

Diseño y Construcción de un Sistema de Geo-Estabilización para un Sistema Electro-Óptico utilizando un Sensor Inercial y un GPS

Fonseca R. * Panamá G. * Rosales A. * Burbano P. *
Ávalos E. **

* *Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Automatización y Control Industrial, Quito, Ecuador (e-mail: ricardo.fonseca@epn.edu.ec; gustavospn@yahoo.com; andres.rosales@epn.edu.ec; carlos.burbano@epn.edu.ec)*

** *Politécnica Nacional, Departamento de Física, Quito, Ecuador (e-mail: eduardo.avalos@epn.edu.ec)*

Resumen: *Este proyecto consiste en el desarrollo de un sistema robótico para la estabilización de imagen. El sistema se compone de un vehículo móvil y un sistema electro-óptico, donde cada uno tiene una tarjetade control independiente. El sistema robótico es capaz de enfocar y estabilizar la imagen de un objeto determinado. El algoritmo de estabilización funciona en modo autónomo una vez que el usuario establece el objeto. El sistema está controlado por una palanca de mando conectada a un ordenador en la estación de control. Los datos y la imagen se transmiten de forma inalámbrica a través de dispositivos de comunicación independientes.*

Palabras clave: *Control, Electro-Óptico, Geo-Estabilización, Sensores Inerciales, GPS.*

Abstract: *This project is about a robotic system that has an image stabilization hardware and software. It consists of two main robotic components a mobile vehicle and an electro-optic system, each one has an independent control board. The robotic system is able to focus and stabilize the image of a chosen target. The stabilization algorithm works in autonomous mode once the user sets the object. The system is controlled by a joystick, which is connected to a computer in the control station. Data and image are wirelessly transmitted through independent communication devices.*

Keywords: *Control, Electro-Optical System, Stabilization, Inertial Sensors, GPS.*

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los intereses de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) a través del convenio con la Escuela Politécnica Nacional (EPN) es desarrollar un avión no tripulado o UAV (UnmannedAerialVehicle) modelo nacional, para conseguir este fin es necesario equipar al sistema UAV con un sistema de control para un sensor electro-óptico. Una de las características importantes de un sistema electro-óptico es la disponibilidad de un sistema de geo-estabilización para la base de la cámara de video (sensor electro-óptico) que permita enfocar un blanco (objetivo).Dentro de las funciones que debe desempeñar un sistema electro óptico están la opción de realizar zoom óptico y digital permitiendo reconocer e identificar objetos a grandes distancias.

Actualmente los sistemas electro ópticos aéreo transportados son ampliamente usados por organismos tanto militares como civiles agregándoles diversas funcionalidades

para realizar actividades de levantamiento de datos geográficos, climáticos, ambientales entre otros. La información remota se adquiere mediante sensores espectrales en distintos rangos del espectro visible e infrarrojo.

2. COMPONENTES DEL SISTEMA

Los componentes físicos del sistema de geo-estabilización se describen en dos bloques principales descritos como: vehículo móvil y sistema electro-óptico. Adicionalmente forman parte de los componentes, lastarjetas de control y los enlaces inalámbricos (Fig.1). Se dispone de alimentación dada por baterías LiPo, se usa una de 7.4 voltios (2 celdas) exclusivamente para los motores DC del vehículo móvil, y dos paquetes de 11.1 voltios (3 celdas) para las tarjetas de control, sensores y demás actuadores y dispositivos.

2.1 Arquitectura

Se señalan las partes esenciales del sistema de geo-estabilización desarrollado mediante un esquema que representa un prototipo capaz de percibir la información del entorno y realizar exploración controlada.

2.2 Vehículo Móvil

El vehículo móvil (Fig.1) sirve de base para montar el sistema electro-óptico y es considerado como un sistema para efectuar pruebas y realizar exploración controlada por el usuario. Incorpora una tarjeta de electrónica aislada entre la potencia y el control (Fig. 1).

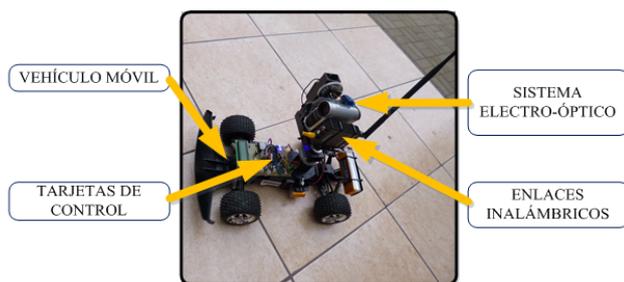


Figura 1: Componentes principales del sistema de geo-estabilización.

2.3 Sistema Electro-Óptico

El sistema electro-óptico [5] consta a su vez de dos componentes fundamentales que lo convierte en un modelo estratégico para cumplir con los requerimientos del proyecto. Está conformado por una estructura robótica pan & tilt [4] PT785S y una cámara de video.

2.4 Tarjetas de Electrónicas de Control

El sistema de geo-estabilización incorpora dos tarjetas de control independientes una de la otra que trabajan simultáneamente, la primera se utiliza para controlar los sistemas inherentes al vehículo móvil, la otra se usa para control exclusivo del sistema electro-óptico. Cada tarjeta de control tiene sus respectivos acondicionamientos para obtener los niveles de voltaje a los que operan los diferentes dispositivos del sistema.

- (1) *ATmega 164PA*: La tarjeta con el ATmega 164PA controla con precisión y exactitud considerable los actuadores del sistema pan tilt y realiza las siguientes acciones:
 - Recibir, analizar y efectuar los comandos de control transmitidos serialmente por el módulo XBee.
 - Controlar los servomotores dispuestos en la estructura robótica pan tilt a fin realizar los movimientos horizontal y vertical de la cámara.

- Manejar un módulo LCD de 16x2 donde muestra mensajes iniciales relacionados al prototipo.
- Manejar luces de presentación.

Además, esta tarjeta de control incluyen la unidad de medida inercial y el receptor GPS.

La unidad de medida inercial o IMU (Inertial Measurement Unit) escogida para el presente proyecto es la CHR-UM6. Se compone de sensores inerciales: giroscopios, acelerómetros, magnetómetros en tres ejes x , y & z y un sensor de temperatura, además tiene la opción para conectar un GPS bajo el estándar NMEA. Cuenta con un Filtro de Kalman Extendido o EKF (Extended Kalman Filter) [7] implementado en un microcontrolador de 32 bits. La IMU trabaja a una tasa de actualización de 20 Hz.

El modelo de GPS utilizado es el GPS LS20031. El receptor GPS permite obtener, posición, tiempo y velocidad [6] a una tasa de actualización de 5 Hz. La posición geográfica se obtiene con una tolerancia de ± 15 metros máximo son condiciones ambientales favorables.

El GPS está conectado directamente a la IMU por lo que se utiliza un solo canal de enlace para comunicación y configuración de dichos dispositivos (Fig. 2).

- (2) *ATmega 168*: La tarjeta que incorpora el ATmega 168 controla los movimientos del vehículo móvil y efectúa las siguientes funciones:

- Recibir, analizar y efectuar los comandos de control transmitidos serialmente por el módulo XBee.
- Manejar el driver VNH5019 dual de 12 amperios para controlar los dos motores DC que constituyen el sistema de tracción motorizado.
- Realizar el control de dirección mediante un servomotor acoplado al eje delantero de las ruedas.

Esta tarjeta maneja el driver de motor DC VNH5019 para aislar la potencia del circuito de control.

2.5 Enlaces Inalámbricos

El sistema desarrollado tiene dos tipos de comunicación inalámbricos para el enlace de la información entre la estación de control y la estación remota móvil: datos y vídeo analógico. Los datos se transmiten utilizando módulos XBee, mientras para el vídeo analógico se utilizan dispositivos de radio, los dos enlaces trabajan en la banda pública ICM (Industrial, Científica y Médica) de 2.4 GHz [3].

- (1) *Módulos XBee*: Se utilizan módulos XBee en modo de comunicación **full-dúplex** la cual permite transmitir y recibir simultáneamente entre las dos estaciones. Las señales de los sensores inerciales tienen transmisión directa hacia la estación de control donde

se procesan para determinar los comandos de control (Fig. 2). Los comandos retornan a la estación móvil a fin de que los sistemas microprocesados efectúen las acciones requeridas. Además, la configuración está realizada para que permita calibrar y configurar los sensores desde la estación de control.

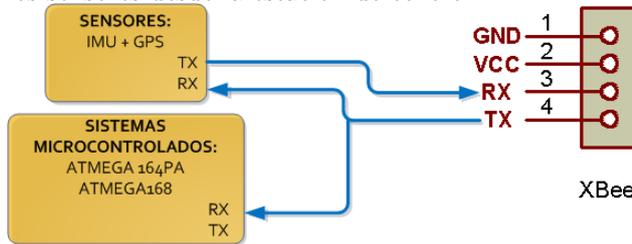


Figura 2: Conexión del módulo XBee en la estación móvil.

- (2) *Radiofrecuencia:* La implementación del subsistema de transmisión inalámbrico de vídeo [1] (Fig. 3), utiliza un equipo transmisor-receptor de radio de 3 vatios cuyo alcance ideal es de aproximadamente 1Km. La utilización de un canal dedicado permite transmitir el vídeo en tiempo real.

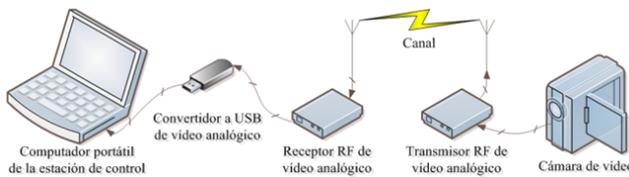


Figura 3: Transmisión por radio de vídeo analógico.

3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El sistema consta de una central de control, enlaces de comunicación, controlador en la unidad remota, sensores y actuadores. Todos estos elementos trabajan juntos para el correcto funcionamiento del sistema. Los modos de funcionamiento del sistema son: apuntamiento mediante giroscopios, apuntamiento mediante IMU-GPS y finalmente apuntamiento a un objeto móvil.

3.1 Apuntamiento mediante giroscopios

Consiste en compensar el giro del robot para que la cámara apunte al mismo lugar. Para lograr este objetivo es necesario girar los servos motores (horizontal y vertical) el mismo ángulo que ha girado la estructura en sentido contrario.

El movimiento angular que presenta la estructura se conoce gracias a los datos de la IMU, A través de la IMU se determina el giro horizontal “yaw”, vertical “pitch” y rotativo “roll”, denominados ángulos de Euler [7].

El valor del desplazamiento angular se consigue mediante la integración de los datos del giroscopio, los cuales están dados como velocidad angular. El algoritmo de integración se efectúa en el microcontrolador de la unidad inercial. El ángulo resultante en grados se muestra en la Fig. 4.

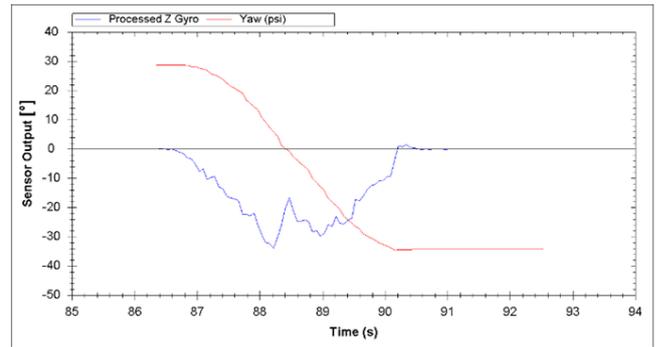


Figura 4: Cálculo de ángulo a partir de giroscopio.

Para efectos del proyecto se requieren principalmente los valores de los ángulos yaw y pitch. Los ángulos mencionados se determinan mediante un arreglo y cálculo matemático de los datos proporcionados por la unidad inercial. El resultado del procesamiento de datos por computador es el valor de dichos ángulos en grados (o)prácticamente en tiempo real.

Una vez obtenidos los ángulos de orientación se sabe a dónde se apunta, de esta manera si se añade el dato del control manual que indica la dirección para apuntar, se compensa el giro del robot móvil. Por lo tanto, independientemente de los giros que realice el robot, la cámara enfoca al mismo lugar según la expresión (1). La lógica de compensación de giros se consigue haciendo girar el equivalente ángulo en sentido contrario en la estructura pan & tilt.

$$\text{Ángulo a compensar} = \text{ángulo IMU} + \text{ángulo control manual} \quad (1)$$

El ángulo a compensar en grados se transforma a un dato que pueda ser entendido por el microcontrolador, para esto hay que convertirlo a ancho de PWM (Pulse Width-Modulation). Los datos de los giroscopios se representan en una imagen de una aeronave en 3D para una mejor visualización como se muestra en la Fig. 5. El resultado de la estabilización de imagen es apreciable debido a que la orientación del robot está reflejada en la imagen 3D y paralelamente la imagen del objetivo se mantiene en la mira de la cámara de vídeo (Fig. 5).

3.2 Apuntamiento mediante IMU-GPS

El objetivo de geo-estabilizar es apuntar la cámara a un lugar tomando como referencia su ubicación geográfica, por ejemplo se puede apuntar a un edificio, casa, parque, etc. La ventaja que da la geo-estabilización es poder apuntar a un objeto fijo independiente de los giros y desplazamientos que presente la plataforma robótica en donde se encuentra la cámara. Para poder geo-estabilizar la cámara es necesario tener los siguientes datos:

- Ángulos yaw referenciado con el norte magnético.

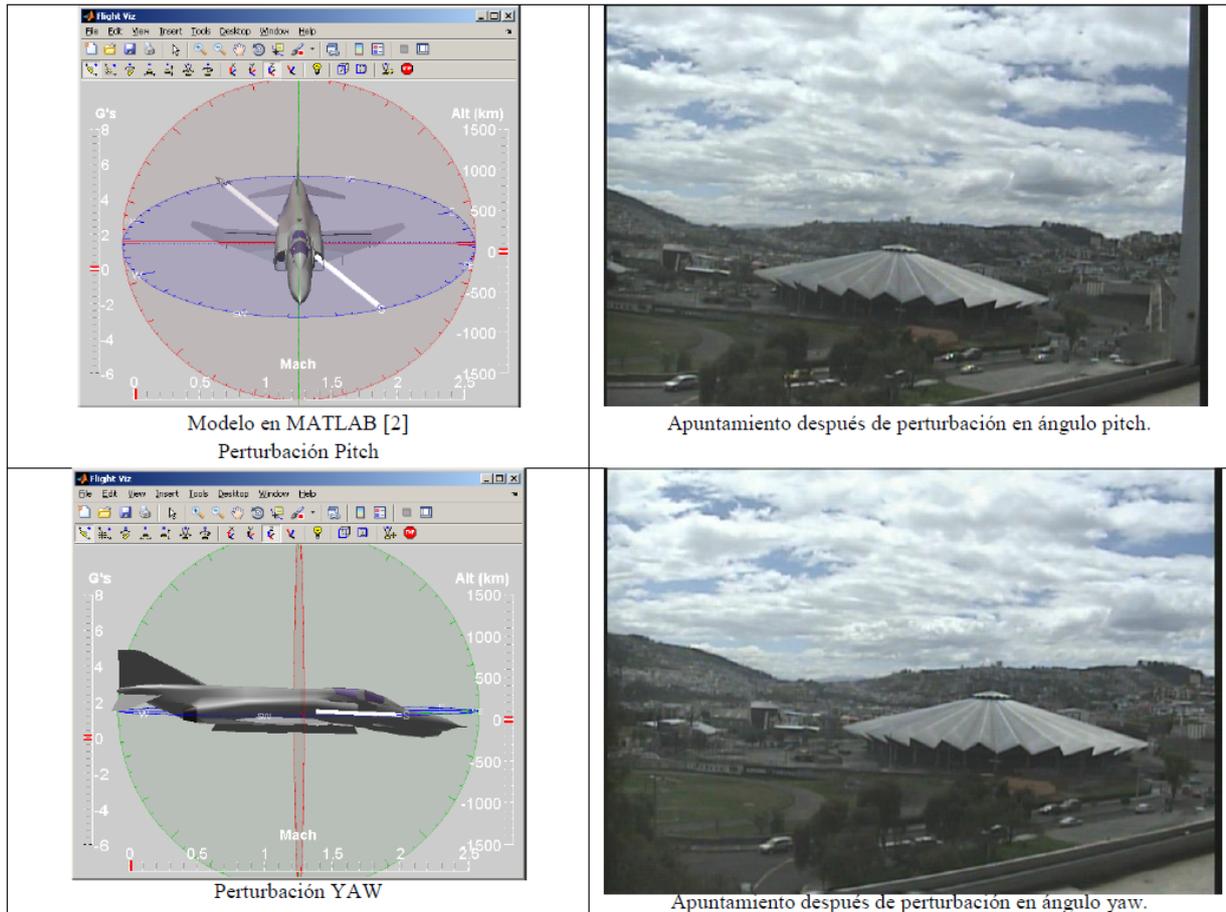


Figura 5. Estabilización de imagen con sensores inerciales.

- Posición geográfica de la estructura robótica que contiene a la cámara.
- Posición geográfica del lugar a apuntar.

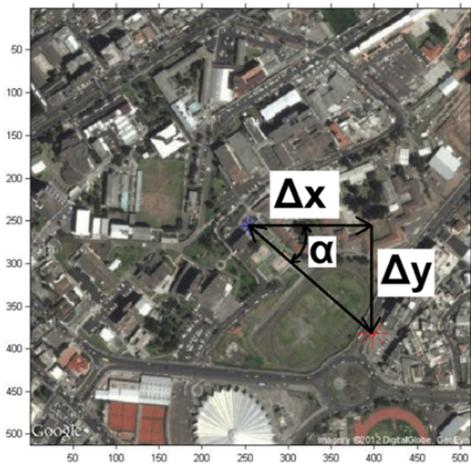


Figura 6: Ubicación geográfica y descripción de variables.

- (1) *Angulo yaw*: Para calcular el ángulo yaw (horizontal) se necesita la información de giroscopios y magnetómetros. Con los datos del giroscopio se calcula el desplazamiento angular tomando como referencia el norte magnético y con los datos del magnetómetro

- (2) *La posición geográfica del sistema*: Se obtiene mediante los datos de longitud y latitud del GPS, este dato tiene 4 cifras decimales, dando una resolución para medidas de desplazamiento menor a 10 metros, adecuada para el trabajo a realizar.

Este dato de GPS es usado para ubicar geográficamente la posición actual del sistema mediante una comunicación con los mapas de Google Earth a través de “Google Maps APIs”, el uso de esta herramienta permite tener gráficamente la ubicación actual como se presenta en la Fig. 7.

El mapa es una referencia geográfica de los objetos alrededor del sistema de apuntamiento, con centro en la coordenada del sistema. Para optimizar el tiempo de ejecución es necesario trabajar sobre una sola imagen, significa que cuando el sistema robótico cambia su posición de longitud y latitud, el programa no descarga otra imagen de Google Maps, lo que hace es transformar la longitud y latitud a píxeles. Con el valor en píxeles se ubica al sistema en el mapa. Para transformar de longitud o latitud a píxel se usa la Ec.(2).

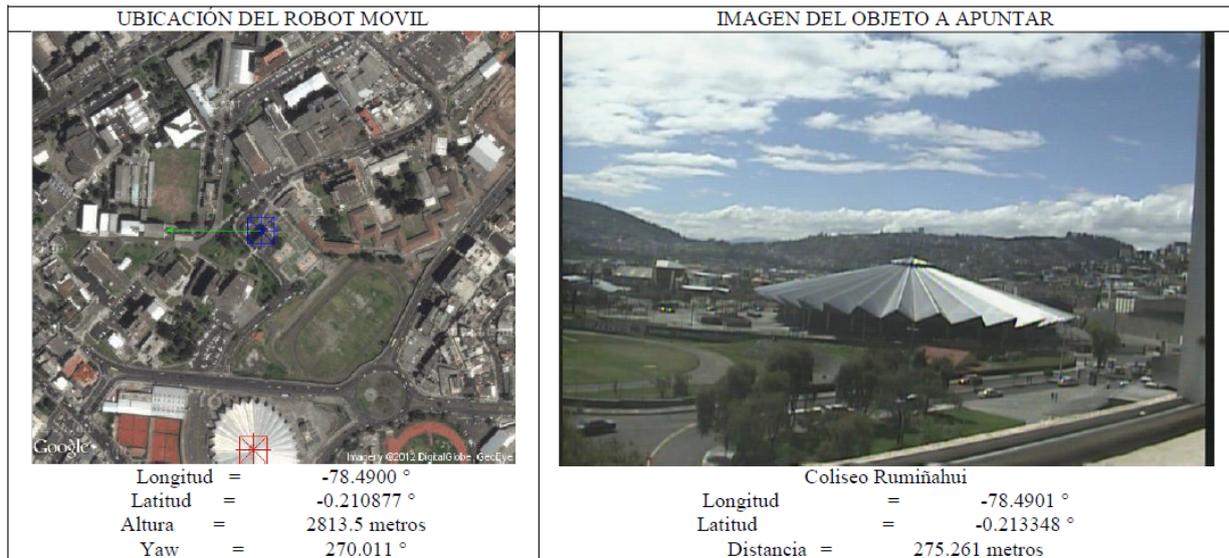


Figura 7. Estabilización de imagen con GPS y ángulo yaw.

$$pix.x = (long.actual-long.inicial) * 512/factorlong + 256 \quad (2)$$

Donde:

$pix.x$ = Ubicación del pixel entre 0 y 512

$long.actual$ = Dato de longitud del GPS

$long.inicial$ = Dato de longitud del centro de la imagen

$factorlong$ = Valor asignado a la imagen según el zoom

Para calcular el factor de longitud o latitud se procede de la forma indicada en la Ec. (3).

$$factorlong = 360^\circ / (2^{(zoom-1)}) \quad (3)$$

$zoom$ = Acercamiento a la imagen

- (3) *Posición geográfica del lugar a apuntar:* Es elegido por el usuario mediante el control manual (joystick) moviendo un puntero al lugar deseado. El lugar elegido para apuntar tiene coordenadas en longitud y latitud que deben ser transformadas a pixeles.
- (4) *Cálculo para la geo-estabilización:* Calcula α , ángulo de inclinación entre el punto geográfico del sistema y el objeto que se desea apuntar como se expresa en la Ec.(4).

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4)$$

Se referencia “ α ” al norte, dependiendo del cuadrante que este, de la siguiente forma:

1er cuadrante: $\alpha = 90 - \alpha$

2do cuadrante: $\alpha = \alpha + 90$

3er cuadrante: $\alpha = 270 - \alpha$

4to cuadrante: $\alpha = 270 + \alpha$

El valor de α referenciado al norte será finalmente el valor del ángulo que la cámara debe girar para mantener la mira en el objetivo. El resultado del apuntamiento con GPS es la Fig. 5, el mapa muestra la ubicación geográfica del robot móvil, ubicación del

objeto a apuntar y se puede observar la imagen al objetivo apuntado.

En el mapa geográfico se encuentran dos punteros, uno rojo y otro azul que significan:

- Rojo: Ubicación geográfica del objeto a apuntar.
- Azul: Ubicación geográfica del robot móvil.

3.3 Apuntamiento a un objeto móvil

Apuntamiento/tracking es una aplicación dirigida por el computador que identifica automáticamente a un objeto seleccionado por el usuario. Esto es posible mediante un análisis de las características físicas del objeto dentro de la imagen.

La función que cumple un sistema de tracking es controlar los parámetros posición y orientación de una cámara para mantener un determinado objeto en movimiento dentro del campo de visión.

La identificación de objetos se la hace mediante un programa desarrollado en el paquete computacional MATLAB, esta característica le otorga alta versatilidad.

La técnica de tracking usada para el sistema es una basada en las características físicas del objeto seleccionado como se muestra en la Fig. 8. El programa permite seleccionar cualquier objeto dentro de la imagen de la cámara(Fig. 9). Una vez elegido, el programa lo identifica y mueve los servomotores para mantener al objeto en la mira.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

A continuación se muestra la tabulación de resultados de los dispositivos involucrados en el desarrollo del sistema, a través de pruebas de laboratorio y en campo.

- (1) *Prueba del canal inalámbrico de imagen:* En el enlace de transmisión de imagen se mide el alcance y calidad

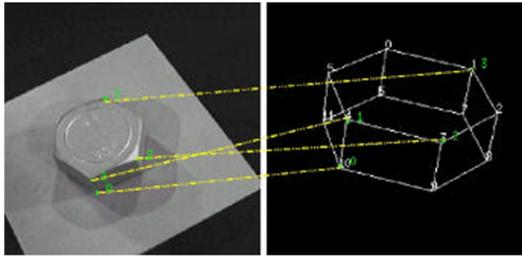


Figura 8. Selección de características de un objeto.



Figura 9. Selección de objeto a apuntar.

de imagen variando la distancia de separación entre la estación de control y la estación móvil. Se evalúa en la imagen las siguientes características: Imagen a color, visualización en tiempo real, claridad, es decir, sin distorsión o deformación, ejemplo rayas o parpadeo. Los resultados se aprecian en la Fig. 10, Fig. 11 y Tabla 2.

Tabla 1: Alcance de transmisión de imagen.

Distancia [m]	Ambiente Interno	Ambiente Externo
10	Satisface	Satisface
20	Satisface	Satisface
30	Satisface	Satisface
40	Satisface	Satisface
>40	No Satisface	Satisface
>130	No Satisface	No Satisface

Para la comunicación inalámbrica de datos o de imagen es muy importante que exista línea de vista entre las antenas, esto permite tener mayor alcance y mejor respuesta en el enlace. Para transmisión de imagen, esta es más clara y sin distorsiones, para la transmisión de datos existe más integridad, esto es mayor cantidad de bytes válidos.



Figura 10: Imagen transmitida a 3 metros.

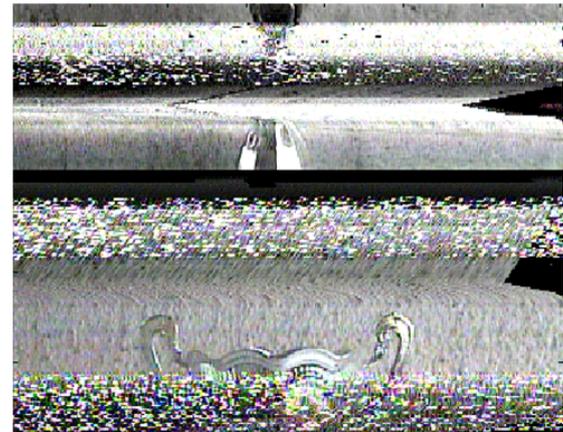


Figura 11: Imagen transmitida a 55 metros.

(2) *Prueba del canal inalámbrico de control:* Se toma el alcance de la transmisión de los comandos de control a través de los módulos XBeePRO serie 1. Se evalúa que el sistema se mantenga enlazado en todas sus funciones, es decir, se debe poder gobernar los movimientos de la plataforma robótica móvil desde la estación de control.

Tabla 2: Alcance de transmisión de control.

Distancia [m]	Ambiente Interno	Ambiente Externo
10	Satisface	Satisface
20	Satisface	Satisface
30	Satisface	Satisface
40	Satisface	Satisface
>40	No Satisface	Satisface
>130	No Satisface	No Satisface

Se realiza una prueba en la que se mide el tiempo de llegada de un paquete en función de la distancia, da como resultado el % de transferencia de datos como se presenta en la Fig. 12.

Se concluye que el alcance de comunicación inalámbrica del sistema está limitado por el alcance del Xbee, teniendo así un alcance de 15 metros para ambientes internos y 40 metros para ambientes externos.

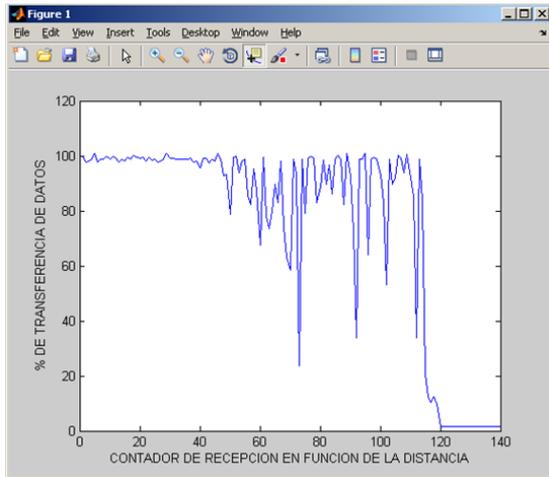


Figura 12: Integridad de comunicación.

5. CONCLUSIONES

El sistema robótico desarrollado funciona de acuerdo a los alcances del Proyecto Interno de Investigación iniciado por el Convenio entre la Escuela Politécnica Nacional y el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (EPN-CIDFAE) y se cumple con las expectativas porque se verifica la geo-estabilización de imagen en una tarea de campo donde las perturbaciones aplicadas a la plataforma móvil, no afectan la imagen en la mira, es decir, se obtiene una imagen estabilizada.

Una técnica muy útil es la verificación de la integridad de la trama de control porque el sistema es susceptible a cualquier cambio que se presente en el entorno que interfiere en los circuitos. Utilizar el check-sum de los bytes de la trama permite procesar solo aquella trama de datos que satisface la verificación cualquier valor aleatorio provocado por ruido u otro factor externo.

El procesamiento de imágenes en MATLAB es una herramienta importante ya que permite realizar cambios rápidos en el procesamiento de imágenes, actualización de filtros. Esto significa, que los cambios en la programación tienen un efecto inmediato sobre las imágenes de entrada.

Un sistema electro-óptico tiene una gran variedad de aplicaciones tanto para la industria como para el uso militar. En el desarrollo de este proyecto se trabajó una cámara en el espectro visible, esto puede ser mejorado usando características para identificación nocturna o características hiper-espectrales para identificación de materiales.

6. RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado y financiado en el Proyecto de Investigación Interno UAV, bajo el Convenio entre la Escuela Politécnica Nacional y el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (EPN-CIDFAE).

REFERENCIAS

- [1] Betanzos E.; Sistemas de Transmisión Inalámbrica de Vídeo y Comandos para Controlar un Móvil; Tesis profesional (Ingeniería Electrónica); México; 2002.
- [2] Brown G.; Flight Visualization; MathWorks; 2008. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18363-flight-visualization/content/flightviz.m>
- [3] CONATEL, SENATAL; Plan Nacional de Frecuencias; Dirección General de Gestión del Espectro Radioeléctrico; Quito, Ecuador; 2012.
- [4] Davis J., Chen X.; Calibrating Pan-Tilt Cameras in Wide-Area Surveillance Networks; IEEE; International Conference on Computer Vision; USA; 2003.
- [5] Escobar M. Isabel; Control de Sensores Electro-Ópticos en Aviones No Tripulados y Tratamiento de Imágenes Utilizando Máquinas de Vectores Soporte; Proyecto fin de carrera; Ingeniería de Telecomunicación; Universidad Carlos III de Madrid - Escuela Politécnica Superior; Madrid, España; 2010.
- [6] Mohinder S., Grewal L., R. Weill A.; Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration; First Edition; John Wiley Sons, Inc.; New York, USA; 2001.
- [7] Simon, D.; Optimal State Estimation; Wiley; Hoboken, NJ, USA; 2006.