Estados Unidos. (s.f.). *GPS.gov*. Recuperado el 12 de Junio de 2018, de <https://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php>
- Gómez López, A. O. (2013). Políticas públicas de seguridad de Colombia y de Ecuador: una visión comparada. *Fronteras: rupturas y convergencias*. 63-75.
- Google. (13 de Diciembre de 2018). *Google maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps>
- HETPRO. (2019 de Enero de 2019). *Microcontrolador – qué es y para que sirve*. Obtenido de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/microcontrolador/>
- Instrument, N. (27 de Diciembre de 2018). *MATLAB script*. Obtenido de [http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361P-01/gmath/matlab\\_script\\_node/](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361P-01/gmath/matlab_script_node/)
- J.W. Kane, M. S. (2007). *Física*. Barcelona: REVERTE.
- Jara-Olmedo, A., Medina-Pazmiño, W., Mesías, R., Araujo-Villaroel, B., Aguilar, W. G., & Pardo, J. A. (2018). Interface of Optimal Electro-Optical/Infrared for Unmanned Aerial Vehicles. *En Smart Innovation, Systems and Technologies* (págs. 372-380).
- Jara-Olmedo, A., Medina-Pazmiño, W., Tozer, T., Aguilar, W. G., & Pardo, J. A. (2018). E-services from Emergency Communication Network: Aerial Platform Evaluation. *International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG)* (págs. 251-256). IEEE.
- Juan Peña Llopis. (1987). *Sistema de Información Geográfica Aplicados a la Gestión del Territorio*. San Vicente: Club Universitario .
- KINDLE, J. H. (1987). *Teoría y Problemas de Geometría Análítica Plana y del Espacio*. . México: McG RAW-H I LL .
- Lung-Wen TSAI. (1999). *Robot Analysis*. Canada: John Wiley & Sons, Inc .

- Miguel Muñoz. (5 de Enero de 2019). *Instrumentacion*. Obtenido de <http://www.manualvuelo.com/INS/INS23.html>
- Minitab, S. (6 de Enero de 2019). *Exactitud y precisión de los sistemas de medición*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/basics/accuracy-and-precision/>
- Misra, R. (1989). *Fundamentals of Cartography*. New Delhi: CONCEPT PUBLISHING COMPANY.
- Orbea, D., Moposita, J., Aguilar, W. G., Paredes, M., León, G., & Jara-Olmedo, A. (2017). Math Model of UAV Multi Rotor Prototype with Fixed Wing Aerodynamic Structure for a Flight Simulator. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 199-211).
- Orbea, D., Moposita, J., Aguilar, W. G., Paredes, M., Reyes, R. P., & Montoya, L. (2017). Vertical take off and landing with fixed rotor. *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucón, Chile.
- Ortiz, G. (12 de Diciembre de 2018). *Calculadora GEO*. Obtenido de [www.gisandbeers.com/RRSS/Calculadoras/CalculadoraGO.xls](http://www.gisandbeers.com/RRSS/Calculadoras/CalculadoraGO.xls)
- Pardo, J. A., Aguilar, W. G., & Toulkeridis, T. (2017). Wireless communication system for the transmission of thermal images from a UAV. *Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucón, Chile.
- Rafael, M. O. (2014). *Informe de avance de componentes del avión uav - sistema electrooptico seo d1*. Ambato: Centro de Investigación y Desarrollo de la FAE.
- Robótica, 4. T.-T. (13 de 12 de 2018). *Robot manipulador scara*. Obtenido de <http://perso.wanadoo.es/e/alimapp/scara/moddirecto.htm>
- Ruano Miguel. (5 de Enero de 2019). *Cambio en el ecuador del sistema referencial geodésico PSAD-56 al WGS-84*. Obtenido de [http://www.igm.gob.ec/work/files/sist\\_%20referencial.pdf](http://www.igm.gob.ec/work/files/sist_%20referencial.pdf)
- Sensing, L. M. (3 de Enero de 2019). *Inertial Sensors*. Obtenido de <https://www.microstrain.com/inertial/3dm-gx3-25>
- Sergio A. Gómez S., G. C. (s.f.). Estimación de la incertidumbre del método iso 16063-21 en el laboratorio de vibraciones UPB. *Laboratorio de vibraciones Universidad Pontificia Bolivariana*, 1-7.

Servocity. (3 de Enero de 2019). *Shop By Product*. Obtenido de <https://www.servocity.com/hs-785hb-servo>

Sierra, N. A. (5 de Enero de 2019). *Estudio del Robot Kuka KR6-2*. Obtenido de 2019

T. Chai, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development* .

THRUSTMASTER. (6 de Enero de 2019). *Hotas warthog*. Obtenido de <http://www.thrustmaster.com/products/hotas-warthog/>

VECTORNAV. (5 de Enero de 2019). *Inertial Measurement Units and Inertial Navigation*. Obtenido de <https://www.vectornav.com/support/library/imu-and-ins>