



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GEO- ESTABILIZACIÓN PARA UN SISTEMA ELECTRO-ÓPTICO UTILIZANDO UN SENSOR INERCIAL Y UN GPS

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**RICARDO ESTEBAN FONSECA ROMERO
(ciclopexg@hotmail.com)**

**GUSTAVO SANTIAGO PANAMÁ PERUGACHI
(gustavospanama@yahoo.com)**

**DIRECTOR: MSc. PATRICIO BURBANO ROMERO
(carlos.burbano@epn.edu.ec)**

**CODIRECTOR: Dr. ANDRÉS ROSALES ACOSTA
(andres.rosales@epn.edu.ec)**

Quito, enero 2013

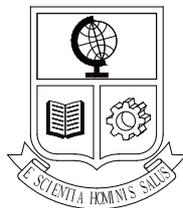
DECLARACIÓN

Nosotros, Ricardo Esteban Fonseca Romero y Gustavo Santiago Panamá Perugachi, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ricardo Esteban Fonseca Romero

Gustavo Santiago Panamá Perugachi



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos del Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento de los autores.

Al consultar esta tesis deberá acatar las disposiciones de la Ley y de las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ricardo Esteban Fonseca Romero y Gustavo Santiago Panamá Perugachi, bajo mi supervisión.

MSc. Patricio Burbano Romero
DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Andrés Rosales Acosta
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios y a todas las personas que estuvieron involucradas en el desarrollo de esta tesis.

A la Escuela Politécnica Nacional que a través del proyecto UAV (Unmanned Aerial Vehicle) patrocinó esta tesis, ya que de otra manera no hubiese sido posible desarrollarla.

Al director del proyecto de titulación Ing. Patricio Burbano por todo el apoyo, guía y ánimos brindados día a día.

Al codirector del proyecto de titulación Dr. Andrés Rosales por su amistad, dedicación y esfuerzo para ayudar a sus estudiantes.

Al coordinador del proyecto UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Dr. Eduardo Avalos que con su impulso nos llevó a alcanzar niveles más altos en la realización de la tesis.

A mi mama y hermana que estuvieron siempre junto a mí dándome su apoyo y confianza.

A mi hermano Paúl que está siempre que le necesito apoyando y dando consejo, gracias amigo.

A mi amigo Gustavo que puso todo su esfuerzo y energía para desarrollar el proyecto.

Ricardo Fonseca

AGRADECIMIENTO

Profunda gratitud a la Escuela Politécnica Nacional por la formación profesional y las facilidades de estudio brindadas.

Al Dr. Eduardo Ávalos por el apoyo en el desarrollo del presente proyecto a través del Proyecto UAV y de los Sistemas Electro-Ópticos, de igual manera por sus magnas expectativas sobre la importancia de la investigación y el desarrollo científico-tecnológico que permitieron la realización de este proyecto.

Al Ing. Patricio Burbano por el fuerte apoyo profesional, y más que todo por su valiosa amistad y sus mensajes llenos de sabiduría.

Al Dr. Andrés Rosales por su fraterna amistad, el apoyo profesional y por impulsar las ideas de los proyectos.

A mis padres y hermanos que siempre están atentos por mi bienestar y por su fuerte apoyo en cada momento de mi vida.

A Daniel O. por su amistad sincera y fraterna, y por brindarme su apoyo en momentos difíciles.

A Ricardo, un buen amigo quien demostró su alto espíritu de trabajo en la realización del proyecto.

A mis amigos por su amistad, consejos y momentos compartidos.

Gustavo Panamá

DEDICATORIA

A las personas más importantes en mi vida que han dado todo de sí, trabajando día y noche, incansablemente para que salga adelante y me dieron su apoyo durante toda mi vida, se los dedico mamita y ñañita bellas.

Ricardo Fonseca

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres, Segundo y Rosa, quienes con mucho esfuerzo y sacrificio dieron todo para ver destacados a sus hijos y son un ejemplo de noble sentimiento en la familia.

De igual manera, dedico a mis hermanos quienes me han dado apoyo incondicional y espero que este trabajo les motive a seguir en la tarea de superación personal y profesional.

Gustavo Panamá

CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| CONTENIDO | VIII |
| RESUMEN | XI |
| PRESENTACIÓN | XII |
| | |
| CAPITULO 1 | 1 |
| MARCO TEÓRICO | 1 |
| 1.1. SISTEMA ELECTRO-ÓPTICO | 1 |
| 1.2.1. CARACTERÍSTICAS DE SISTEMA ELECTRO-ÓPTICO | 2 |
| 1.2. GEO-ESTABILIZACIÓN | 3 |
| 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 5 |
| 1.4. METODOLOGÍA DE PROYECTO | 8 |
| | |
| CAPÍTULO 2 | 11 |
| DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN-TRANSMISIÓN DE IMÁGENES | 11 |
| 2.1. ARQUITECTURA DEL ENLACE DE TRANSMISIÓN DE VÍDEO | 11 |
| 2.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE VÍDEO IMPLEMENTADO | 13 |
| | |
| CAPÍTULO 3 | 18 |
| DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE | 18 |
| 3.1. IMU..... | 18 |
| 3.1.1. NOCIONES DEL FILTRO DE KALMAN..... | 19 |
| 3.1.2. UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL SELECCIONADA..... | 19 |
| 3.2. GPS..... | 22 |
| 3.2.1. RECEPTOR GPS SELECCIONADO | 24 |
| 3.3. PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL | 26 |
| 3.3.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA ROBÓTICA PAN & TILT..... | 27 |
| 3.3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL VEHÍCULO MÓVIL | 31 |
| 3.3.2.1. Configuración Ackerman | 31 |
| 3.3.2.2. Vehículo móvil escogido | 32 |
| 3.3.2.3. Acople entre el vehículo móvil y estructura robótica Pan &Tilt..... | 34 |
| 3.4. TRANSMISIÓN MEDIANTE XBEE | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.1. MÓDULO XBEE SELECCIONADO..... | 36 |
| 3.5. TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CONTROL..... | 38 |
| 3.5.1. ESQUEMA..... | 39 |
| 3.5.2. SISTEMAS MICROPROCESADOS..... | 40 |
| 3.5.2.1. ATmega 164PA..... | 40 |
| 3.5.2.2. ATmega 168..... | 43 |
| 3.5.3. COMPONENTES..... | 45 |
| 3.5.4. MANEJO MOTORES DC..... | 47 |
| 3.5.5. MANEJO SERVOS..... | 51 |
| 3.6. FUENTES DE PODER..... | 54 |
| 3.6.1. FUENTE DE ENERGÍA UTILIZADA..... | 54 |
| 3.6.2. NIVELES DE VOLTAJE USADOS PARA EL SISTEMA DE CONTROL..... | 56 |
| 3.6.3. CONSUMO DE ENERGÍA..... | 56 |
| 3.7. PROTOTIPO FINAL..... | 57 |
| | |
| CAPÍTULO 4..... | 59 |
| | |
| PROGRAMACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CONTROL COMPLEMENTARIOS Y DESARROLLO DEL HMI..... | 59 |
| 4.1. SISTEMA DE CONTROL..... | 59 |
| 4.1.1. INTRODUCCIÓN..... | 59 |
| 4.1.2. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 60 |
| 4.1.2.1. Datos de sensores inerciales..... | 60 |
| 4.1.2.2. Datos para el control manual..... | 63 |
| 4.1.2.3. Trama de datos para el control..... | 64 |
| 4.1.3. ESTABILIZACIÓN DE LA CÁMARA POR MEDIO DE ÁNGULOS..... | 66 |
| 4.1.4. GEO-ESTABILIZACIÓN DE LA CÁMARA POR MEDIO DE ÁNGULOS EULER Y GPS | 68 |
| 4.1.4.1. Cálculo de ángulo yaw..... | 69 |
| 4.1.4.2. Filtro pasa bajos..... | 69 |
| 4.1.4.3. Posición geográfica del sistema robótico..... | 72 |
| 4.1.4.4. Posición geográfica del lugar a apuntar..... | 74 |
| 4.1.4.5. Cálculo para la geo-estabilización..... | 74 |
| 4.1.5. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA 164PA..... | 77 |
| 4.1.6. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA 168..... | 87 |
| 4.2. DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO..... | 89 |
| 4.2.1. FUNCIÓN SENSORES..... | 90 |
| 4.2.2. FUNCIÓN ESTABILIZACIÓN..... | 94 |
| 4.2.3. FUNCIÓN GEO-ESTABILIZACIÓN..... | 94 |

| | |
|--|------------|
| 4.2.4. FUNCIÓN CÁMARA..... | 95 |
| CAPÍTULO 5 | 97 |
| PRUEBAS Y RESULTADOS..... | 97 |
| 5.1. EXPERIMENTACIÓN EN LABORATORIO..... | 97 |
| 5.1.1 PRUEBA DE LOS ENLACES INALÁMBRICOS | 97 |
| 5.1.1.1. Prueba del canal inalámbrico de imagen | 97 |
| 5.1.1.2. Prueba de enlace inalámbrico de comandos de control | 98 |
| 5.1.1.3. Prueba de enlace inalámbrico simultáneo: imagen y datos de control..... | 99 |
| 5.1.2. PRUEBAS DEL SENSOR ELECTRO-ÓPTICO | 102 |
| 5.1.3. ESTABILIZACIÓN DE IMAGEN CON IMU | 107 |
| 5.1.4. GEO-ESTABILIZACIÓN CON GPS | 109 |
| 5.1.5. SENSORES | 111 |
| 5.2. EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO..... | 114 |
| CAPÍTULO 6 | 115 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 115 |
| 6.1. CONCLUSIONES | 115 |
| 6.2. FUTURAS MEJORAS | 117 |
| GLOSARIO | 119 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 121 |

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es realizar el diseño y la construcción de un sistema de geo-estabilización para una cámara de un sistema electro-óptico que permita estabilizar de forma independiente la estructura robótica donde está montada la cámara para mantener en la mira al objetivo, dicha estructura a la vez se encuentra montada a un vehículo móvil terrestre con dos fines: uno es simular las perturbaciones ante las cuales el sistema de geo-estabilización debe compensar y mantenerse estable, y otro es explorar el entorno y adquirir información. La estabilización permite compensar y atenuar las variaciones de giros en dos ángulos que definen la actitud del vehículo móvil, que son: yaw o heading (ángulo de orientación) y pitch (ángulo de elevación). Adicionalmente se tiene programado un algoritmo dedicado para realizar el seguimiento de objetivo o tracking a través de identificación de formas.

Para cumplir con este objetivo, se utiliza una estructura robótica capaz de efectuar movimientos horizontal y vertical cuyos actuadores son servomecanismos, es decir cuenta con dos grados de libertad. El control de los servomotores se realiza mediante un microcontrolador que ejecuta los comandos de control en la estación remota. La estación de control procesa directamente la información de los sensores a fin de determinar los comandos para manejar el sistema de geo-estabilización. Los sensores utilizados son, una unidad de medida inercial o IMU (del inglés Inertial Measurement Unit) para detectar variaciones de giros y un receptor del sistema de posicionamiento global o GPS (del inglés Global Positioning System) que ayuda a determinar la ubicación geográfica y determinar distancias a una escala mayor. El enlace entre la estación de control y la estación remota es inalámbrico vía XBee. La transmisión de las imágenes obtenidas se realiza por radiofrecuencia.

El algoritmo de control y el monitoreo de las imágenes se efectúa en un computador de la estación de control donde se dispone de una interfaz de usuario desarrollado en MATLAB.

PRESENTACIÓN

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 (del inglés Unmanned Aerial Vehicle) 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 vídeo (sensor electro-óptico) que permita enfocar un blanco (objetivo). Los sistemas de geo-estabilización son necesarios en soluciones tecnológicas aplicadas a seguridad, movilidad, e inteligencia artificial orientada a sistemas de decisión en tiempo real, visión artificial y sistemas vídeo-inteligente.

La disponibilidad de un sistema geo-estabilizador es relevante porque permite compensar el movimiento de un vehículo terrestre, aéreo o acuático, de tal manera de enfocar con exactitud el objetivo a fin de evitar la pérdida o distorsión de la información. Por lo tanto, es imprescindible diseñar y construir un sistema que permita mantener en la mira el blanco deseado atenuado las perturbaciones sobre el vehículo móvil, de esta manera el sensor electro-óptico adquiere la imagen estabilizada del objetivo sin excesivas distorsiones.

El presente proyecto está dividido en 5 capítulos, que describen secuencialmente la metodología seguida para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, los mismos que se detallan a continuación:

Capítulo 1, describe el estado del arte, las aplicaciones del sistema de geo-estabilización y el planteamiento del problema. El presente capítulo pretende dar una breve visión sobre el objetivo planteado, trata sobre los conceptos básicos de los sistemas electro-ópticos así como también sobre los sistemas de geo-estabilización y finalmente se plantea la metodología a seguir para obtener el resultado esperado.

Capítulo 2, detalla el funcionamiento del subsistema de adquisición y transmisión de imágenes por radiofrecuencia caracterizado por ser un canal dedicado a fin de obtener la información del entorno en tiempo real.

Capítulo 3, puntualiza la instrumentación electrónica y una breve descripción del funcionamiento de la plataforma inercial que incluye sensores inerciales y del receptor GPS para posicionamiento geográfico. Se describe la construcción del hardware para el sistema de geo-estabilización de tal manera de hacer uso de sus dos grados de libertad para satisfacer el enfoque del blanco, a la vez apreciar la compensación de dicho sistema ante variaciones de orientación y distancias.

Capítulo 4, presenta el desarrollo de los algoritmos de programación que permiten la comunicación entre los diferentes dispositivos dedicados cuya información es tratada y representada a comandos de control para el correcto funcionamiento del sistema de geo-estabilización. Se describe mediante diagramas del flujo, códigos de programa y esquemas el sistema de control desarrollado, y la interfaz gráfica para el monitoreo de la información.

Capítulo 5, esta sección muestra la tabulación de pruebas y resultados de los dispositivos involucrados.

Capítulo 6, contiene las conclusiones y mejoras a futuro más relevantes acerca del proyecto.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

El presente capítulo pretende dar una breve visión sobre el objetivo planteado, trata sobre los conceptos básicos de los sistemas electro-ópticos así como también sobre los sistemas de geo-estabilización y finalmente se plantea la metodología a seguir para obtener el resultado esperado.

1.1. SISTEMA ELECTRO-ÓPTICO

Los sensores electro-ópticos (EO) constan de dos componentes, una cámara, la cual se encarga de capturar las imágenes; y un telémetro láser (LRF, Laser Range Finder), cuya función es la medición de distancias con láser. Todo esto se monta en una caja robusta y hermética, y ha de estar sobrepresurizada con nitrógeno seco para garantizar el máximo rendimiento y fiabilidad de los sensores [1].



Figura 1.1 Sensor EO SHAPO [2]

Los sensores EO, son capaces de capturar imágenes, tanto en el espectro visible como en el infrarrojo (IR). Es importante resaltar que poseen dos ejes de movimiento, el eje de azimut, el cual permite realizar movimientos en el eje horizontal de la cámara; y el eje de elevación, que permite realizar movimientos en el eje vertical [1].

1.2.1. CARACTERÍSTICAS DE SISTEMA ELECTRO-ÓPTICO

La Fuerza Aérea Ecuatoriana en el Proyecto UAV cuenta con un sistema electro-óptico modelo SHAPO de la marca CONTROP Precision Technologies Ltd., de fabricación Israelí. El sistema EO se destina para tareas de observación, detección y vigilancia. Se estudia este sistema electro-óptico comercial para identificar sus características y componentes más importantes. El sistema cuenta con dos cámaras. Una cámara en el espectro visible, la misma que está destinada para misiones diurnas. La segunda cámara es una térmica y está destinada para misiones de detección nocturnas.

En el entorno de sistemas electro-ópticos, SHAPO se caracteriza como un equipo multisensor de peso ligero, ya que su peso es de 10 kg y su diámetro de 24cm. Para las cámaras cuenta con un sensor CCD (visible) y un sensor FLIR (térmico). El sensor CCD es de 640 x 512 pixeles. En la parte óptica cuenta con un sistema de zoom continuo y calidad de imagen de alta resolución. Para el zoom cuenta con un lente de 320 mm.

Sus sistemas permiten funciones como: estabilización, tracking, identificación de objetivos en completa oscuridad, entre otras. Para realizar la estabilización cuenta con un Sistema de Navegación Inercial montado internamente en el sistema. Existen modelos con medidor y apuntador láser.

El sistema puede ser montado en: UAVs, helicópteros, aviones ligeros, botes de patrulla, dirigibles, vehículos blindados, entre otros.

Las aplicaciones principales son: observación día/noche, vigilancia, búsqueda y rescate, seguridad terrestre, fotografía aérea, entre otras.

La apariencia física del sistema EO SHAPO se muestra en la figura 1.1. Las bondades de su funcionamiento se observaron en reiteradas ocasiones en las instalaciones de la FAE a fin de poder desarrollar el proyecto planteado.

1.2. GEO-ESTABILIZACIÓN

Para entender el concepto de geo-estabilización amerita la revisión de conceptos adicionales tales como: algoritmo de geolocalización, permite conocer la posición del lugar donde está apuntando la cámara, es decir, permite calcular la latitud, longitud y altura de la posición geográfica a la que la cámara apunte en el momento que el operador le indique al vehículo aéreo no tripulado o UAV (del inglés Unmanned Aerial Vehicle), y algoritmo de geoapuntamiento, permite calcular la actitud de la cámara para que ésta apunte a un objetivo determinado, en otras palabras, permite calcular los ángulos del sensor EO para que éste apunte a una latitud, longitud y altura determinadas por el operador del UAV situado en tierra [1].

En base a la información previa se deduce el concepto de geo-estabilización como el algoritmo que permite realizar dos acciones: la primera, consiste en controlar y estabilizar a la cámara del sistema electro-óptico con el fin de mantener en la mira un determinado objetivo atenuando las variaciones violentas y vibraciones que se producen en la base donde está instalado el sistema EO; y la segunda, es conocer la posición geográfica del sistema EO para lo que se trabaja en conjunto con Google Earth para luego realizar el apuntamiento del blanco u objetivo mediante una técnica de estimación de posición que permite a la vez determinar la distancia a la cual se encuentra el objetivo.

Se considera primero la actitud del vehículo móvil, es decir, su orientación angular respecto a un sistema de referencia móvil, en este caso el llamado BCS (Body Coordinate System) o sistema de coordenadas sólidas, cuyo origen se encuentra en el centro de gravedad (CG) o el punto donde se considera concentrada la masa del cuerpo a ser analizado [3]. También se consideran como ejes de referencia fijos en el cuerpo móvil, llamados: eje vertical o de guiñada (yaw en inglés), eje transversal o de cabeceo (pitch en inglés) y eje longitudinal o de alabeo (roll en inglés) [4]; las rotaciones sobre cada eje son intrínsecas, es decir, relativas al sistema móvil y se los denominada con los mismos nombres que tiene los ejes, las consideraciones mencionadas se indican en la figura 1.2.

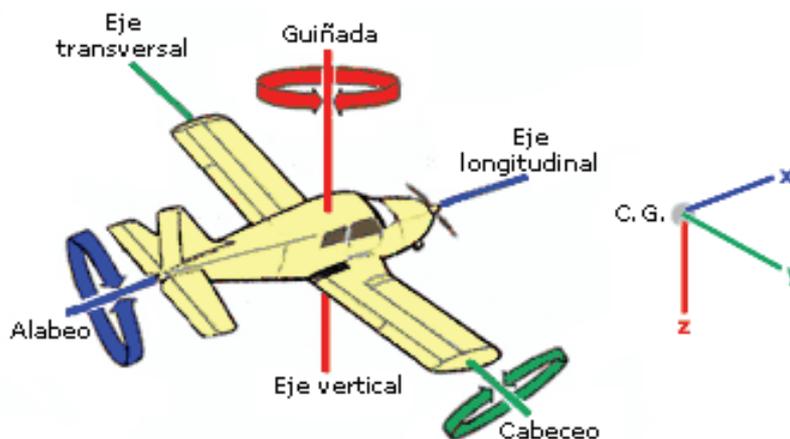


Figura 1.2 Ejes de rotación y movimientos del sistema de coordenadas body [5]

Por lo tanto, **la actitud del sistema móvil está dada por los ángulos pitch y roll, mientras la orientación la determina el ángulo yaw, en forma general se los conoce como ángulos de Euler y se los utiliza en navegación para especificar la actitud del móvil.** En la figura 1.3 se indican las tres rotaciones principales de una aeronave, los cuales dan lugar a los ángulos que definen la actitud del sistema aéreo. Los ángulos son [1]:

- θ , ángulo de cabeceo (pitch) del vehículo que varía entre $[-90^\circ$ y $90^\circ]$. El ángulo de elevación se mide en sentido positivo desde el plano del horizonte local.
- ϕ , ángulo de alabeo (roll) del vehículo que varía entre $[-180^\circ$ y $180^\circ]$.
- ψ , ángulo de guiñada (yaw) del vehículo que varía entre $[-180^\circ$ y $180^\circ]$.

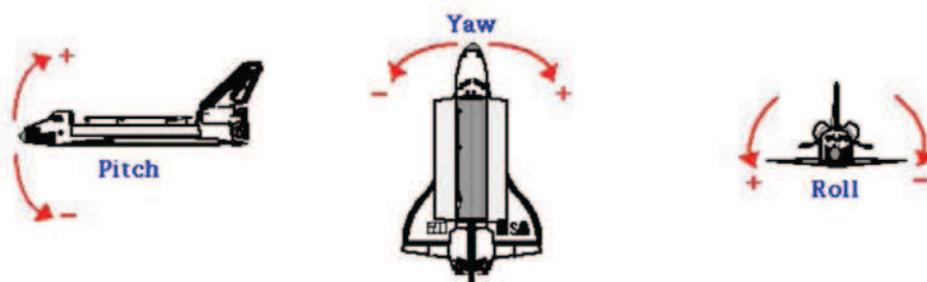


Figura 1.3 Ángulos de Euler en una aeronave

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se va a diseñar y construir el sistema de geo-estabilización para controlar una plataforma robótica que contiene un sistema electro-óptico, el cual permita localizar, enfocar y mantener en la mira un objetivo a través de una unidad de medida inercial o IMU (del inglés Inertial Measurement Unit) y un receptor del sistema de posicionamiento global o GPS (del inglés Global Positioning System).

El concepto de geo-estabilización en el presente proyecto está asociado a la estabilización en dos grados de libertad o dos DoF (del inglés Degrees of Freedom) que representan los movimientos horizontal y vertical de la cámara de un sistema electro-óptico cuyo propósito es mantener el objetivo en la mira, el sistema también tiene posicionamiento geográfico dado por latitud, longitud y altura.

El objetivo a ser apuntado es establecido de forma automática en base a la orientación final del sistema electro-óptico seteada por el usuario de forma manual mediante el uso del joystick. Para los fines de este proyecto el sistema electro-óptico estará constituido básicamente por la estructura robótica de dos DoF, la cámara de vídeo, los módulos de enlace de comunicaciones y la tarjeta electrónica de control donde se instalan la unidad de medida inercial o IMU y el receptor GPS. El esquema del sistema se puede ver en la figura 1.4.

El algoritmo de estabilización está desarrollado en el paquete computacional MATLAB en un computador de la estación de control desde donde se monitorea la información del entorno y se adquiere los datos de los dispositivos remotos, se procesan los datos para luego enviar los comandos de control de forma inalámbrica hacia la estación remota que representa la plataforma robótica la misma está formada por el sistema electro-óptico y el vehículo móvil.

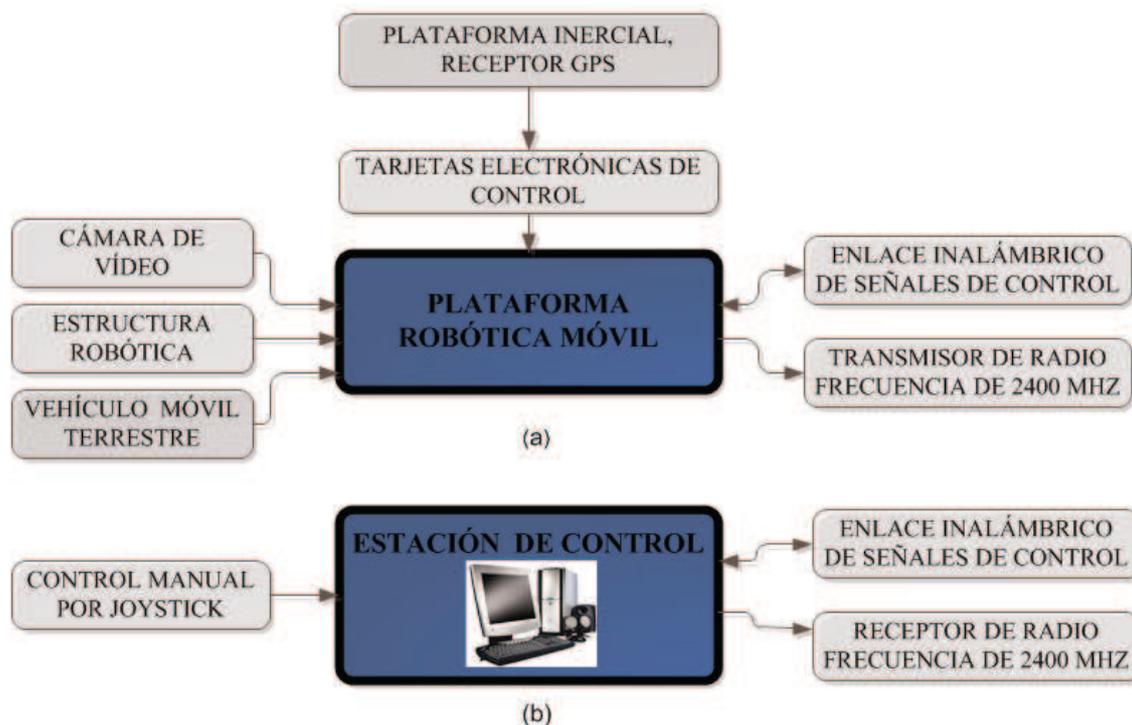


Figura 1.4 Esquema del sistema de geo-estabilización. Componentes principales (a) de la estación móvil o remota, (b) de la estación de control

A continuación se presenta algunos estudios acerca de los sistemas geo-estabilizadores de electro-ópticos:

Sistema Basado en el Empleo de Vehículos Aéreos no Tripulados para la Lucha Contra Incendios Forestales [6] (Portugal 2005)

En el artículo se presenta el sistema desarrollado en el proyecto “COMETS: Real-time Coordination and Control of Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles” del programa IST (Information Society Technology) de la Comisión Europea y su aplicación a la detección y monitorización de incendios forestales.

Los principales sensores para percepción del entorno son las cámaras de infrarrojos, cámaras visuales y un sensor puntual de fuego. Tienen mecanismos que permiten orientar las cámaras y el sensor de fuego de forma independiente del resto del UAV. Estos mecanismos contienen codificadores que permiten medir los ángulos de orientación de las cámaras.

La geo-estabilización es muy útil en la observación, específicamente cuando se envíen imágenes estabilizadas del fuego en vuelo estacionario de las aeronaves. El método empleado para geo-estabilizar las imágenes es efectuado mediante un sistema de procesamiento de imagen a bordo. Con estas imágenes estabilizadas es posible determinar parámetros del avance del frente de llamas empleando técnicas de segmentación de fuego.

Control Robusto para un Sistema de Estabilización Gimbal en dos Ejes [7] (Corea 2008)

Un sistema de estabilización gimbal en dos-ejes en los vehículos aéreos debe estabilizar la línea de vista hacia un blanco en contra del movimiento externo inducido por el vehículo aéreo maniobrado y las fuerzas aerodinámicas. Este estudio introduce un modelo del servo-control para un sistema de estabilización gimbal en dos-ejes, y presenta controladores robustos para el sistema de estabilización del vehículo aéreo.

Diseño de un Controlador PI Robusto para la Línea de Vista de un Sistema de Estabilización [8] (China 2012)

Se ha diseñado un robusto proporcional integral (PI) para lograr un alto rendimiento y alta precisión en la estabilización de la línea de vista o LOS (del inglés Line Of Sight) del sistema de estabilización. Se ha investigado la capacidad del sistema para rechazar las perturbaciones externas, atenuar el ruido de medición y su robustez. El modelo propuesto presenta una simplicidad y aplicabilidad para el diseño de un sistema de control robusto.

Conclusión: El desarrollo de plataformas estabilizadas para sensores electro-ópticos es reconocible en países desarrollados, pero ningún estudio hace énfasis en un sistema de geo-estabilización que es un valor agregado para los sistemas giro-estabilizados propiamente dicho. Sin embargo, se cuenta con estudios más detallados relacionados al campo del control como son la optimización y

controlares robusto que tienden a crecer cada día por la importancia de tener una imagen estabilizada del objetivo o blanco porque atenúan las distorsiones provocadas por rotaciones y movimientos bruscos de una plataforma de soporte en general. Por lo tanto, el presente proyecto busca construir un geo-estabilizador modelo básico el cual represente un potencial prototipo a ser mejorado por su utilidad en tareas de vigilancia, seguridad y monitoreo en diferentes campos: defensa, agricultura, catastros, entre otras.

1.4. METODOLOGÍA DE PROYECTO

El sistema electro-óptico geo-estabilizado se utiliza como sensor para adquisición de imágenes estabilizadas de blancos, incluye una estructura robótica de estabilización que actúa sobre la plataforma o superficie de carga útil con respecto a la base donde se encuentra montada, vehículo móvil. La estructura de estabilización incluye dos servomotores para hacer girar la plataforma de carga útil con respecto a la base alrededor de dos ejes perpendiculares de rotación.

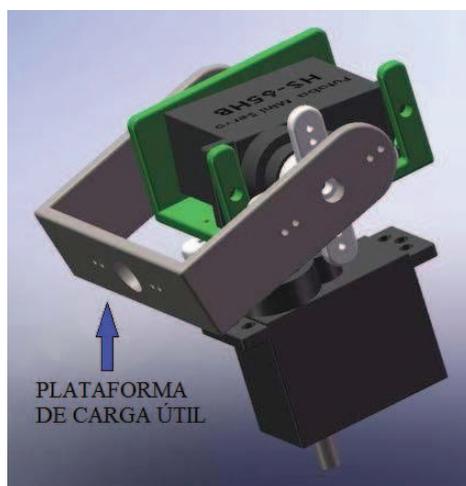


Figura 1.5 Plataforma de carga útil de una estructura pan & tilt [9]

En el sistema de geo-estabilización desarrollado, la información que proveen los ángulos de Euler: roll, yaw y pitch, reflejan exactamente la actitud del vehículo móvil basado en un sistema de referencia tridimensional centrado en la IMU que se mantiene fija a dicho vehículo, de esta manera se conocen los giros efectuados con respecto a los ejes longitudinal (guiñada), vertical (cabeceo) y lateral (alabeo), ilustrados en figura 1.2.

El algoritmo de control permite realizar la estabilización de la cámara acoplada a la estructura robótica utilizando la información proporcionada por un paquete de sensores ubicados sobre la plataforma robótica. El primer sensor corresponde a la plataforma inercial o unidad de medida inercial conocida como IMU, utilizado para detectar los giros y el segundo sensor es el receptor GPS, empleado para determinar posición geográfica lo que implica trabajar con distancias grandes.

Los datos proporcionados por los módulos IMU y GPS se procesan electrónicamente para tener una información fidedigna del entorno. El algoritmo de control desarrollado en base a estas señales permitirá compensar las variaciones de giros en dos ejes mediante el manejo de los servomotores de la estructura robótica a fin de realizar movimiento horizontal conocido también como PAN, y vertical o TILT, de la cámara de vídeo. Para iniciar la estabilización se toma como punto de referencia la actitud final de la plataforma robótica móvil, es decir, la orientación angular donde arranque el sistema móvil en mención, además dicha orientación puede ser establecida mediante el joystick por el usuario.

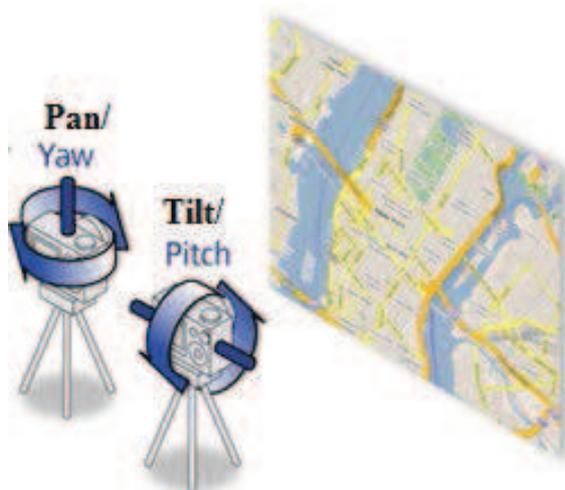


Figura 1.6 Movimientos pan & tilt de una cámara

El algoritmo de estabilización está desarrollado en el paquete computacional MATLAB en un computador de la estación de control, donde se procesan los datos de IMU y GPS para luego transmitir los comandos de control hacia la estación remota. La comunicación de datos es inalámbrica entre la plataforma

robótica móvil y la estación de control, y se efectúa a través de módulos XBeePRO serie 1.

El monitoreo de la información adquirida por el sensor electro-óptico se realiza mediante un transmisor de vídeo que trabaja en la banda de 2.4 GHz de tal manera que se pueda visualizar la imagen en tiempo real.

Los sistemas de geo-estabilización se pueden emplear principalmente en las siguientes actividades [10]:

- Acceso a zonas de alto riesgo
- Reconocimiento y recolección de información
- Seguridad, monitoreo y vigilancia: redes, fronteras, tráfico
- Monitoreo ambiental y meteorología
- Búsqueda y rescate
- Detección de incendios forestales, alertas tempranas
- Fotografía aérea y filmación
- Cartografía, modelado de superficies terrestres
- Geofísica aplicada (exploración minera)

CAPÍTULO 2

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN-TRANSMISIÓN DE IMÁGENES

Este capítulo describe la arquitectura y el funcionamiento del subsistema de adquisición y transmisión de imágenes por radiofrecuencia a fin de tener información del entorno y a la vez visualizar la imagen geo-estabilizada.

2.1. ARQUITECTURA DEL ENLACE DE TRANSMISIÓN DE VÍDEO

Se considera el diagrama de bloques que representa la implementación del enlace de vídeo, este canal de comunicación permite obtener la información adquirida del entorno mediante el sistema electro-óptico.

El canal o medio físico de transmisión que se utiliza es la atmósfera (aire), por lo tanto, la propagación se hace en forma de ondas electromagnéticas de radiofrecuencia (RF) [11]. En la figura que sigue, se muestra el esquema general de un enlace RF:



Figura 2.1 Sistema de comunicaciones RF

En la Tabla 2.1 se indican los nombres que reciben las ondas electromagnéticas en función de su frecuencia.

Algunas de las aplicaciones de la banda de frecuencia UHF son: televisión, hornos microondas, dispositivos/comunicaciones de microondas, radioastronomía, telefonía móvil, redes de área local o LAN inalámbricas, bluetooth, ZigBee, GPS, radioafición, entre otras [12].

Tabla 2.1 Denominación de las bandas de RF [13]

| Nombre | Frecuencias | Longitud de onda |
|---|---------------|-------------------|
| Frecuencia extremadamente baja o ELF (extremely low frequency) | 3-30 Hz | 100.000–10.000 km |
| Súper baja frecuencia o SLF (super low frequency) | 30-300 Hz | 10.000–1.000 km |
| Ultra baja frecuencia o ULF (ultra low frequency) | 300–3000 Hz | 1000–100 km |
| Muy baja frecuencia o VLF (very low frequency) | 3–30 kHz | 100–10 km |
| Baja frecuencia o LF (low frequency) | 30–300 kHz | 10–1 km |
| Media frecuencia o MF (medium frequency) | 300–3.000 kHz | 1 km – 100 m |
| Alta frecuencia o HF (high frequency) | 3–30 MHz | 100–10 m |
| Muy alta frecuencia o VHF (very high frequency) | 30–300 MHz | 10–1 m |
| Ultra alta frecuencia o UHF (ultra high frequency) | 300–3000 MHz | 1 m – 100 mm |
| Súper alta frecuencia o SHF (super high frequency) | 3-30 GHz | 100–10 mm |
| Frecuencia extremadamente alta o EHF (extremely high frequency) | 30-300 GHz | 10–1 mm |

El dispositivo utilizado para la transmisión de vídeo, trabaja en la Banda UHF (resaltada en la tabla 2.1), a 2.4 GHz está dentro del rango de la banda 2400 - 2500 MHz con frecuencia central de 2450 MHz donde operan sistemas de Modulación Digital de Banda Ancha y enlaces auxiliares de radiodifusión sonora que utilizan técnicas de modulación digital de banda ancha sin protección contra interferencias perjudiciales [14].

Las bandas 902-928 MHz (frecuencia central 915 MHz), 2400-2500 MHz (frecuencia central 2 450 MHz), están designadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas, conocidas comúnmente como ICM. Los servicios de radiocomunicación que funcionan en estas bandas deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones [14].

2.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE VÍDEO IMPLEMENTADO

Este sistema utiliza dispositivos pequeños y de costos moderados a fin de obtener un prototipo básico que reproduzca de forma sencilla la operación de un sistema de transmisión inalámbrico de imágenes. Para implementar este sistema se utilizan los siguientes componentes:

- Filmadora Sony handycam dcr-hc38
- Transmisor y receptor inalámbrico de audio y vídeo (A/V) de 3W
- Convertidor de vídeo análogo a USB o capturador de vídeo
- Computador para la visualización de la información

El esquema general del subsistema de adquisición y transmisión de imágenes:

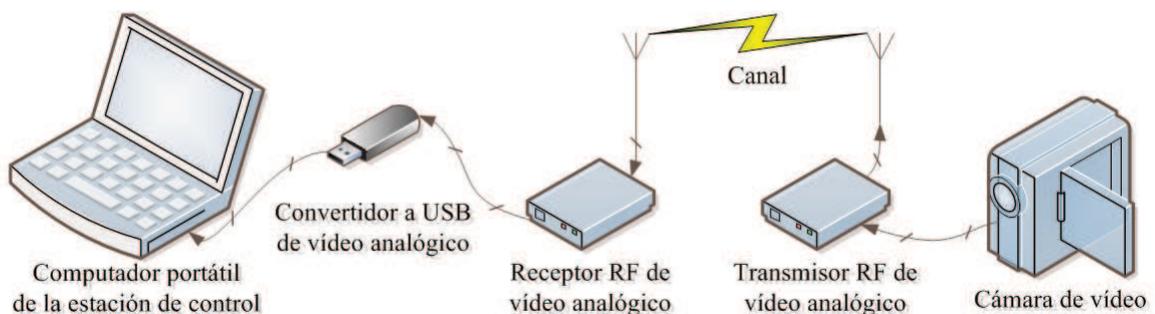


Figura 2.2 Transmisión por radio de vídeo análogo

La ventaja que ofrece la frecuencia de transmisión de 2.4 GHz es su fácil acceso por estar dentro de la esfera pública, sin embargo la confidencialidad de la información adquirida no se garantiza porque otros dispositivos sintonizados a la misma frecuencia pueden ver los contenidos que se transmitan.

Las características principales de los componentes del enlace inalámbrico de vídeo se describen a continuación:

Vídeocámara Sony handycam dcr-hc38:

- Alimentación:
 - Voltaje de entrada AC: 100V~240V y 50/60Hz
 - Voltaje de salida DC: 8.4 V
- Zoom: 40X (óptico)
- Almacenamiento de datos: videocasete
- Sensor de la imagen: 3.0 mm CCD
- Píxeles efectivos: 340000
- Consumo de energía promedio: 2 W
- Peso aproximado: 420 g
- Temperatura de operación: 0 a 40 °C



Figura 2.3 Filmadora Sony handycam dcr-hc38

Transmisor y receptor inalámbrico de 2.4 GHz:

- Alimentación del transmisor (TX)
 - Voltaje de entrada AC: 100V~240V y 50/60Hz
 - Voltaje de salida DC: +12V a 2A
- Polarización del Receptor (RX)
 - Voltaje de entrada AC: 100V~240V y 50/60Hz
 - Voltaje de salida DC: +12V a 1A

- Frecuencia estándar: 2.4 GHz
- Antena: parabólica direccional
- Potencia de transmisión: 3 W
- Alcance de transmisión: 1 Km con línea de vista
- Rango de la frecuencia de trabajo: 2414 MHz – 2468 MHz
- Canales seleccionables: 12
- Peso aproximado del paquete completo: 1000 g
- Temperatura de operación: 0 a 50 °C

El paquete del transmisor y receptor inalámbricos A/V mencionados anteriormente se muestra en la figura 2.4:



Figura 2.4 Receptor y transmisor de radio de 3W

El alcance de los sistemas de transmisión de RF (radiofrecuencia) está relacionada con la potencia de transmisión del dispositivo transmisor, los valores aproximados de la distancia alcanzada varían en función de varios parámetros, entre ellos: condiciones ambientales y atmosféricas, tipo de antena, potencia de transmisión, etc. La tabla 2.2 indica los valores de los alcances con línea de vista:

Tabla 2.2 Intervalo (diámetro) aproximado de transmisores de potencia de FM [15]

| Potencia FM | Distancia en línea recta |
|--------------|--------------------------|
| 0.1W ~ 5W | 100m ~ 1Km |
| 5W ~ 15W | 1Km ~ 3Km |
| 15W ~ 80W | 3Km ~ 10Km |
| 80W ~ 500W | 10Km ~ 30Km |
| 500W ~ 1000W | 30Km ~ 50Km |
| 1KW ~ 2KW | 50Km ~ 100Km |
| 2KW ~ 5KW | 100Km ~ 150Km |
| 5KW ~ 10KW | 150Km ~ 200Km |

La tabla 2.2 indica las distancias teóricas en línea recta de los transmisores FM cuyos datos son similares a la de los radios A/V utilizados en la banda UHF. Por lo tanto, se utilizará esta referencia con el fin de dimensionar el alcance deseado de forma ideal del sistema de transmisión de imagen del presente proyecto. A fin de alcanzar el prototipo básico esperado se realiza la implementación del sistema de transmisión inalámbrico de vídeo utilizando un kit transmisor-receptor de radio de 3 vatios cuyo alcance ideal es de 1 Km, el transmisor-receptor de radio seleccionado tiene un alcance real de aproximadamente 100 m y permite manejar un rango de frecuencias de trabajo en la banda ICM de 2.4 GHz. La utilización de este sistema de radio dedicado permite transmitir la imagen adquirida en tiempo real.

Convertidor a USB de vídeo análogo:

- USB 2.0 de alta velocidad
- Entrada de audio y vídeo para la edición



Figura 2.5 Sintonizador de TV Analógica con FM y entrada A/V

El funcionamiento del subsistema de transmisión de imagen se describe de la siguiente manera:

1. El sensor que permite captar la información deseada representada mediante la cámara de vídeo se conecta al transmisor A/V mediante el cable de vídeo cuyos terminales son de color amarillo.
2. Se conecta el dispositivo receptor A/V al conversor a USB de vídeo análogo utilizando el mismo tipo de cable del paso anterior.
3. Conectar el conversor a un puerto USB del computador donde debe estar instalado el software de dicho conversor llamado Viva-TV.
4. Se escoge la frecuencia apropiada con los dip switches que dispone el transmisor y el receptor, la transmisión se efectúa siempre que trabajen a la misma frecuencia y se requiere que la ubicación de los controles sea idéntica.
5. Finalmente se puede visualizar la imagen en el computador interactuando con el software del conversor de vídeo análogo a USB, también se puede ver el vídeo desde cualquier plataforma computacional de programación como MATLAB o LABVIEW. El resultado obtenido es la transmisión de imagen inalámbrica funcionando de manera independiente a través de un canal propio, y con la información en tiempo real.

Es importante energizar todos los componentes del sistema para poder visualizar la transmisión de la imagen percibida en el computador. A modo ilustrativo se puede ver la figura 2.2 donde se indican los componentes de la transmisión inalámbrica de vídeo análogo.

La visualización de la imagen percibida se realiza de forma efectiva mediante el software del conversor a USB con salida en un solo formato, adicionalmente en base al paquete computacional MATLAB se verifica la adquisición de la imagen en diferentes resoluciones y formatos utilizando para ello el toolbox de adquisición de imagen. La herramienta de adquisición da la facilidad de adquirir, procesar, almacenar, realizar cambios de formato, aplicar de filtros, etc.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE

Se detalla la instrumentación electrónica necesaria para los módulos GPS e IMU, diseño y ensamblaje de la estructura robótica pan & tilt, descripción de actuadores del sistema pan & tilt y vehículo móvil, los modos de enlace de datos y controles de las tarjetas electrónicas de mando.

3.1. IMU

Una IMU (Inertial Measurement Unit) es en general un sistema cerrado que es usado para detectar la orientación, localización y movimiento. Típicamente se encuentra en un avión o en un UAV (Unmanned Aerial Vehicle), normalmente este dispositivo usa una combinación de acelerómetros y sensores de velocidad angular o giroscopios para conocer cómo se está moviendo éste y en qué posición se encuentra. Las IMUs son normalmente un componente de un sistema de navegación [16].

Históricamente la navegación inercial nace en el siglo XX. Sus antecedentes se encuentran en la navegación a estima y en la invención de los primeros giróscopos en el siglo XIX [17]. El principal sensor de la navegación inercial corresponde a una IMU.

Los sistemas inerciales se basan en acelerómetros y giróscopos; los primeros, miden aceleración lineal, y los otros, la velocidad de giro en el vehículo en que van montados. Pero sólo miden aceleraciones y velocidades de giro, no dicen dónde se encuentran. La posición, velocidad y orientación o actitud se calcula a partir de la información que proporcionan acelerómetros y giróscopos en los correspondientes ejes tridimensionales ortogonales.

3.1.1. NOCIONES DEL FILTRO DE KALMAN

El filtro de Kalman [18] es una técnica de estimación basado en modelo, se utiliza en sistemas altamente dinámicos para conocer su estado a lo largo de la evolución en el tiempo. El filtro de Kalman aporta un procedimiento óptimo para estimar el estado de un sistema, minimizando el valor cuadrático medio del error cometido en esa estimación.

Se aplica en sistemas lineales y no lineales, para un sistema lineal se utiliza el filtro de Kalman, mientras para un sistema no lineal hay que hacer uso del filtro de Kalman extendido [16].

Utilizando el filtro de Kalman se puede obtener la actitud de un sistema móvil (aéreo, terrestre, acuático). La determinación de la actitud implica el cálculo de los ángulos de Euler determinados a partir del horizonte y con referencia al norte, se utiliza la siguiente nomenclatura:

- φ (letra griega phi), representa el ángulo de roll
- θ (letra griega theta), simboliza el ángulo de pitch
- Ψ (letra griega psi), indica el ángulo de yaw o de orientación.

3.1.2. UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL SELECCIONADA

La IMU escogida para el presente proyecto es la CHR-UM6 que 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 estándar. Cuenta con un filtro de Kalman extendido o EKF (del inglés Extended Kalman Filter) implementado en un microcontrolador de 32 bits. Las principales características de este dispositivo son:

- Voltaje de alimentación: 3.5 a 5.0 V
- Corriente: 52 mA
- Temperatura de operación: -40 a 80 °C
- Protocolos de comunicación: Serial RS232, SPI
- Tasa de actualización de datos: 20 a 300 Hz

- Tasa de transferencia de datos: hasta 115200 baudios
- Dimensiones: 30x30x10 mm



Figura 3.1 Plataforma Inercial CHR-UM6 [19]

Utilizando las variables de la IMU se pretende obtener la compensación ante los movimientos más importantes de la base donde está montado el sistema electro-óptico. Los parámetros habilitados de la IMU y su utilidad para llevar a cabo el proyecto, se resumen en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Parámetros utilizados de la IMU

| Parámetro | Aplicación |
|----------------------------|---|
| Ángulos Euler | <ul style="list-style-type: none"> • Obtener los ángulos de rotación: pitch, roll, yaw • Reflejar la orientación angular de la plataforma robótica móvil en una imagen en 3D en la estación de control. • Efectuar estabilización de imagen. • Visualizar en forma gráfica los datos. |
| Posicionamiento Geográfico | <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la posición geográfica del sistema. • Visualizar la ubicación geográfica a través de Google Earth. • Hacer direccionamiento para la identificación de objetivos globales. |
| Acelerómetros | <ul style="list-style-type: none"> • Visualizar en forma gráfica los datos. |
| Magnetómetros | <ul style="list-style-type: none"> • Calcular el norte magnético • Visualizar en forma gráfica los datos. |

Ángulos Euler: Los ángulos de Euler permiten conocer la orientación del objeto donde se encuentra montada la IMU basado en un sistema de referencia tridimensional centrado en dicha IMU. Los ángulos de Euler (roll, yaw y pitch) proveen la suficiente información a fin realizar la estabilización de imagen en dos DoF (yaw y pitch) en tiempo real.

Posicionamiento Geográfico: A través de un GPS conectado directamente a la IMU se obtienen las variables más importantes de posición geográfica: latitud, longitud y altura.

Acelerómetros: Se muestra gráficamente los valores de aceleración en los tres ejes a fin de visualizar la distorsión y el ruido latente en los valores muestreados a causa de vibraciones y motores de la plataforma robótica móvil.

Magnetómetros: Se utiliza los datos del sensor en el eje “y” para calcular la orientación magnética de la plataforma robótica móvil.

La configuración de la IMU se realiza de forma sencilla usando el software CHR Software Serial Interface dado por el fabricante. La interfaz serial permite configurar datos de registros y visualizar datos del trazado en tiempo real.

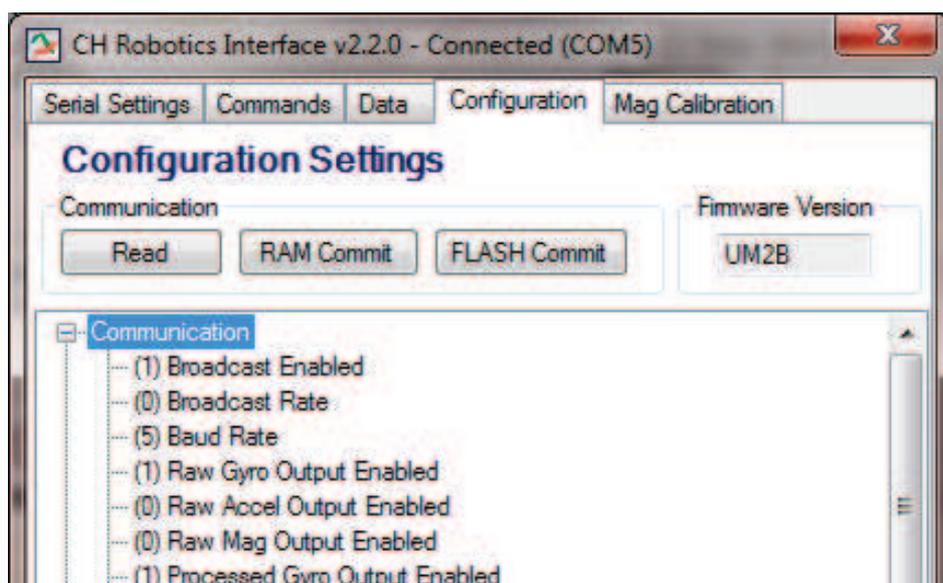


Figura 3.2 Interfaz de configuración de la IMU CHR-UM6

Los parámetros por defecto del enlace serial de la IMU CHR-UM6 con la interfaz de configuración son: 115200 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de parada y sin paridad que el usuario puede cambiar en acuerdo a la aplicación final en la que se utilice.

La alta tasa de datos hace que el proceso de transmisión consuma más energía y disminuya el nivel de integridad de los datos, el problema se hace más crítico por el hecho de que se trabaja bajo un protocolo de enlace inalámbrico, esta característica negativa se corrige tomando en cuenta como punto primordial la desactivación de parámetros que no se utilizan de la IMU y luego se puede bajar la cantidad de bits por segundo o baudios a una tasa aceptable.

La tasa de transferencia de la IMU se fija a 19200 dejando activos solo los parámetros descritos en la tabla 3.1. El nivel más crítico en la comunicación de datos del sistema sucede cuando se transmite todos los datos a la vez, considerando que la trama del GPS es de 19 bytes y se actualiza a 5 Hz, la trama total de la IMU es de 45 bytes a una tasa de 20 Hz y los comandos de control son 13 bytes enviados a 20 Hz. La tasa resultante de bytes por segundo está dado por: $19 \cdot 5 + (45 + 13) \cdot 20 = 1255$. En términos generales la tasa en baudios requeridos es de $1255 \cdot 8 = 10040$, cuyo valor está dentro de la capacidad del enlace serial inalámbrico fijado a 19200 baudios.

3.2. GPS

El sistema GPS (Global Positioning System) fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y empleado como medio para conocer la posición de un objeto o persona a nivel global y determinar su rumbo en aplicaciones de tipo civil o militar [20]. En la década de los 80, el gobierno de los Estados Unidos promovió el uso gratuito de esta tecnología convirtiéndose en una gran ayuda para soluciones de navegación, topográficas y geodésicas a nivel mundial.

El GPS puede considerarse dividido en tres sectores fundamentales: el espacial, el de control y el de usuarios:

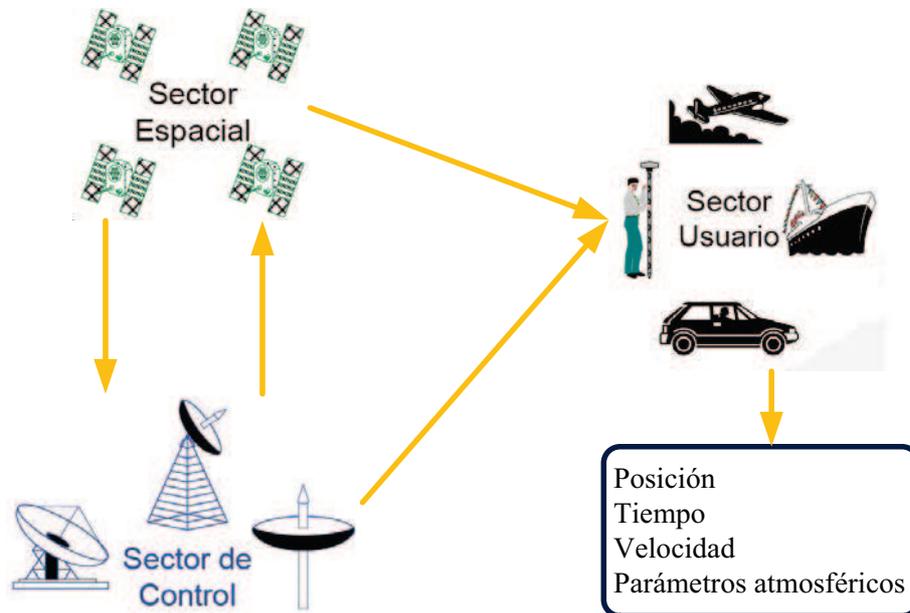


Figura 3.3 Sectores del Sistema GPS [21]

Un dispositivo GPS es básicamente un aparato de orientación que muestra el lugar del planeta en el cual se encuentra exactamente. Los datos proporcionados por receptor GPS para definir la ubicación geográfica son básicamente latitud, longitud, altitud, entre otros adicionales, cuya presentación puede variar dependiendo del modelo, desde dispositivos sin ninguna interfaz hasta interfaces amigables con pantalla incorporada para la visualización de mapas almacenados de regiones.

Generalmente los sistemas GPS instalados en navegadores tienen de manera universal una frecuencia de muestreo de 1 Hz, es decir, dicen dónde está una vez por segundo, por eso la actualización de datos va "a saltos". Hay procesadores GPS que pueden recibir y procesar la señal de los satélites a mayor velocidad, los hay de 5, 10 y 20 Hz.

Los receptores GPS con una tasa elevada de actualización de datos son mucho más caros, y son necesarios para tener una información más confiable sobre el

posicionamiento geográfico en sistemas dinámicos a fin de no realizar algoritmos adicionales tales como predicciones de posicionamiento.

3.2.1. RECEPTOR GPS SELECCIONADO

El modelo utilizado en base a los análisis previos es el GPS LS20031 y presenta las siguientes características:

- Voltaje de alimentación: 3.0 a 4.2 V
- Corriente: 29 mA
- Temperatura de operación: -30 a 85 °C
- Protocolo de comunicación: Serial RS232
- Tasa de muestreo: 1 a 5 Hz
- Tasa de datos: hasta 115200 baudios
- Incluye: antena embebida
- Dimensiones: 30x30x8 mm
- Chip: MediaTek MT3329
- Frecuencia: L1 1575.42MHz
- Canales: 66 canales
- Altitud máxima: <18000 m
- Velocidad máxima: < 515 m/s

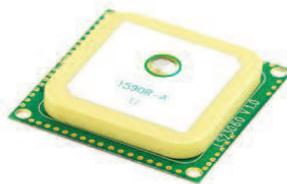


Figura 3.4 Módulo receptor GPS LS20031 [22]

Este dispositivo permite obtener posición, tiempo y velocidad; la posición geográfica se obtiene con una tolerancia de ± 15 m. El GPS envía los datos de posicionamiento a través del protocolo NMEA 0183 ver 3.01 el cual es capaz de enviar 8 diferentes tramas con información específica indicadas en la tabla 3.2. El funcionamiento y la capacidad que tiene el GPS está relacionado con el GNSS [23] (del inglés Global Navigation Satellite System) que es una constelación de

satélites que transmite rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire.

Las sentencias de las tramas del GPS son procesadas por la IMU si operan bajo el protocolo NMEA 0183 (del inglés National Marine Electronics Association). El protocolo NMEA 0183 es una especificación combinada de datos para la comunicación entre dispositivos electrónicos de la Marina entre ellos, el GPS.

Tabla 3.2 Sentencias del protocolo NMEA 0183

| NMEA | Descripción de sentencias | Estado |
|------|---|------------|
| GGA | Arreglo de datos del sistema de posicionamiento global. | Habilitado |
| GLL | Posición geográfica: latitud/ longitud. | Inactivo |
| GSA | Satélites activos del GNSS. | Inactivo |
| GSV | Satélites del GNSS en vista. | Inactivo |
| RMC | Datos específicos de GNSS mínimos recomendados. | Inactivo |
| VTG | Curso y velocidad sobre Tierra. | Inactivo |
| ZDA | Datos de hora y fecha. | Inactivo |
| MCHN | Muestra el estado interno de los canales de GPS. | Inactivo |

La trama más relevante para obtener los datos de posición en forma conjunta es GGA que se remarca en la tabla 3.2. Para habilitar las sentencias requeridas y a la vez configurar el GPS se utiliza el programa ejecutable Mini GPS.



Figura 3.5 Interfaz del software para configurar el GPS LS20031

Los parámetros de comunicación serial que vienen establecidos en el GPS son: 57600 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de parada y sin paridad. La comunicación entre IMU y GPS funciona si ambos tienen seleccionado el mismo baudrate, por lo tanto, el GPS deberá estar 19200 baudios.

Comparación de estimación de posición entre GPS e IMU

En base a la descripción anterior se puede afirmar que un GPS tiene una tasa de actualización lenta en comparación con los sistemas inerciales, además un GPS es impreciso, es decir, no puede decir por regla general dónde se está con un error menor de 10 a 15 metros.

Además, la recepción de la señal de los satélites es problemática con obstáculos como edificios o incluso árboles, y se pierde por completo cuando se ingresa en un túnel, mientras que en los sistemas inerciales tiene siempre la misma calidad pues no dependen de ningún sistema externo. El inconveniente con los sensores inerciales es que las señales deben integrarse y consecuentemente la estimación de posición se realiza con un error no deseado que se acumula, para corregir el error y realizar una estimación real de posición se requiere una integración de los dos sistemas de navegación en un solo algoritmo de estimación utilizando un filtro de Kalman extendido.

3.3. PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL

La plataforma robótica móvil también denominada sistema robótico móvil, consta de dos partes fundamentales: el vehículo móvil y la estructura robótica pan & tilt montada sobre el vehículo móvil. Los dos componentes constituyen un sistema robótico complejo que tiene la capacidad de adquirir la información del entorno.

El principio de funcionamiento del vehículo móvil se basa en la configuración Ackerman, es decir, se trata de un vehículo de cuatro ruedas que cuenta con tracción motorizada independiente acoplada en cada eje de las ruedas, uno en las

de adelante y otro en las atrás. Además, las ruedas delanteras tienen la facilidad de girar en promedio 18° en cada sentido accionado mediante un servomotor instalado estratégicamente. Por lo tanto, el vehículo puede realizar movimientos hacia adelante y atrás con giros inclusive debido a la autonomía de manejo de cada uno de los dos elementos finales de control: dirección y movimiento.

La estructura robótica está constituida por un sistema mecánico complejo, diseñado en aluminio con una plataforma de carga útil capaz de ser controlado mediante los servomotores instalados de forma estratégica que permiten efectuar movimientos horizontal y vertical de dicha plataforma de carga útil. La carga del sistema que representa la cámara de vídeo y cualquier otro dispositivo instalado sobre la plataforma de carga útil no debe superar las 6 libras para tener un correcto funcionamiento del sistema robótico en mención. Los dos movimientos que realiza la estructura lo clasifica como un sistema mecánico de dos grados de libertad o dos DoF con capacidad de girar dos vueltas completas sobre cada eje de referencia.

3.3.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA ROBÓTICA PAN & TILT

La adquisición e implementación de la estructura robótica de dos DoF se realiza con el fin de obtener un sistema robótico estable y robusto, a la vez garantice maniobrabilidad, seguridad y equilibrio cuando se instale sobre el vehículo móvil. Otro factor determinante al momento de seleccionar un sistema pan & tilt es conocer su capacidad de manejo de una carga que se instala en la placa o plataforma de carga útil, la cual es el espacio establecido para cualquier carga adicional al sistema propiamente dicho. La carga útil en el sistema de geo-estabilización es la filmadora Sony de 40X y el transmisor de radio frecuencia A/V de 2,4 GHz.

De acuerdo a las consideraciones anteriores el sistema pan & tilt escogido es el modelo PT785-S de Servocity [24].

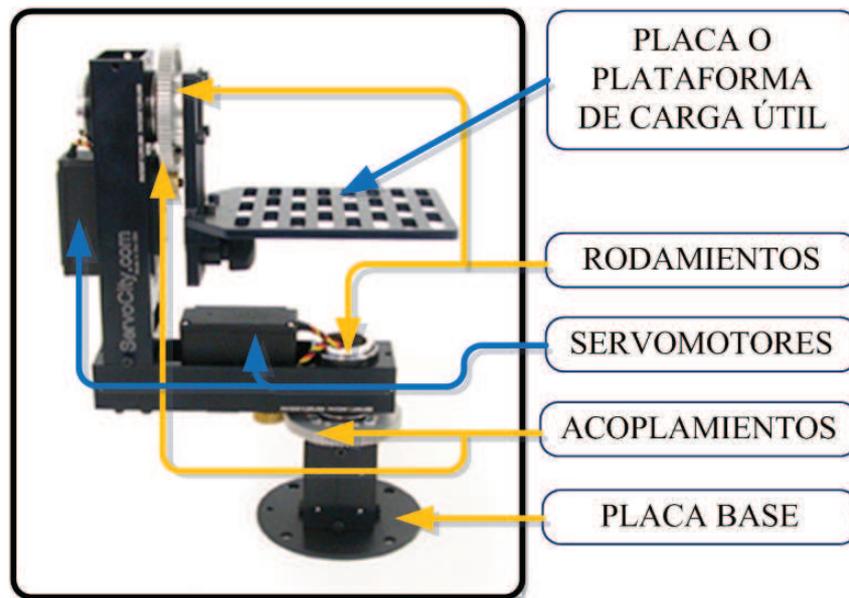


Figura 3.6 Sistema pan & tilt: PT785-S

Las características físicas más importantes de la estructura en estudio son:

- Material: Aluminio súper ligero técnicamente denominado aluminio 6061-T6
- Peso: 1,8 libras
- Capacidad de carga útil: 6 libras
- Relación de engranajes: 4 a 1
- Capacidad de giro: 720°
- Base de soporte: 90 mm de diámetro
- Incorpora un engranaje de 24 dientes, 48 pasos diseñado para conectarse directamente a la salida estriada (con ranuras) de un servo.
- Dispone de rodamientos de esferas cuyo espacio libre en el anillo interior permiten que los cables de vídeo y alimentación pasen a través de los puntos de giro
- Servomotores de precisión: HS-785HB
- Voltaje de operación: 4.8 a 6.0 V
- Rango de operación normal: 1100 us a 1900 us, valor neutral de 1500 us
- Dimensiones [24], las acotaciones principales del sistema pan & tilt se ilustran en las figuras 3.7 y 3.8:

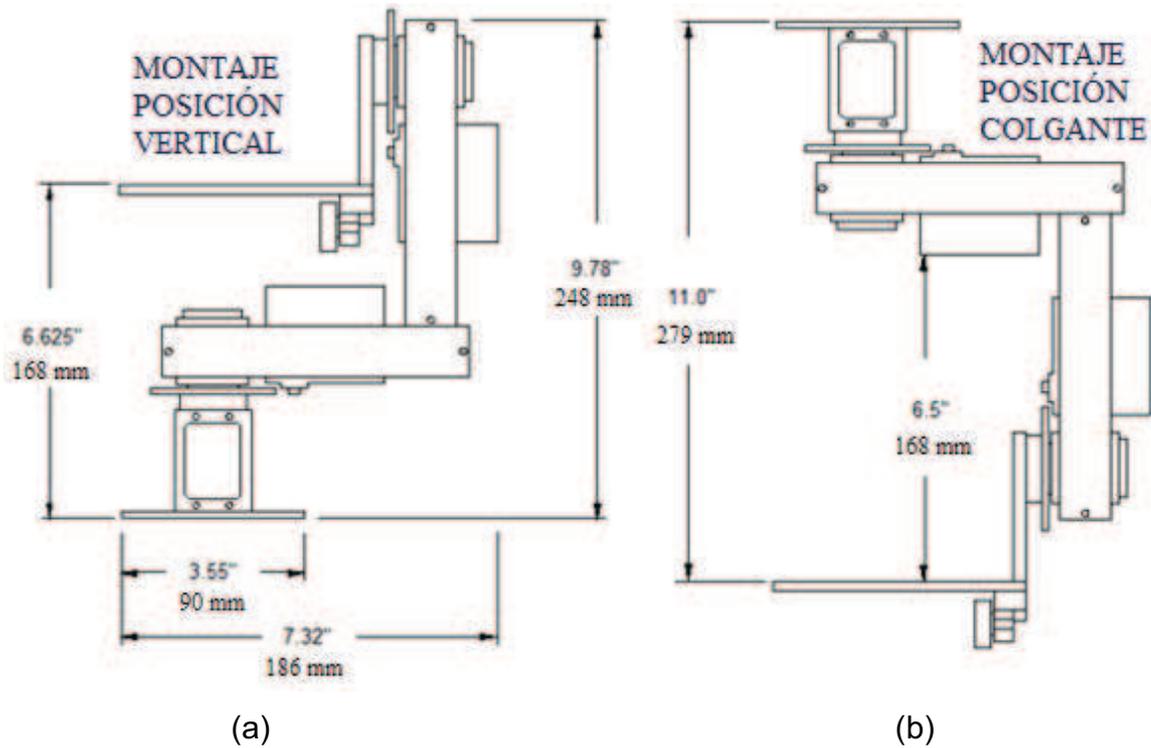


Figura 3.7 Acotación de las medidas principales del sistema pan & tilt: (a) en montaje vertical y (b) en montaje colgante

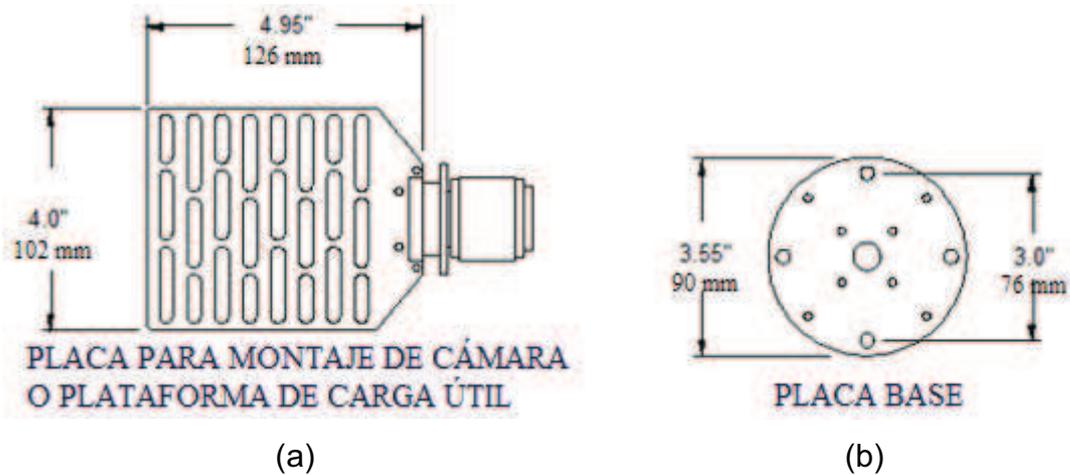


Figura 3.8 Acotación de las medidas principales de placas del sistema pan & tilt: (a) placa de carga útil y (b) placa base

El sistema en tratado se caracteriza por tener acoplamiento por engranajes con una relación de 4:1, lo cual significa que los parámetros como velocidad y torque del servomotor cambian de acuerdo a dicha relación de acople $n=4$ y está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = n \quad (1)$$

De acuerdo a la relación (1), se determina que en el sistema global, la velocidad es la cuarta parte y el torque cuatro veces más que cuando actúa el servomotor sin acoplamiento. A continuación se establecen los parámetros técnicos con y sin relación de acoplamiento:

- **Datos sin relación de acoplamiento**
 - Velocidad de operación (4.8 V): 1.68s/360° sin carga, es decir, para efectuar una vuelta completa se demora 1.68 segundos
 - Velocidad de operación (6.0 V): 1.40s/360° sin carga
 - Torque (4.8 V): 11 Kg*cm
 - Torque (6.0 V): 13.2 Kg*cm
- **Datos teniendo en cuenta la relación de acoplamiento: 4 a 1**
 - Velocidad de operación (4.8 V): 6.72s/360° sin carga, es decir, para efectuar una vuelta completa se demoraría 6.72 segundos
 - Velocidad de operación (6.0 V): 5.60s/360° sin carga
 - Torque (4.8 V): 44 Kg*cm
 - Torque (6.0 V): 52.8 Kg*cm

Una ventaja adicional del sistema en estudio es la disposición de agujeros en la placa base que permiten un fácil montaje en posición vertical o colgante como se puede observar en la figura siguiente donde también se ilustra la configuración para cada tipo de montaje.

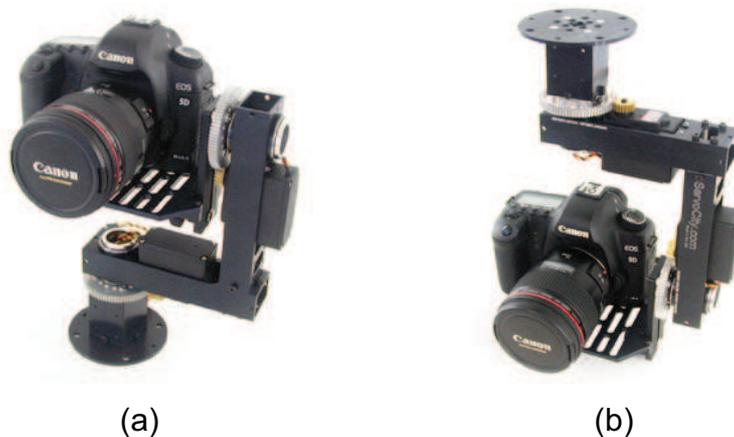


Figura 3.9 Montaje para el sistema pan & tilt: (a) vertical, (b) colgante

El control del sistema se efectúa mediante controladores de modulación por ancho de pulso o PWM (siglas en inglés de Pulse Width Modulation) de 50Hz donde se varía el ancho de pulso generalmente en el orden de 1 a 2 us en función de los movimientos que se requieren.

3.3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL VEHÍCULO MÓVIL

El sistema móvil toma un papel importante al momento de realizar la exploración del entorno, porque su robustez, potencia y diseño determinan cuáles con los ambientes donde puede moverse. El diseño del vehículo móvil está basado en la configuración de cuatro ruedas llamada Ackerman.

3.3.2.1. Configuración Ackerman

El modelo Ackerman [25], es una configuración de las ruedas, de los vehículos robóticos móviles, caracterizado por ser complejo y estable. Es el sistema más ampliamente utilizado en automoción. Se basa en un diseño con cuatro ruedas, dos traseras y dos delanteras. Los diseños más extendidos son:

- con las ruedas traseras motrices y las delanteras directrices,
- con ambos pares de ruedas motrices y las delanteras directrices,
- ambos pares de ruedas directrices y tracción delantera, trasera o 4x4.

En un vehículo móvil tipo Ackerman existe la complejidad de la unión entre ambas ruedas directrices. En este sistema es frecuente el uso de suspensiones para mayor estabilidad y evitar daños por desperfectos del terreno, sin embargo se pueden usar éstas en cualquier diseño.

El diseño Ackerman, tiene la desventaja de que su orientación está ligada a la posición, es decir, no puede orientarse en una determinada dirección sin avanzar o retroceder. Sin embargo, la configuración Ackerman constituye un buen sistema de tracción aplicable inclusive en terrenos inclinados.

3.3.2.2. Vehículo móvil escogido

El sistema móvil terrestre utilizado es un modelo comercial de carros a radio control basado en la configuración Ackerman resaltada en la sección anterior.



Figura 3.10 Vehículo móvil a radio control

Se desarrolla un potente sistema móvil a partir de un modelo de vehículo móvil a radio control con el propósito de adaptarlo a los requerimientos que se tiene en el proyecto que es disponer de un sistema robusto y controlable desde una estación central de control y monitoreo a través de una entrada estándar de manejo dada por un joystick desde la cual se controla tanto el vehículo móvil como también la estructura robótica. Para conseguir el sistema móvil deseado se cambia la tarjeta de control del modelo y se realiza el cambio del actuador de dirección por un servomotor.

El vehículo implementado se caracteriza por disponer de dos tipos actuadores fácilmente controlables: dos motores DC y un servomotor. La operación en conjunto de estos elementos finales de control determina un sistema cómodamente maniobrable por el usuario.

Los motores DC representan la tracción de las ruedas delanteras y traseras, son controlados mediante un único controlador PWM y está en lazo abierto; el sistema cuenta con un solo control PWM porque de esta manera se obtiene prácticamente la misma velocidad y potencia en cada eje de tracción; el control en lazo abierto es suficiente por el hecho de que se trata de un vehículo no autónomo donde no se necesita ningún tipo control específico: posición o velocidad.

La tracción del vehículo móvil se maneja mediante pequeños motores de corriente directa de alta velocidad de uso exclusivo para modelos a radio control. En la figura 3.11 se indica el modelo de motor y las características técnicas más relevantes son:

- Voltaje de operación: 4.5 a 12 V
- Corriente nominal: 0.84 A
- Velocidad: 18000 rpm
- Potencia de salida: 0.2 W a 9.0 W
- Peso: 17 g.
- Fabricante: Mabuchi Motor Co., Ltd.



Figura 3.11 Motor DC de la tracción del vehículo móvil

Una característica importante para controlar los motores DC en el presente proyecto es el consumo de corriente eléctrica que es aproximadamente 3 amperios por el par de motores DC a 7.4 voltios. Esta particularidad permite dimensionar el driver que gobierna dichos motores.

El servomotor instalado en el eje de las ruedas delanteras permite direccionar el móvil en ambos sentidos de forma rápida y en pasos prácticamente continuos. A continuación se dan las características del servomotor utilizado:

- Servomotor HITEC: HS-225MG
- Voltaje de operación: 4.8 a 6.0 V
- Rango de operación normal: 600 us a 2400 us con ancho de pulso neutral de 1500 us

- Velocidad de operación (4.8 V): 0.14s/60° sin carga, es decir, para efectuar un giro de 60° se demora 0.14 segundos
- Velocidad de operación (6.0 V): 0.11s/360° sin carga



Figura 3.12 Servomotor de la dirección del vehículo móvil

3.3.2.3. Acople entre el vehículo móvil y estructura robótica pan &tilt

La estructura robótica está debidamente acoplada al vehículo móvil mediante un sistema desmontable el cual le da las prestaciones necesarias para el correcto funcionamiento en condiciones de trabajo normal. Esto es una buena sujeción, un acople que mantiene a los sistemas juntos ya sea que el sistema vehículo-plataforma este sometido a aceleraciones fuertes como en un arranque, freno e inclusive choque.

La ubicación del sistema se elige en una posición tal que la distribución de carga sea lo más simétrica posible, de esta forma no alterar el centro de gravedad del vehículo.

En la figura 3.12 se muestra el acople empleado para el sistema vehículo-plataforma robótica.

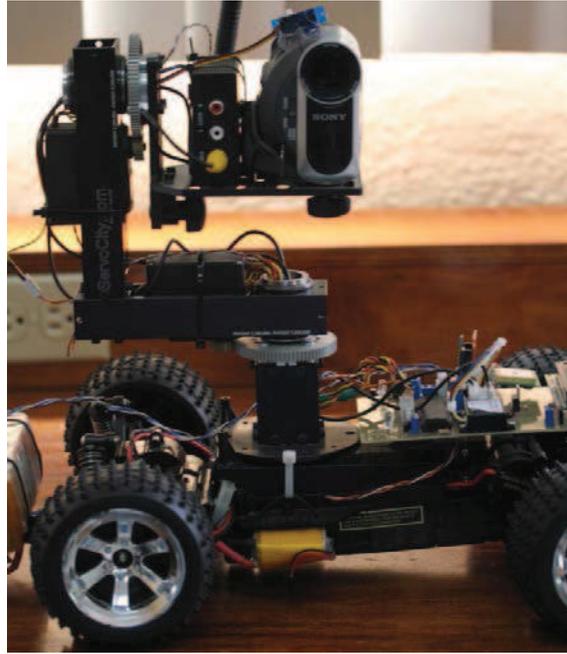


Figura 3. 13 Acople entre vehículo móvil y plataforma robótica.

3.4. TRANSMISIÓN MEDIANTE XBEE

La familia XBee de los módulos ZigBee [26] es una importante gama de dispositivos destinados para aplicaciones que buscan un excelente rendimiento inalámbrico debido a la facilidad de conectar un alto número de dispositivos en modo seguro, de bajo costo, bajo consumo de energía y fácil de usar en redes inalámbricas de sensores y control.

El término ZigBee describe un protocolo inalámbrico normalizado para la conexión de una red inalámbrica de área personal o WPAN (del inglés Wireless Personal Area Network) basado en el estándar IEEE 802.15.4. El protocolo es el trabajo de más de 70 compañías que se han asociado juntos para crear y promocionar el nuevo estándar ZigBee, propiedad de un consorcio que han formado la Alianza ZigBee.

La Alianza ZigBee es ahora un próspero grupo global de más de 400 empresas que promueven el desarrollo de estándares globales y elaboran productos para su uso en automatización de edificios comerciales, electrónica de consumo, el

cuidado de la salud, domótica, gestión de energía, gestión de venta, las telecomunicaciones inalámbricas [26].

Los módulos XBee con ZigBee son reconocidos en el todo el mundo para comunicaciones inalámbricas confiables de datos en la banda destinada a ICM de 2.4 GHz o 900 MHz. Actualmente se disponen de tres series de módulos XBee: serie 1 y series 2 y 900 [27].

Tabla 3.3 Características principales de las series de los módulos XBee

| Características | XBee Serie 1 | XBee Serie 2 | XBee 900 |
|--|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Tasa de transmisión de datos | 115 Kbps | 115 Kbps | 230 Kbps |
| Rango en interiores (Diámetro) | 30 m | 40 m | 370 m |
| Rango al aire libre con línea de vista | 100 m | 120 m | 24 Km |
| Banda de frecuencia | ICM 2.4 GHz | ICM 2.4 GHz | ICM 900 MHz |
| Potencia de transmisión | 1 mW | 2 mW | 693 mW |
| Dirección de red | 64 bits | 64 bits | 32/64 bits |
| Topologías de red | Punto a punto, estrella | Punto a punto, estrella, malla | Punto a punto, estrella |
| Protocolo | Estándar 802.15.4 | ZigBee | Estándar 802.15.4 |

3.4.1. MÓDULO XBEE SELECCIONADO

El dispositivo utilizado en el proyecto para la comunicación inalámbrica de datos es un par de módulos XBee de Serie 1, denominado XBeePRO con antena tipo chip, cuya característica particular es un alcance de 100 m en interiores y 1.6 Km en exteriores con línea de vista, como cifras ideales. Se justifica porque tiene el suficiente alcance que se requiere a fin de verificar el funcionamiento del sistema

en campo abierto sin la utilización de dispositivo de radio más complejos, voluminosos y costos.



Figura 3.14 Módulo XBeePRO de Serie 1

Adicionalmente, los módulos incluyen hardware de acondicionamiento conocidos como adaptadores Xbee Explorer Serial o Xbee Explorer USB y XBee regulated que permiten de forma sencilla comunicar un módulo Xbee con un PC mediante un cable USB a mini USB y trabajar con microcontroladores que operan a 5V, respectivamente.

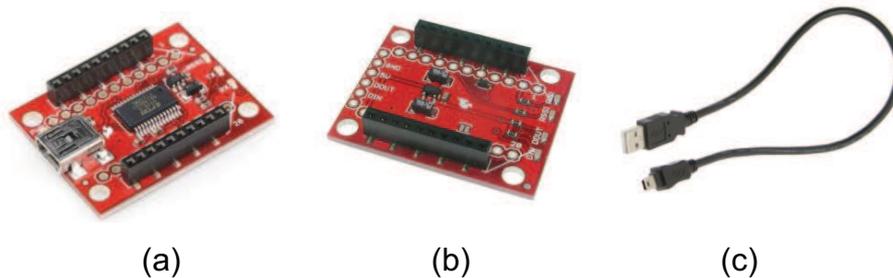


Figura 3.15 Adaptadores XBee explorer USB (a), XBee regulated (b) y Cable USB a mini USB (c)

Además el adaptador USB va a permitir configurar el módulo de manera sencilla y probar la transferencia de datos utilizando el software X-CTU antes de utilizarse en la aplicación final requerida. Se mantiene la configuración por defecto de los módulos XBee: 19200 buadíos y sin paridad.

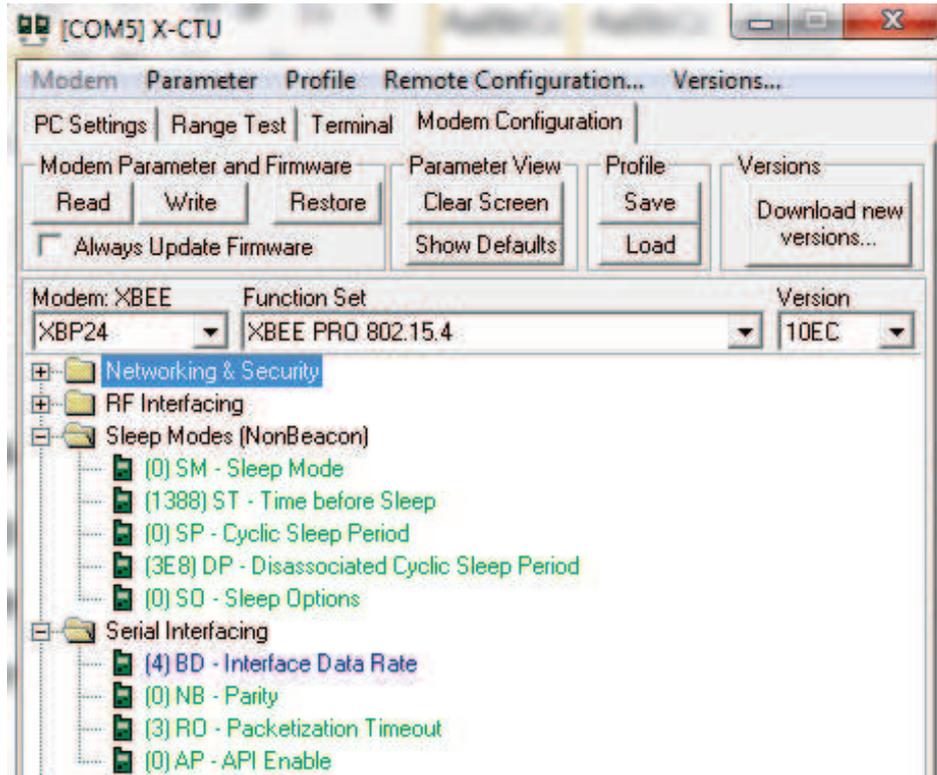


Figura 3.16 Pantalla de configuración del módulo XBee

La conexión de los módulos XBee en la plataforma robótica móvil es:

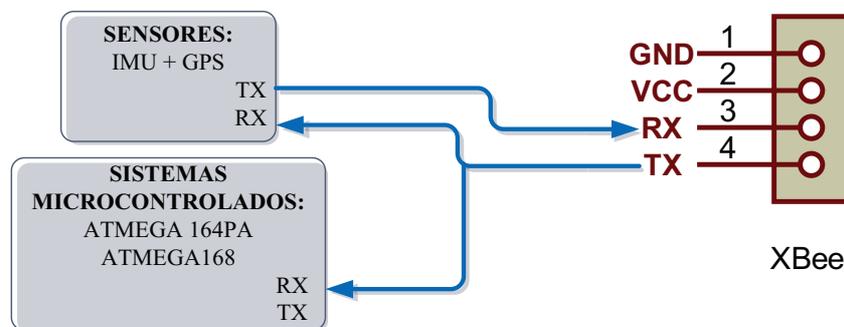


Figura 3.17 Configuración del módulo XBee en la estación remota móvil

3.5. TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CONTROL

El sistema de geo-estabilización incorporada 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.

Las dos tarjetas de control reciben las órdenes enviadas de la estación fija a través de los módulos XBee, el flujo de datos se ilustra en la figura 3.17.

3.5.1. ESQUEMA

En la figura 3.18 se muestra el diagrama global del sistema de control que consiste en dos tarjetas principales de control que trabajan en modo paralelo. Además se indican las entradas y salidas más importantes en el sistema de geo-estabilización desarrollado.

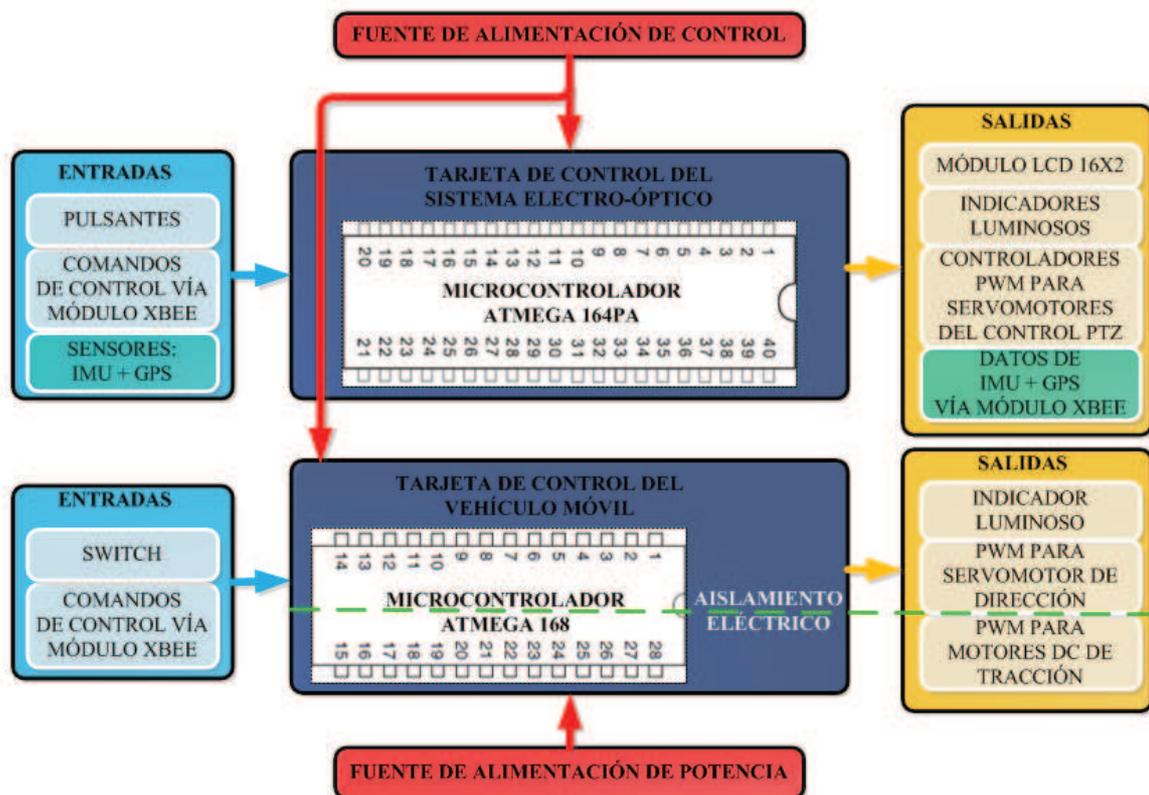


Figura 3.18 Diagrama de bloques del sistema de control

Existen dos sistemas principales cuyos actuadores se requiere controlar; la una es el control del vehículo móvil que se realiza a través de la tarjeta que incorpora el ATmega 168, la otra es el control PTZ (del inglés Pan-Tilt-Zoom) que consiste

en el manejo de la estructura robótica pan & tilt y del zoom de la cámara de vídeo que se hace mediante la tarjeta electrónica cuyo núcleo es el ATmega 164PA.

La importancia de utilizar estas dos tarjetas es pensada a fin de que el vehículo móvil y el sistema electro-óptico puedan ser utilizados para otros fines de forma independiente. Las tarjetas de control se localizan en lugares estratégicos y seguros a fin de garantizar la confiabilidad, robustez y estabilidad de los sistemas de control.

3.5.2. SISTEMAS MICROPROCESADOS

La particularidad robusta que se espera de la arquitectura del sistema global exige tener una apropiada distribución de los sistemas microprocesados por lo que se dispone de dos microprocesadores dedicados a controles específicos que trabajan de forma paralela, es decir, ejecutan los respectivos comandos de control que llegan por igual a cada uno de ellos vía comunicación serial.

Los microcontroladores utilizados el ATmega 164PA y ATmega168 son de propósito general de alto rendimiento de Atmel que pertenece a la familia AVR con una unidad central de procesamiento o CPU de 8 bits y opera entre 2.7-5.5 voltios.

3.5.2.1. ATmega 164PA

El circuito de control que maneja el sistema electro-óptico posee un ATmega 164PA. Las principales características son: 2 USART (del inglés Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter) para comunicación RS232, 40 pines en total, 32 pines de entrada/salida, 32 interrupciones externas, 16 Kbytes de memoria flash para programa, frecuencia de operación máxima 20 MHz, etc.

El ATmega 164PA es el núcleo de procesamiento en la tarjeta de control localizada sobre el vehículo móvil, en la base de la plataforma robótica pan & tilt.

Tabla 3.4 Análisis de entradas y salidas del microcontrolador ATmega 164PA

| Entrada / Salida | Pin | Descripción |
|------------------|-----|--|
| Entrada | PA6 | Pulsante para manejo de luces |
| Entrada | PA7 | Pulsante para manejo de mensajes |
| Entrada | PD2 | Recepción serial de comandos de control |
| Salida | PB0 | Control de luces azules de presentación |
| Salida | PB1 | Control de luces rojas de presentación |
| Salida | PB2 | RS para el LCD |
| Salida | PB3 | E para el LCD |
| Salida | PB4 | D4 para el LCD |
| Salida | PB5 | D5 para el LCD |
| Salida | PB6 | D6 para el LCD |
| Salida | PB7 | D7 para el LCD |
| Salida | PD4 | Controlador PWM para el servomotor de pan |
| Salida | PD5 | Controlador PWM para el servomotor de tilt |
| Salida | PD6 | Controlador PWM para el servomotor de zoom |

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.

Adicionalmente, esta tarjeta de control dispone en su circuitería de protección contra polarización inversa, que es un fenómeno muy usual en los sistemas de control que puede provocar que los dispositivos sufran daños irreversibles.

Líneas de control

El control de los actuadores correspondientes al sistema electro-óptico se realiza utilizando los timer 1 y 2 del ATmega 164PA, el timer 2 se usa para el control del servomotor que hace zoom, en cambio, el timer 1 para el manejo de los servomotores de la estructura pan & tilt.

Se usa el timer 2, contador/temporizador de 8 bits, capaz de generar dos señales de PWM independientes por los canales A y B. El PWM del canal B que sale por el pin 6 del puerto D, PD6, denominado OC2B genera la señal de control. Se configuran los registros del timer 2 de modo que permitan obtener un PWM de aproximadamente 38 Hz, valor que está dentro del rango de frecuencia para el correcto funcionamiento del servomotor. Además, el timer 2, por manejar un registro de 8 bits tiene el rango regulable del controlador PWM dado por pocos pasos discretos, este control es suficiente para el servomotor de zoom porque solo se requieren tres estados: izquierda, centro y derecha que accionan la palanca de zoom de la vídeo cámara obteniéndose como resultado acercar, sin acción y alejar el objetivo seleccionado.

Mientras tanto, el timer 1 es un contador/temporizador de 16 bits que permite generar dos señales de PWM de frecuencia controlable mediante un registro de 16 bits, se usan los PWM de los canales A y B que salen por los pines PD5 y PD4, denominados OC1A y OC1B respectivamente. La utilización del timer 1 ayuda a configurar los registros en el modo de operación que permita obtener un PWM de frecuencia igual a 50 Hz.

Los comandos de control se reciben serialmente a través del pin 2 del puerto D, PD2, denominado RXD1. La trama de datos de control es de 13 bytes cuyos valores controlan tanto el sistema electro-óptico como también el vehículo móvil. Específicamente, el microcontrolador en estudio está programado solo para ejecutar las órdenes de los bytes relacionados al control del sistema electro-óptico a pesar de recibir la trama completa.

3.5.2.2. ATmega 168

Se dispone de la circuitería necesaria en una placa con un ATmega 168 cuyo propósito es efectuar el control del vehículo móvil comandado de forma inalámbrica desde la estación de control, la comunicación serial RS232 se realiza con el USART que dispone el microcontrolador, entre las principales características: cuenta con 28 pines en total, 23 pines de entrada/salida, 23 interrupciones externas, frecuencia de operación máxima 20 MHz, 16 Kbytes de memoria flash para programa, etc.

La tarjeta de control con el ATmega 168 se localiza en la parte interna de la estructura del vehículo móvil terrestre, se caracteriza por manejar un driver para aislar las señales de control y el circuito de potencia que están en relación directa con los motores DC. El ATmega 168 presenta el siguiente estado de entradas y salidas:

Tabla 3.5 Análisis de entradas y salidas del microcontrolador ATmega 168

| E/S | Pin | Descripción |
|---------|-----|--|
| Entrada | PD0 | Recepción serial de comandos de control |
| Salida | PB0 | Control del LED indicador de recepción serial |
| Salida | PB1 | Controlador PWM para el servomotor de dirección |
| Salida | PB2 | Control para cambio de sentido de giro de los motores DC |
| Salida | PB3 | Controlador PWM para los motores DC |
| Salida | PB4 | Control para cambio de sentido de giro de los motores DC |

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.

Líneas de control

La combinación de los estados lógicos de los pines de control del ATmega 168 que permite realizar el cambio de sentido de giro de los motores DC está dada por la siguiente tabla de verdad:

Tabla 3.6 Estados lógicos de control de sentido de giro

| PB4 | PB2 | Función |
|-----|-----|--|
| 0 L | 0 L | Los terminales hacia los motores se conectan a GND |
| 0 L | 1 L | El Driver permite que el carro se mueva hacia adelante |
| 1 L | 0 L | El Driver permite que el carro se mueva hacia atrás |
| 1 L | 1 L | Los terminales hacia los motores de conectan a VCC |

Cabe indicar que se usa el timer 2 del microcontrolador ATmega 168 para generar la onda o señal de control de los motores DC y el timer 1 para proveer de la señal de control al servomotor de dirección del vehículo móvil.

El timer 2 es un contador/temporizador de 8 bits que posee el ATmega 168 y permite generar dos señales de PWM independientes, se usa el PWM del canal A que sale por el pin 3 del puerto B, PB3, denominado OC2A. Se configuran los registros de tal forma que permitan obtener un PWM de aproximadamente 2 KHz.

Mientras, el timer 1 es un contador/temporizador de 16 bits que posee el ATmega 168 y permite generar dos señales de PWM de frecuencia controlable mediante un registro de 16 bits, se usa el PWM del canal A que sale por el pin 1 del puerto B, PB1, denominado OC1A. La utilización del timer 1 facilita configurar los registros de tal modo que permitan obtener un PWM de frecuencia exacta para el manejo de los servos cuyo valor es de 50 Hz.

La recepción serial de los comandos destinados al control se realiza a través del pin 0 del puerto D, PD0, denominado RXD. A través del pin RXD se recibe una trama de datos de 13 bytes cuyos valores controlan tanto el sistema electro-óptico

como también el vehículo móvil. Específicamente, el microcontrolador en estudio en cumplimiento de las funciones programadas solo ejecuta las acciones de los bytes relacionados al control del vehículo móvil a pesar de recibir toda la trama.

3.5.3. COMPONENTES

Los circuitos de control se componen de dispositivos y elementos electrónicos distribuidos, instalados y soldados de forma ordenada en una placa de baquelita donde se encuentra impresa en la circuitería implementada para el control del sistema de geo-estabilización.

Los elementos instalados en la placa electrónica se dividen en dos grupos, uno formado por aquellos elementos que tienen un sistema microcontrolado, otro conformado por los elementos electrónicos convencionales.

En la tarjeta de control del sistema electro-óptico, los dispositivos que se caracterizan por tener o ser un microcontrolador son: unidad de medida inercial o IMU, GPS, microcontrolador ATmega 164PA, módulo XBee, módulo LCD. Estos dispositivos son los componentes principales.

En la misma tarjeta anterior, en cambio, los elementos electrónicos comunes utilizados son: reguladores de voltaje LM7805 y LM1117 de 5 y 3.3 voltios respectivamente, cristal de 20 MHz, capacitores cerámicos, LEDs de alto brillo, resistencias, pulsadores, borneras, espadines hembra y macho, conectores para cables, transistores 2N3904, potenciómetros, diodo rápido, cable de par trenzado no blindado o UTP (Unshielded Twisted Pair) AWG 24 flexible y normal.

Utilizando los elementos mencionados se obtiene una tarjeta de control basado en un modelo didáctico con la ventaja de poder quitar del sistema aquel componente principal que no se utilice, ver la figura 3.19.

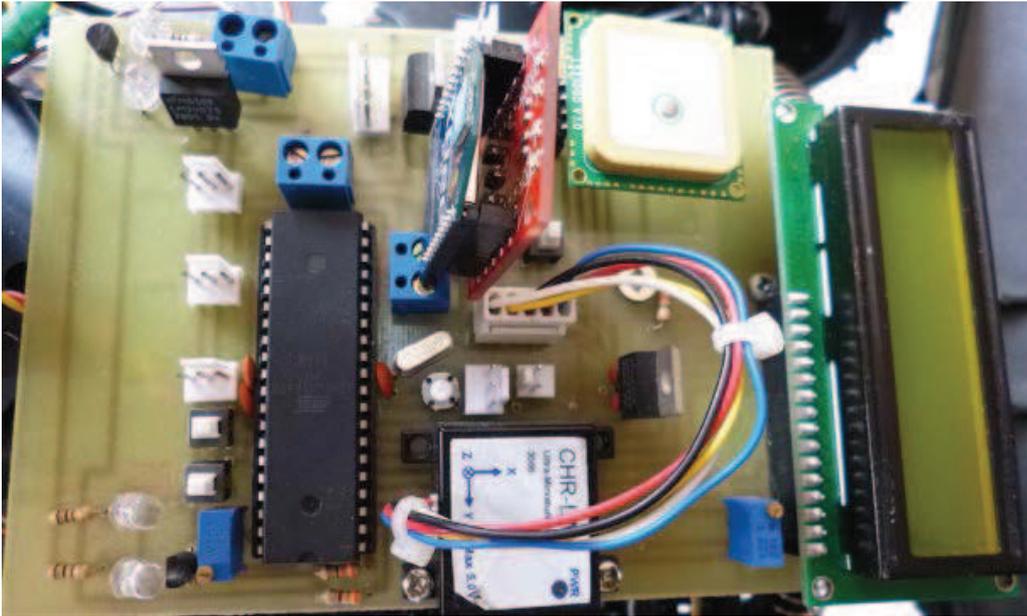


Figura 3.19 Tarjeta de control del sistema electro-óptico

Si se trata de la tarjeta de control del vehículo móvil, los componentes principales son: driver VNH5019 y microcontrolador ATmega 168

En cambio, los elementos electrónicos comunes utilizados en el manejo del vehículo móvil son: reguladores de voltaje LM7805 de 5 voltios, cristal de 8Mhz, capacitores cerámicos, LED de alto brillo, resistencias, borneras, espadines hembra y macho, conectores para cables, cable de par trenzado no blindado o UTP (Unshielded Twisted Pair) AWG 24 flexible.

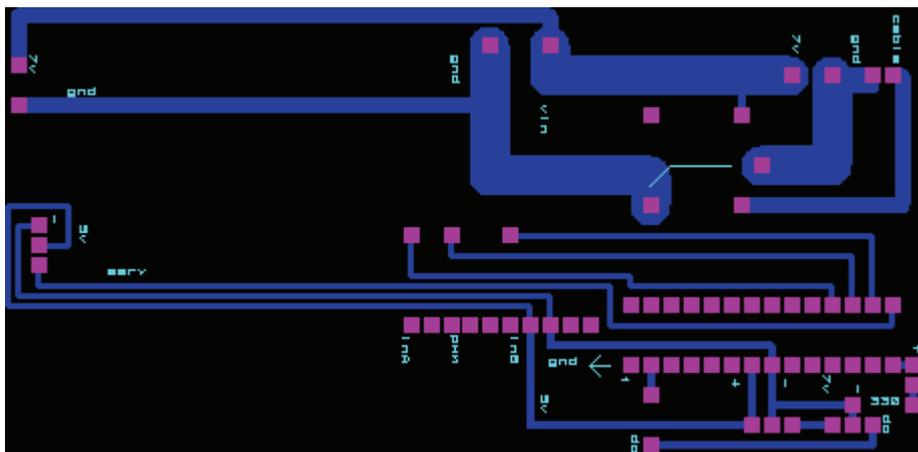


Figura 3.20 Diseño en PROTEUS, ARES, de la placa de control del vehículo

δ , es el ciclo de trabajo o relación de trabajo

τ , es el tiempo en que la función es positiva llamado ancho del pulso

T, es el período de la función

La velocidad de un motor de corriente continua depende del valor medio de la tensión aplicada en sus extremos. El sistema más utilizado para controlar la velocidad de un motor DC es mediante la modulación por ancho de pulso de una señal cuadrada TTL, bajo el control PWM el motor gira a una velocidad determinada por la media del nivel de la señal cuadrada.

La tensión continua media presentada al motor se controla manteniendo la frecuencia constante y variando el tiempo que la señal permanece en alto, es decir variando el ciclo de trabajo. La principal ventaja de realizar regulación por PWM es que proporciona un eficaz método mediante la utilización de una simple señal digital de control.

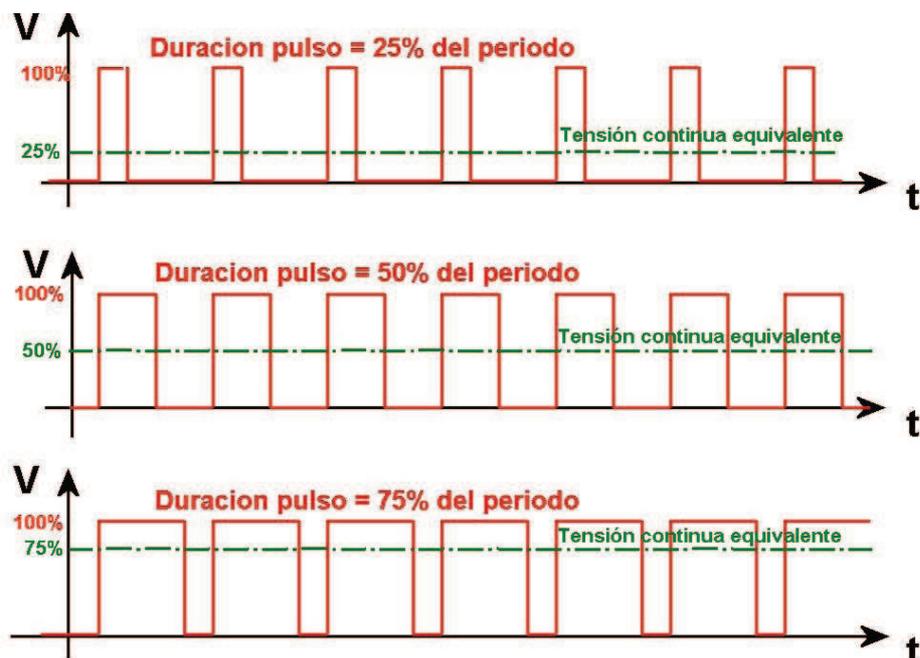


Figura 3.22 Control de velocidad de un motor DC mediante PWM

Driver VNH5019 dual

El driver VNH5019 dual de es un dispositivo dedicado para controlar dos motores DC de alta potencia. Consta de dos drivers de motor robustos llamado VNH5019

de STMicroelectronics, operan de 5,5 a 24 V y pueden suministrar una corriente continua de 12 A (30 A pico) por motor, o una corriente continua de 24 A (60 A pico) a un solo motor conectado a ambos canales. Estos controladores también ofrecen realimentación por sensado de corriente y aceptan frecuencias ultrasónicas de PWM para un funcionamiento más silencioso.

Este driver de motor hace que sea fácil controlar motores DC de alta potencia en ambos sentidos de giro. El driver incluye resistencias de pull-up y protección y FETs para protección de polarización inversa. La tarjeta está desarrollada con componentes SMD, incluidos los dos circuitos integrados o IC VNH5019.

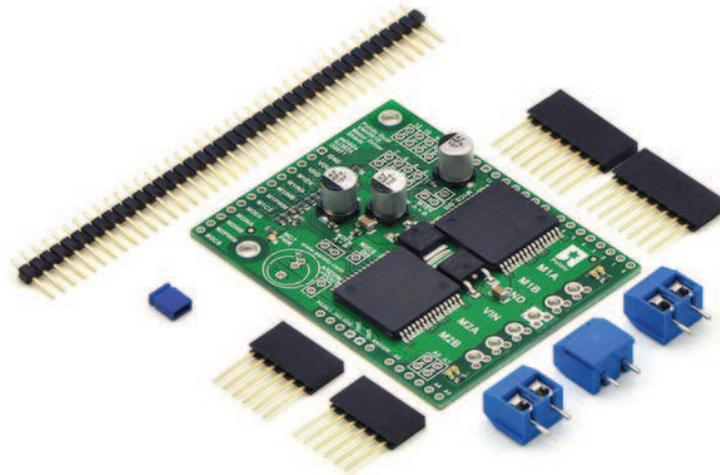


Figura 3.23 Placa con el doble driver de motor VNH5019

Este es controlador de motor versátil diseñado para una amplia gama de aplicaciones de automoción o de máquinas que se desplazan por la acción de un motor eléctrico, permite interactuar directamente a través de las líneas de control del VNH5019 compatible con sistemas que operan a 5V y 3.3V con un umbral lógico alto de 2.1 V, además cuenta con indicadores LED que muestran lo que las salidas están haciendo, incluso cuando el motor no está conectado. En la figura que 3.22, se indican la placa que permite realizar el control dual con el controlador de motor VNH5019 conectado a un microcontrolador, las conexiones señaladas con color gris son opcionales.

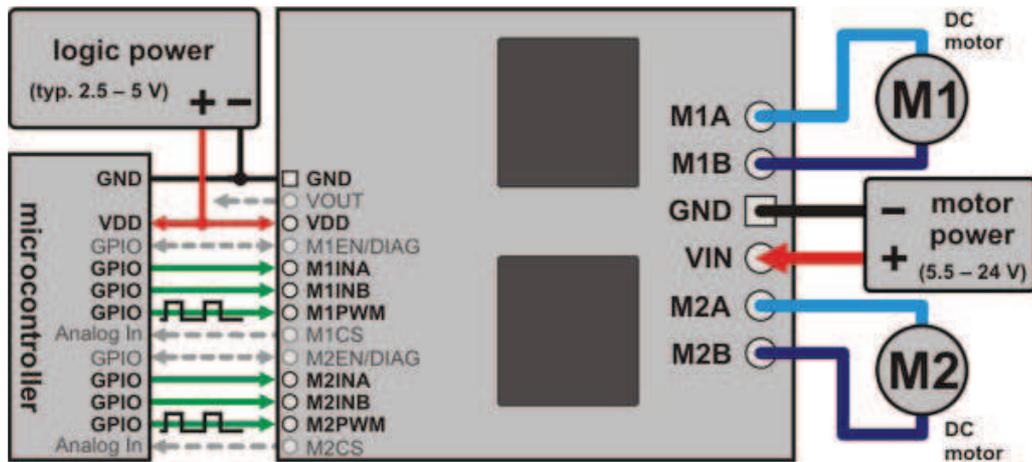


Figura 3.24 Conexión de la placa con el doble driver VN5019 a un microcontrolador

El manejo del controlador de motor VN5019 es muy sencillo, se requiere observar cuidadosamente líneas de control, salida PWM y polarizaciones tanto en control como también en potencia. De acuerdo a lo tratado en la parte inicial de esta sección el control PWM permite regular la velocidad de los motores DC para lo cual se usa el driver VN5019 que se cumple la siguiente tabla de operaciones:

Tabla 3.7 Tabla de verdad del driver de motor VN5019

| INA | INB | Modo de operación |
|-----|-----|-----------------------------|
| 0 L | 0 L | Freno a GND |
| 0 L | 1 L | Giro en sentido antihorario |
| 1 L | 0 L | Giro en sentido horario |
| 1 L | 1 L | Freno a VCC |

Características del control PWM de los motores DC implementado

Las particularidades que definen el control de los motores utilizando la técnica PWM están señaladas a continuación:

Frecuencia del PWM: 1.96 KHz

Relación de trabajo: 30% y 80%

Voltaje de polarización de control: 5 V

Voltaje de alimentación de potencia: 8 V

3.5.5. MANEJO SERVOS

El servomotor o simplemente servo es un pequeño dispositivo que incorpora un motor de corriente continua de tres cables, un tren de engranajes, un potenciómetro, un circuito integrado, y un cojinete del eje de salida. De los tres cables que sobresalen de la carcasa del motor, en los servos HITEC, el color rojo es para la energía, el negro es para la tierra, y el amarillo es la línea de entrada de control. El eje del servo puede ser posicionado para determinadas posiciones angulares mediante el envío de una señal codificada. Mientras la señal codificada existe en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del eje. Si cambia la señal codificada, luego la posición angular del eje cambia [29].

Las aplicaciones donde muy comúnmente se usan los servos se encuentran en los modelos de radio control como autos, aviones y robots en general. Además, a los servomotores se puede hacer control de posición y velocidad muy útil en las aplicaciones mencionadas.

El control de los servos es mediante el envío trenes de pulso de anchura variable a través del cable de control. Los parámetros del tren de pulsos son: una duración mínima de pulso, un pulso máximo, y una tasa de repetición que se indican en la figura 3.25. Dadas las limitaciones de rotación del servo, neutral se define como la posición en la que el servo tiene exactamente la misma cantidad de rotación efectiva en la dirección de las agujas del reloj como en el sentido antihorario. Es importante señalar que los servos diferentes tendrán diferentes limitaciones en su rotación, pero todos tienen una posición neutral que es siempre alrededor de 1,5 ms (milisegundos).

El ángulo que gira el eje del servo se determina por la duración de un pulso que se aplica al cable de control, esta técnica se conoce como modulación por ancho de pulso o PWM. En control de posición, el servo espera ver un pulso cada 20 ms y la longitud del pulso determinará a qué punto gira el motor. Por ejemplo, un

pulso de 1.5 ms hará que el motor gire a la posición de 90 grados (posición neutral), ver figura 3.26.

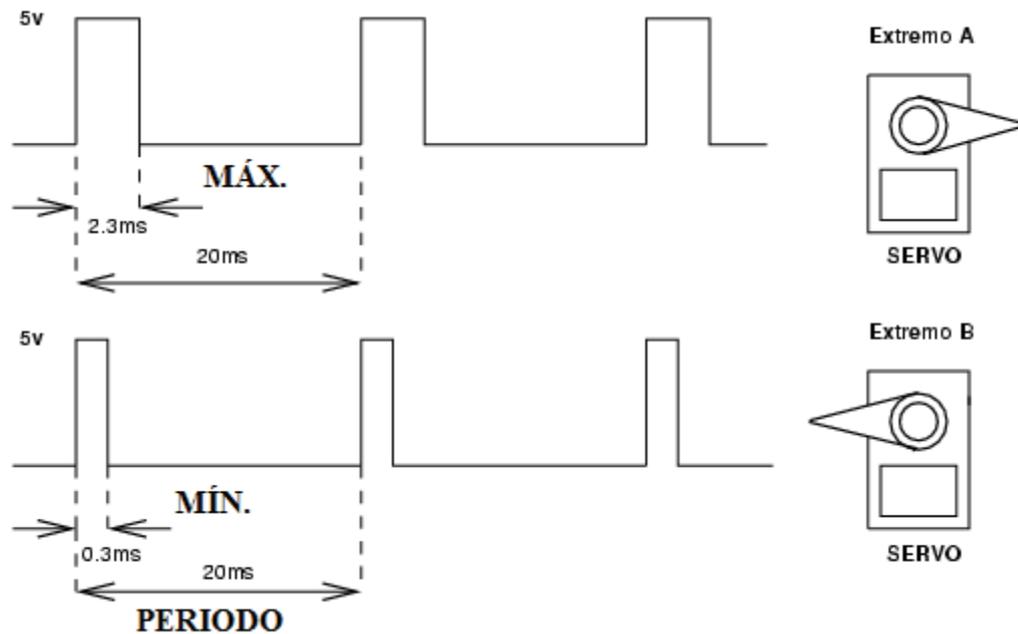


Figura 3.25 Parámetros de control de un servomotor

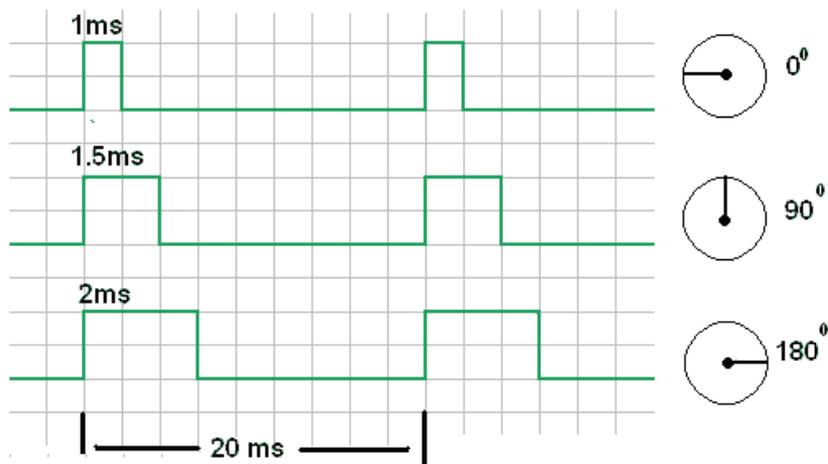


Figura 3.26 Control de posición de un servomotor estándar HITEC [30]

Otro factor muy importante en los sistemas de control es la regulación de velocidad de los actuadores, en el caso de los servomotores, el control de velocidad es en un rango mínimo para lo cual varía el voltaje de alimentación de acuerdo a las especificaciones de cada fabricante.

Servomotores utilizados

Los servomotores que forman parte de la estructura robótica pan & tilt son de la marca HITEC modelo HS-785HB, cuyas características eléctricas se indicaron en la sección del sistema pan & tilt y las características funcionales implementadas son las siguientes:

- Voltaje de operación: 5 V
- Frecuencia del controlador PWM de pan y tilt: 50 Hz
- Frecuencia del controlador PWM de zoom: 39 Hz
- Posición neutral: 1.5 ms
- Rango de operación

Tabla 3.8 Rango de operación de los servomotores del sistema electro-óptico

| Tipo de movimiento | Valor mínimo | | Valor central | | Valor máximo | |
|------------------------------|--------------|------|---------------|-----|--------------|------|
| | [ms] | [°] | [ms] | [°] | [ms] | [°] |
| Horizontal, panorámico o pan | 0.6 | -360 | 1.5 | 0 | 2.4 | +360 |
| Vertical, inclinación o tilt | 1.27 | -90 | 1.5 | 0 | 1.73 | +90 |
| Acercar/alejar o zoom | 1.21 | --- | 1.51 | 0 | 1.91 | --- |

Los valores dados en grados [°] están reflejados en los movimientos del sistema electro-óptico; los signos indican los sentidos de movimientos, el signo negativo en el movimiento horizontal indica que la mira de la vídeo cámara se mueve hacia la izquierda y el signo positivo es cuando se mueve hacia la derecha, mientras el signo negativo en el movimiento vertical indica que la mira de la filmadora se mueve hacia abajo y el signo positivos cuando se mueve hacia arriba. Los valores centrales indican la posición inicial del sistema, son valores por defecto cuyas posiciones sirven de referencia para realizar los movimientos anteriormente tratados. En relación al zoom no se manejan grados porque los límites indicados mueven la palanca de zoom de la filmadora en hacia los extremos físicos.

3.6. FUENTES DE PODER

El sistema de geo-estabilización requiere de alimentación estable, de larga duración, elevada potencia y bajo peso, razones por las cuales se utilizan baterías de Polímero de Litio, denominadas comúnmente como Li-Po.

La tecnología de baterías Li-Po permite una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otras tecnologías. Su tamaño y peso las hace muy útiles para equipos pequeños que requieran potencia y duración, como en aplicaciones de aeromodelismo.

Las baterías Li-Po que se comercializan generalmente son:

- Li-Po 1S: una celda, 3.7 V.
- Li-Po 2S: dos celdas, 7.4 V.
- Li-Po 3S: tres celdas, 11.1 V.
- Li-Po 6S: seis celdas, 22.2 V.

Cada celda tiene un voltaje nominal de 3.7 V, Voltaje máximo 4.2 y mínimo 3.0. Este último debe respetarse rigurosamente ya que la batería se daña irreparablemente a voltajes menores a 3 voltios.

3.6.1. FUENTE DE ENERGÍA UTILIZADA

En el presente proyecto las principales fuentes de voltaje que se utilizan son baterías Li-Po de dos tipos, un par es de dos celdas y otra de tres celdas, las características más importantes de estas baterías son [31]:

- Marca: Flight Power
- Constante de carga/descarga C: 30
- Capacidad: 5000 mAh
- Batería 1: de 2 celdas
 - Modelo: EONX30-50002S

- Voltaje: 7.4 voltios
- Peso: 286 g
- Dimensiones: 157x45x19 mm
- Batería 2: de 3 celdas
 - Modelo: EONX30-50003S
 - Voltaje: 11.1 voltios
 - Peso: 415 g
 - Dimensiones: 157x45x29 mm

La constante de carga/descarga C [32]. Es una constante creada por los fabricantes que depende los mAh (miliamperios-hora) especificados en la batería y que se usa para poder señalar más fácilmente a cuantos amperes se debe cargar o descargar la batería sin que ésta sufra daños. Se calcula utilizando la fórmula (3):

$$C = \frac{XmAh}{1000} \quad (3)$$

C = constante de carga o descarga

X = número de la mAh de la batería

Por ejemplo para las Li-Po utilizadas de 5000 mAh, $C = \frac{5000}{1000} = 5$, de este valor depende el precio de las baterías en el mercado, es así que a mayor valor de C más costosas son las baterías.

Luego el fabricante coloca en la batería la nomenclatura 30C, entonces $5*30=150$, por lo tanto se cargan/descargan las baterías Li-Po como máximo a 150 A continuos.

La alimentación de voltaje proporcionada por la batería Li-Po de 3 celdas de 11.1 voltios en total, es utilizada para energizar las dos tarjetas de control, alimentar a los actuadores del sistema pan & tilt y el servomotor de dirección del vehículo móvil. En tanto, las baterías de dos celdas son usadas, una para la alimentación a los motores DC del carro, y otra para polarizar al receptor A/V de largo alcance por donde se transmite la información de vídeo análogo.



Figura 3.27 Baterías Li-Po de 2 (a) y 3 (b) celdas

Adicionalmente, se trabaja con otra fuente que es propia para la filmadora, se trata de una batería de Litio-ion de 7.4 voltios a 1100 mAh.

3.6.2. NIVELES DE VOLTAJE USADOS PARA EL SISTEMA DE CONTROL

En el proyecto se trabaja con los siguientes valores de voltaje, dado que el sistema integra diferentes dispositivos que funcionan cada uno de acuerdo a las especificaciones que da el fabricante. Sin embargo, los niveles requeridos se derivan o se obtienen de la batería Li-Po de 3 celdas de 11.1 voltios. Los niveles de voltaje manejados para el sistema de geo-estabilización son:

- 5 voltios: alimentación de sistema de control en general y servomotores.
- 3.3 voltios: polarización de IMU y GPS.
- 11.1 voltios: energizar el transmisor de radio.

3.6.3. CONSUMO DE ENERGÍA

El consumo de energía es moderado en los dos circuitos de control que incluyen servos, IMU, GPS, XBee, microcontroladores, etc., cuando funcionan todos los sistemas el consumo aproximado es de 1.5 amperios a 11.1 voltios (17 vatios). Mientras, el circuito de fuerza consume aproximadamente 3 amperios a 7.4 voltios (22 vatios). Adicionalmente, el receptor de radiofrecuencia consume 1 amperio a 7.4 voltios (7.4 vatios) y la energía que consume la filmadora suma otros 2 vatios. El consumo de energía total está alrededor de 50 vatios instantáneos.

3.7. PROTOTIPO FINAL

El funcionamiento de la geo-estabilización aplicada sobre el sistema electro-óptico desarrollado como prototipo básico se describe como un sistema capaz de:

- Detectar orientación dado por los ángulos yaw, pitch y roll con una frecuencia de 20 Hz y realizar los movimientos correspondientes a fin de que la plataforma de carga útil de la estructura robótica donde se encuentra la cámara de vídeo mantenga la orientación angular inicial o aquella establecida por el usuario. El sistema cuenta con la visualización de la actitud del sistema robótico móvil reflejado en una aeronave en 3D.
- Proporcionar la posición geográfica: latitud, longitud y altura de la plataforma robótica móvil con una frecuencia de 5 Hz, además permite dar direccionamiento del sistema electro-óptico vía GPS de tal manera que apunte hacia la posición geográfica seteada. El proceso se efectúa mediante interacción del algoritmo de control con el Google Earth.

El sistema electro-óptico cuenta con un sistema de geo-estabilización que presenta las siguientes características funcionales:

- Estructura robótica con dos servomotores a controlar mediante trenes de pulso que permitirán efectuar los movimientos: PAN ($\pm 90^\circ$) y TILT ($\pm 360^\circ$). Por lo tanto, se consigue compensación de giros en los ángulos yaw y pitch de la cámara.
- Tarjetas electrónicas de control incorporadas dentro de la plataforma robótica móvil cuyos núcleos centrales son los microcontroladores ATmega 164PA y ATmega 168 para realizar el control del sistema electro-óptico y del vehículo móvil respectivamente.
- Manejo de dos canales dedicados; el primero para transmitir la información de los sensores de la unidad robótica remota hacia la estación de control local y viceversa para el envío de comandos de control mediante el estándar 802.15.4 para lo cual se dispone de dos módulos XBeePRO serie 1 que trabajan en los 2.4 GHz a una tasa de transmisión seteado a 19200 bps; el segundo canal es para la transmisión de vídeo analógico mediante un kit de transmisión-recepción A/V de largo alcance de 3 W que trabaja en

los 2.4 GHz y se tiene facilidad de uso público por tratarse de una banda globalmente libre.

- El computador principal permite realizar control y monitoreo del sistema y cuenta con una interfaz de usuario amigable donde se podrá visualizar la posición geográfica, la actitud y otras condiciones del sistema, así también se podrá observar la imagen u objetivo.

CAPÍTULO 4

PROGRAMACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CONTROL COMPLEMENTARIOS Y DESARROLLO DEL HMI

Se describe mediante diagramas del flujo, código de programa y esquemas el sistema de control desarrollado, y la interfaz gráfica para el monitoreo de la información.

4.1. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control está conformado por una arquitectura sistemática, que cumple tres secuencias que son: adquirir, procesar y ejecutar; este lazo de control se ejecuta en tiempo real considerando adicionalmente las capacidades reales de respuesta de los componentes involucrados.

4.1.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe los algoritmos usados para controlar el sistema, los mismos que fueron programados enteramente en MATLAB para el procesamiento de información. La solución del control es encontrar un ángulo tal que gracias al movimiento de los servomotores la cámara apunte a un mismo objetivo.

Se parte por el estudio de la metodología usada para procesar los datos de los sensores: acelerómetro, magnetómetro y giroscopio. Se analiza el algoritmo para el cálculo de la actitud del sistema, que es el pilar principal para la geo-estabilización de la cámara. Se describe el cálculo de la solución del sistema a partir de los ángulos Euler y posición del GPS.

Finalmente se verá el algoritmo general de control encargado del movimiento de la estructura robótica de la cámara y del vehículo móvil.

4.1.2. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema trabaja con información de los sensores inerciales y de un control manual, toda esta información debe ser registrada por el programa de control principal.

4.1.2.1. Datos de sensores inerciales

Los datos de sensores se transmiten inalámbricamente mediante XBee a 19200 bps desde del vehículo al computador.

Para la adquisición de datos se trabaja con una trama común de 15 bytes para datos de giroscopio, magnetómetro y acelerómetro, 19 bytes para datos de longitud y latitud del GPS.

El algoritmo de adquisición se encarga de:

- Revisar los identificadores del paquete de datos, lo que permite certificar que el paquete recibido es válido.
- Revisar el tipo de dato: Euler, Campo Magnético, Aceleración, para de esta forma identificarlo.
- Procesar la información recibida y transformarla a una variable dentro de MATLAB.

A continuación se indica ejemplos de la lógica seguida para la adquisición de datos de ángulos Euler y posición geográfica: longitud y latitud.

Adquisición de ángulos Euler

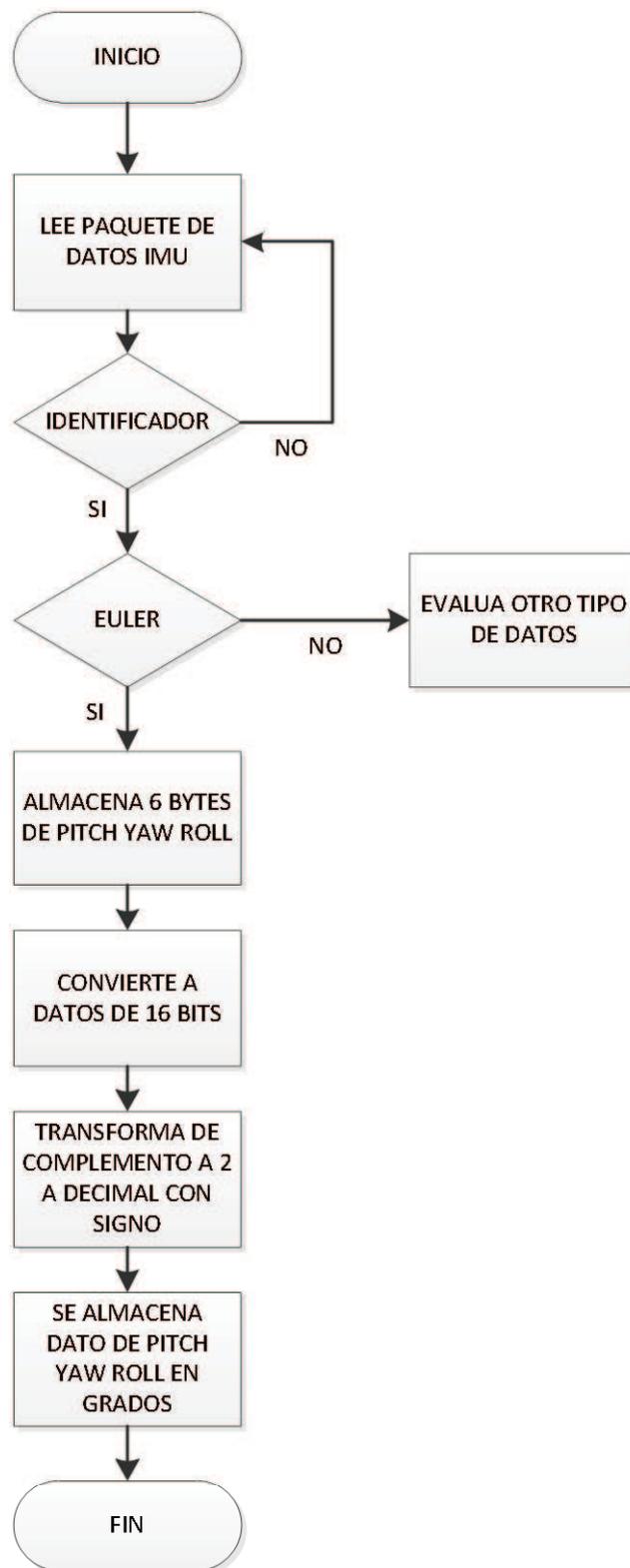


Figura 4.1 Diagrama de flujo para adquisición de datos Euler

Adquisición de longitud y latitud

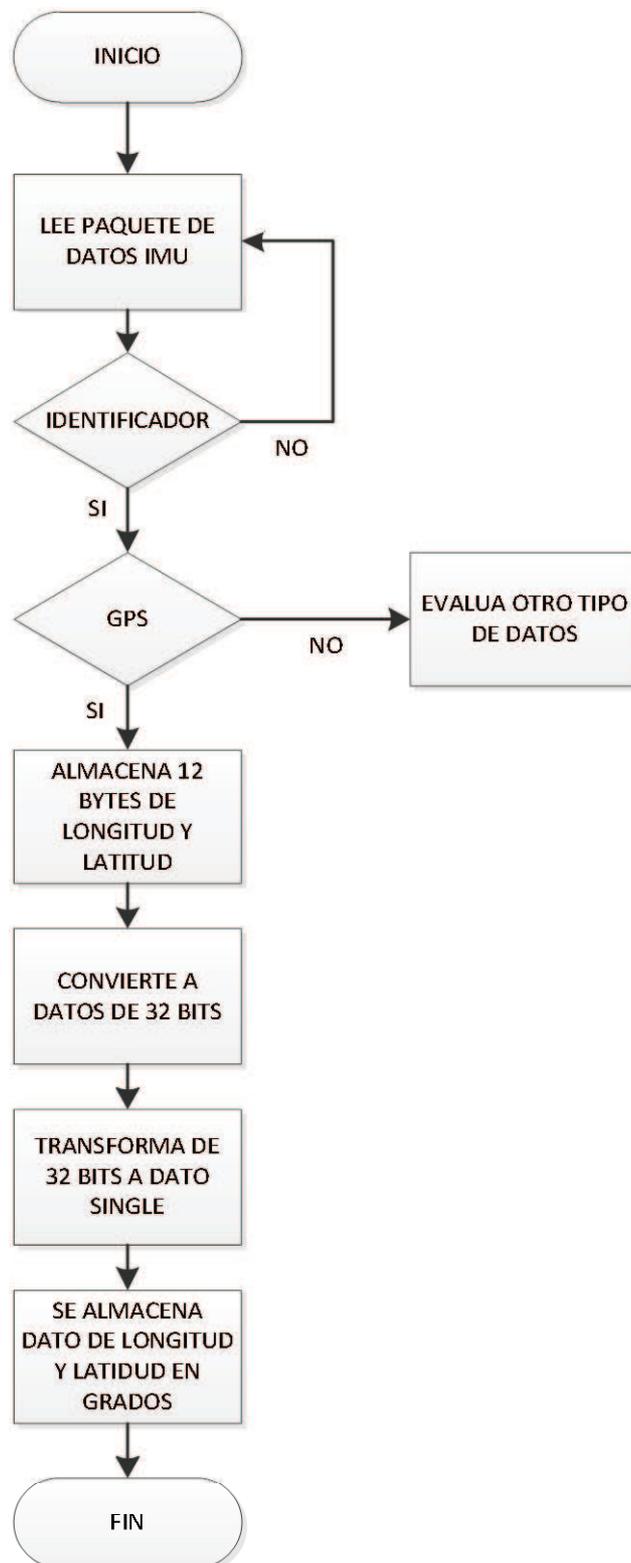


Figura 4.2 Diagrama de flujo para adquisición de datos del GPS

4.1.2.2. Datos para el control manual

El sistema necesita de una interfaz que le permita al usuario fijar la cámara en diferentes orientaciones en la modalidad de estabilización por ángulos. De igual forma debe poder apuntar a distintos lugares en la modalidad de geo-estabilización que usa ángulos Euler y GPS.

El control manual se realiza mediante la lectura de datos de un Joystick, estos datos son transmitidos mediante USB (de sus siglas en inglés Universal Serial Bus). El Joystick consta de 3 potenciómetros y 4 botones. Los datos del joystick controlan manualmente la posición de la cámara, la velocidad y dirección del robot móvil. La descripción de los controles del joystick se indica en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Funciones de los controles del joystick

| Joystick de control manual | Descripción de botones |
|---|---|
|  | Botones 1,2: Controlan el giro horizontal de la cámara. |
| | Botones 3,4: Controlan el giro vertical de la cámara. |
| | Potenciómetro 1: Controla la dirección del vehículo. |
| | Potenciómetro 2: Controla la velocidad del vehículo. |
| | Potenciómetro 3: Controla el zoom de la cámara. |

En la figura 4.3 se indica la lógica seguida para la adquisición de datos del joystick.

Adquisición de datos de control manual

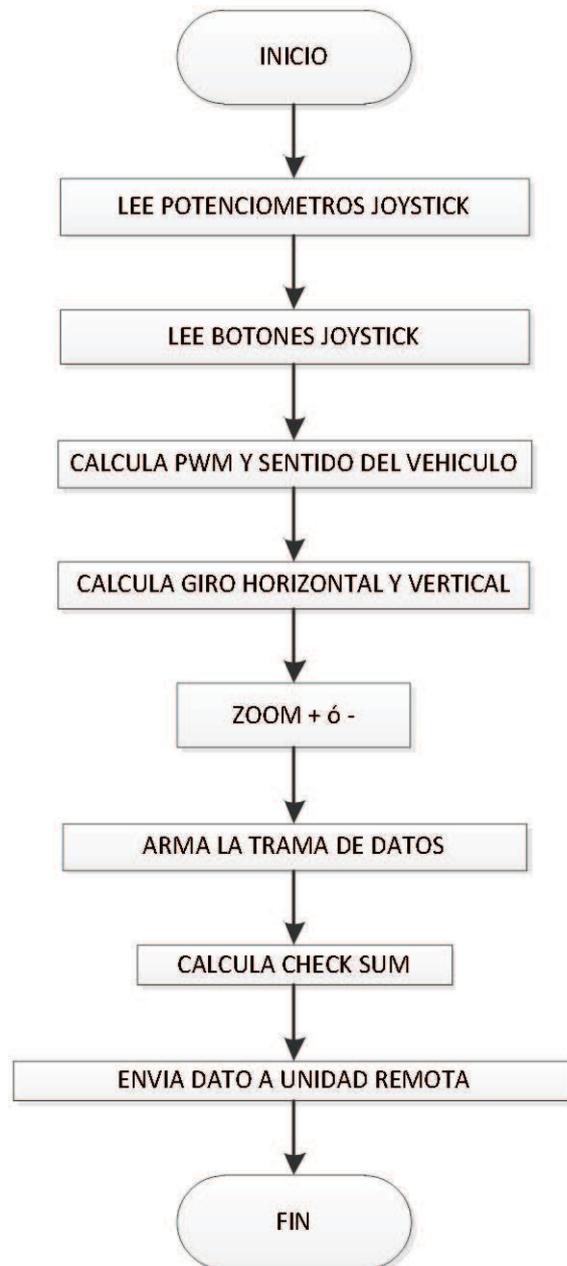


Figura 4.3 Diagrama de flujo para adquisición de datos de control manual

4.1.2.3. Trama de datos para el control

La comunicación se establece mediante una trama de datos con 13 bytes, contiene la información para mover todos los actuadores como se describe a continuación:

- Los primeros 2 bytes son identificadores de paquete de datos.
- Los bytes 3 y 4 son la parte alta y baja de un dato de 16 bits, con la información para el giro horizontal de la estructura de la cámara. Se usa 16 bits porque el dato tiene valores entre 0 y 4520. Esto es para tener amplio rango de resolución y para girar 720 grados.
- Los bytes 5 y 6 son la parte alta y baja de un dato de 16 bits, con la información para el giro vertical de la estructura de la cámara. Se usa 16 bits porque el dato tiene valores entre 0 y 1140.
- Los bytes 7 y 8 contienen el dato para controlar el zoom, cuando el byte “zoom+” o “zoom-” tienen el valor de 255 el micro controlador mueve un servomotor para acercar o alejar la imagen.
- Los bytes 9 y 10 están encargados del control de los motores DC del vehículo. El byte “sentido pwm” toma valores de “0” ó “255” siendo adelante y atrás. El byte “pwm motores” lleva un valor entre “0 -> 255” para controlar la velocidad del vehículo.
- Los bytes 11 y 12 están encargados de la dirección del vehículo. El byte “sentido giro” toma valores de “0” ó “255” siendo izquierda y derecha. El byte “pwm giro” lleva un valor entre “0 -> 255” para controlar la dirección del vehículo.
- El byte 13 “check sum” sirve para comprobar la integridad de la información. Está compuesto por la parte baja del resultado de sumar los bytes:
 - “horzL”
 - “vertL”
 - “pwm motores”
 - “pwm giro”

Tabla 4.2 Detalle de la trama de control

| Byte | Contenido |
|------|--------------|
| 1 | 9 |
| 2 | 8 |
| 3 | horzH |
| 4 | horzL |
| 5 | vertH |
| 6 | vertL |
| 7 | zoom + |
| 8 | zoom - |
| 9 | Sentido pwm |
| 10 | Pwm motores |
| 11 | Sentido giro |
| 12 | Pwm giro |
| 13 | Check Sum |

4.1.3. ESTABILIZACIÓN DE LA CÁMARA POR MEDIO DE ÁNGULOS

Este proceso consiste en compensar el giro de la estructura para que la cámara apunte al mismo lugar. Para lograr este objetivo es necesario girar los servos motores el mismo ángulo que ha girado la estructura en sentido contrario. A continuación se describe el proceso para obtener los ángulos de orientación.

El movimiento angular que presenta la estructura se conoce gracias a los datos de la IMU, esta indica el giro horizontal "YAW", vertical "PITCH" y rotativo "ROLL". Para el trabajo presente se compensa el movimiento angular horizontal y vertical.

Para calcular los ángulos YAW, PITCH y ROLL se cuenta con una IMU comercial que consta de un microcontrolador y los sensores inerciales: giroscopio, acelerómetro y magnetómetro, todos ellos tri-axiales.

El microcontrolador procesa los datos de los 3 sensores inerciales a 500 Hz para producir una solución de orientación estable, poco sensible a vibraciones y con un desvío despreciable.

El valor del desplazamiento angular se consigue mediante la integración de los datos del giroscopio, los cuales están dados como velocidad angular. Este proceso se realiza dentro de la IMU comercial CHR-UM6 [19].

En la figura 4.4 se muestra gráficamente la integración de la señal del giroscopio en el eje “z” dando una variación en el ángulo de orientación YAW.

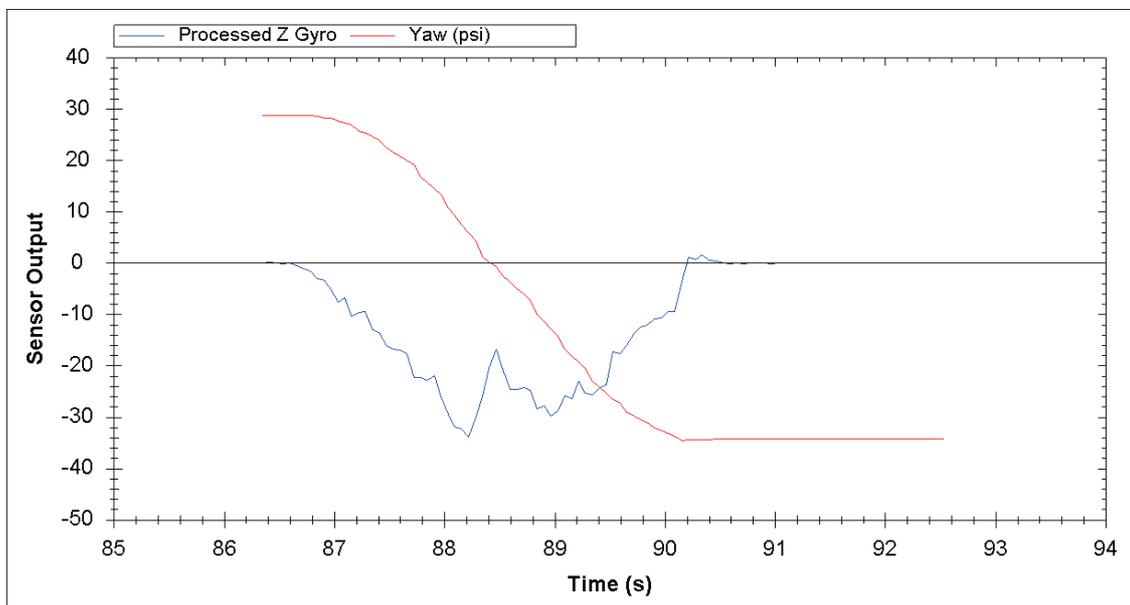


Figura 4.4 Cálculo de ángulo a partir de giroscopio

Una vez obtenidos los ángulos de orientación se puede saber a dónde se apunta, de esta manera si se añade el dato del control manual que indica la dirección para apuntar, se puede compensar el giro del robot móvil para que independientemente de los giros que realice la cámara enfoque al mismo lugar.

$$\text{ángulo a compensar} = \text{ángulo IMU} + \text{ángulo control manual}$$

El ángulo a compensar en grados se transforma a un dato que pueda ser entendido por el microcontrolador, para esto hay que transformarlo a ancho de pwm. Los servos motores con los que se trabaja están truncados para girar

muchas vueltas sin perder el control de posición. El análisis del control de los servos motores será analizado más adelante. La figura 4.5 muestra la lógica de control seguida para este procedimiento:

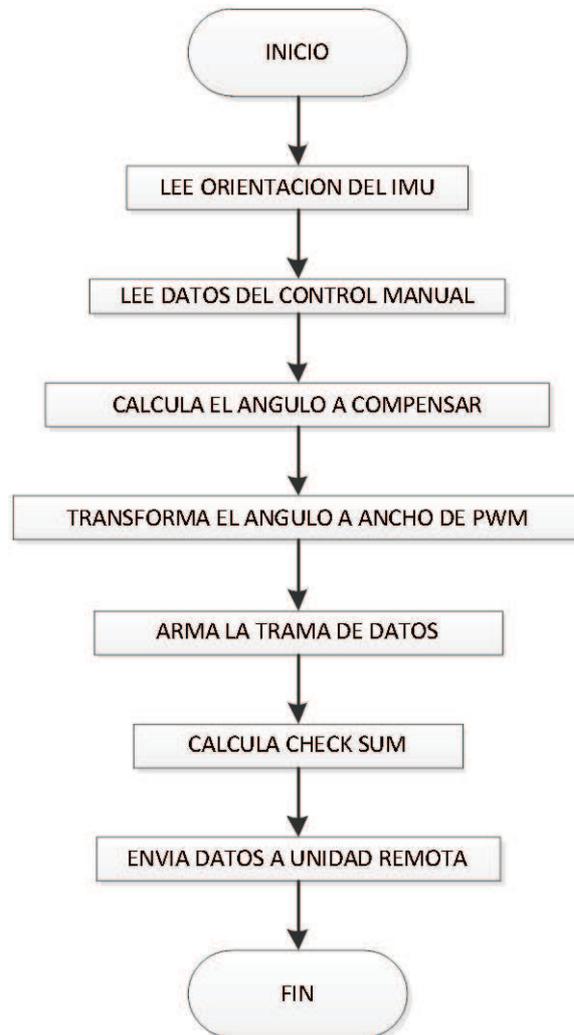


Figura 4.5 Diagrama de flujo para compensación por ángulos

4.1.4. GEO-ESTABILIZACIÓN DE LA CÁMARA POR MEDIO DE ÁNGULOS EULER Y 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 encuentre la cámara.

Para poder geo-estabilizar la cámara es necesario tener los siguientes datos:

- Ángulos Euler. Yaw, ángulo horizontal referenciado con el norte magnético.
- Posición geográfica de la estructura robótica que contiene a la cámara.
- Posición geográfica del lugar a apuntar.

4.1.4.1. Cálculo de ángulo yaw

Para calcular el ángulo Yaw 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 se encuentra el norte magnético que indicara la orientación del sistema.

Para encontrar el norte magnético con los datos de campo magnético de la tierra proporcionados por el magnetómetro se trabaja de la siguiente manera:

- Se toma los datos del eje Y del magnetómetro.
- Debido a cierta cantidad de ruido es necesario aplicar un filtro pasa bajos.
- Los datos filtrados se los almacena en una tabla con los datos de giroscopio.
- Los datos son tomados mientras se gira la estructura para que el magnetómetro mida variación de campo magnético.
- Se busca en la tabla el campo magnético con mayor valor y se toma el valor del giroscopio, esto indicara la nueva referencia para el giroscopio.

4.1.4.2. Filtro pasa bajos

Se diseña un filtro pasa bajos para atenuar el ruido del magnetómetro. Se diseña mediante la herramienta de MATLAB “butter” que permite diseñar un filtro en función de “s” de orden “n”. El filtro puede ser pasa alto, pasa bajo o pasa banda. El resultado de la herramienta es un filtro con los coeficientes en numerador y denominador, o en polos y ceros.

Para el magnetómetro se prueba a distintas frecuencias, y el resultado más rápido se ve a continuación:

```
[z,p,k]=butter(2,10,'low','s')
g=zpk(z,p,k)
g1=tf(g)
gd=c2d(g1,0.05)
```

Filtro en función de “s”

$$\frac{100}{(s^2 + 14.14s + 100)}$$

Función de transferencia discreta, (T = 50 ms)

$$\frac{0.09812 z + 0.07743}{z^2 - 1.318 z + 0.4931}$$

Implementación del filtro digital:

```
filtro(i)=0.09812*mag(i-1)+0.07743*mag(i-2)+1.318*filtro(i-1)-
0.4931*filtro(i-2);
```

Ejemplo de filtro y apuntamiento al norte: El resultado del algoritmo es la nueva referencia con respecto al norte. El algoritmo busca el mayor campo magnético en el eje Y, cuando esto sucede se crea un marcador que indica la nueva referencia al norte en grados para el giroscopio. El valor de la referencia debe ser sumado 90 grados ya que la medición se la hace en el eje Y y la orientación del sistema móvil es paralela al eje X.

Se toma 500 muestras a 20 Hz del campo magnético mientras se gira el sistema, ver figura 4.6, y el resultado es:

| | | |
|---|---|--------------|
| Campo magnético máximo en la muestra numero | = | 444 |
| Valor del giroscopio a campo magnético máximo | = | 37.14 grados |
| Nueva referencia al norte magnético | = | 37.14+90 |
| | = | 127.14 |

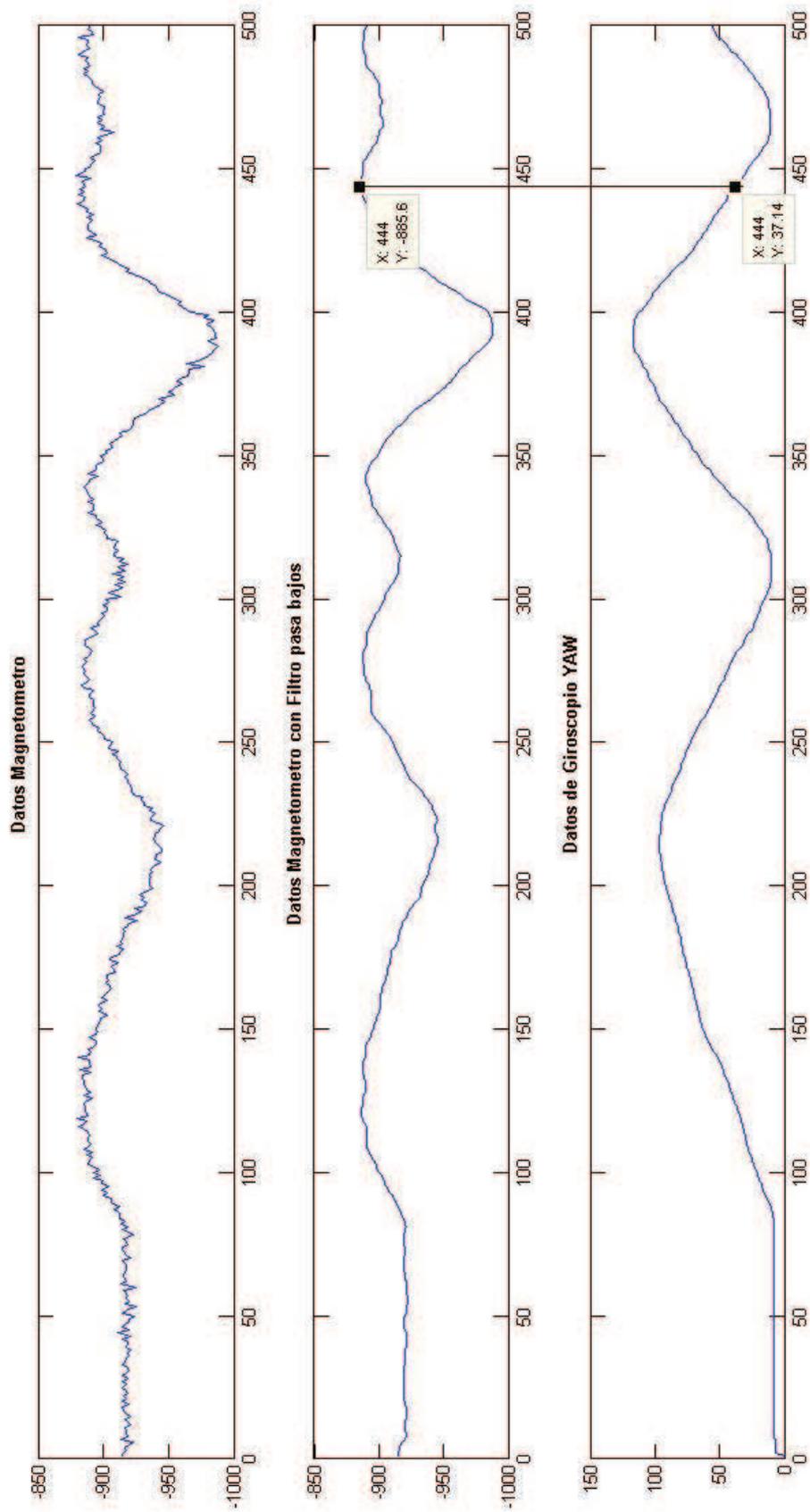


Figura 4.6 Datos para orientación al norte magnético

4.1.4.3. Posición geográfica del sistema robótico

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 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 mediante el uso de “Google Maps APIs”, el uso de esta herramienta permite tener gráficamente la ubicación actual, y como se verá posteriormente, la ubicación del lugar a apuntar.

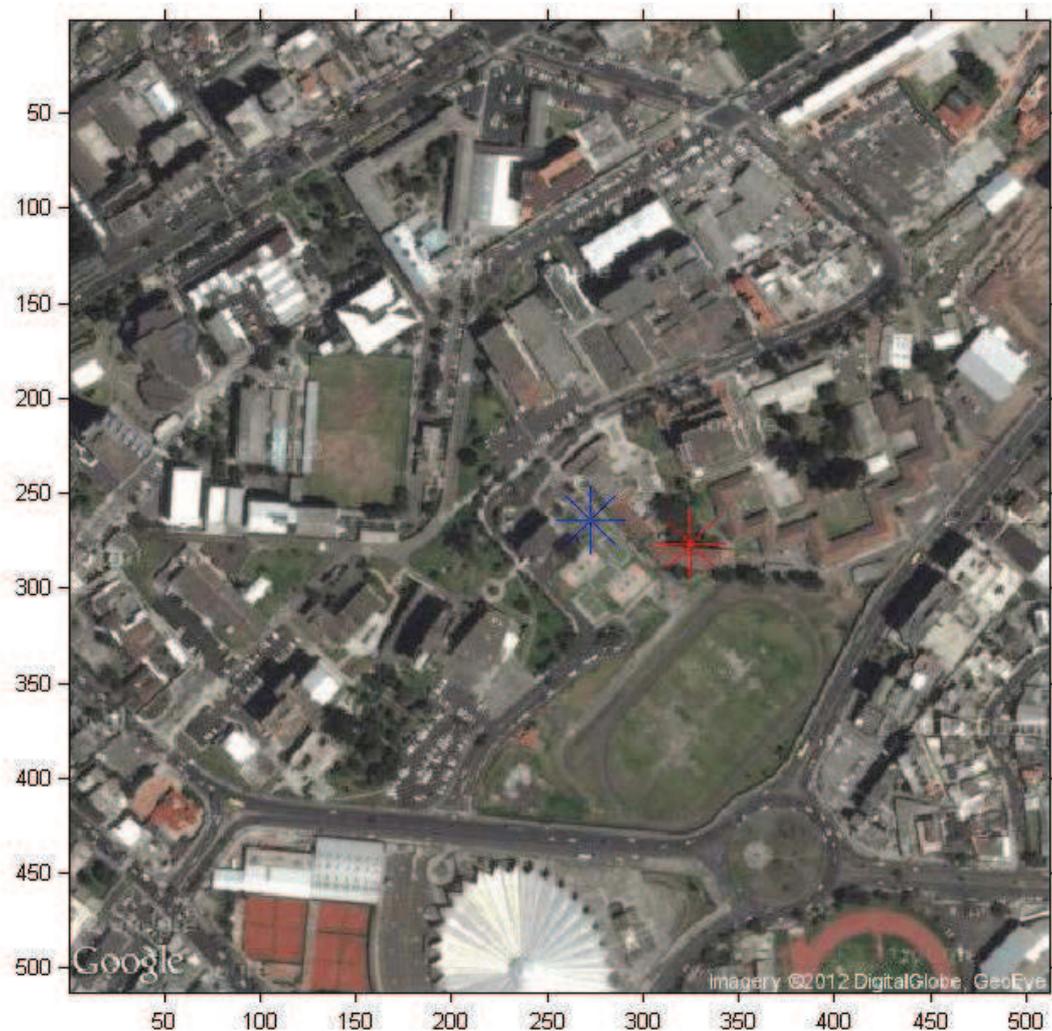


Figura 4.7 Ejemplo de ubicación geográfica [33]

Google Maps APIs permite descargar una foto de cualquier lugar definiendo su longitud, latitud y el zoom que se necesite. La respuesta de esta herramienta es una imagen de 520 x 520 pixeles en formato GIF con centro en la coordenada solicitada.

De esta forma se consigue gráficamente 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 no se descarga otra imagen de Google Maps, lo que se hace es transformar la longitud y latitud a pixeles. Con el valor en pixeles se ubica al sistema en el mapa.

Para transformar longitud y latitud a pixeles se debe saber el tamaño de la imagen y el zoom con el que se trabaja.

Para calcular el valor del pixel se usa la siguiente formula:

$$\text{pix.x} = (\text{longitud.actual} - \text{longitud.inicial}) * 512 / \text{factorlong} + 256$$

Donde:

| | | |
|------------------|---|--|
| pix.x | = | Ubicación del pixel entre 0 y 512. |
| longitud.actual | = | Dato de longitud del GPS |
| longitud.inicial | = | Dato de longitud del centro de la imagen |
| factorlong | = | Valor asignado a la imagen según el zoom |

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

zoom = Acercamiento a la imagen

En el presente trabajo se usa un zoom de 17 y el valor del factor para la longitud es de:

$$\begin{aligned} \text{factorlong} &= 360^\circ / (2^{(17-1)}) \\ \text{factorlong} &= 0.005493 \text{ grados/pixel} \end{aligned}$$

4.1.4.4. Posición geográfica del lugar a apuntar

El lugar a apuntar es elegido por el usuario en un HMI mediante un joystick moviendo un puntero al lugar deseado. El lugar elegido para apuntar tiene coordenadas en longitud y latitud que deben ser transformadas a píxeles.

4.1.4.5. Cálculo para la geo-estabilización

Una vez obtenido el ángulo "YAW", la posición geográfica del sistema y la posición geográfica del objeto a apuntar, el direccionamiento de la cámara se calcula de la siguiente manera.

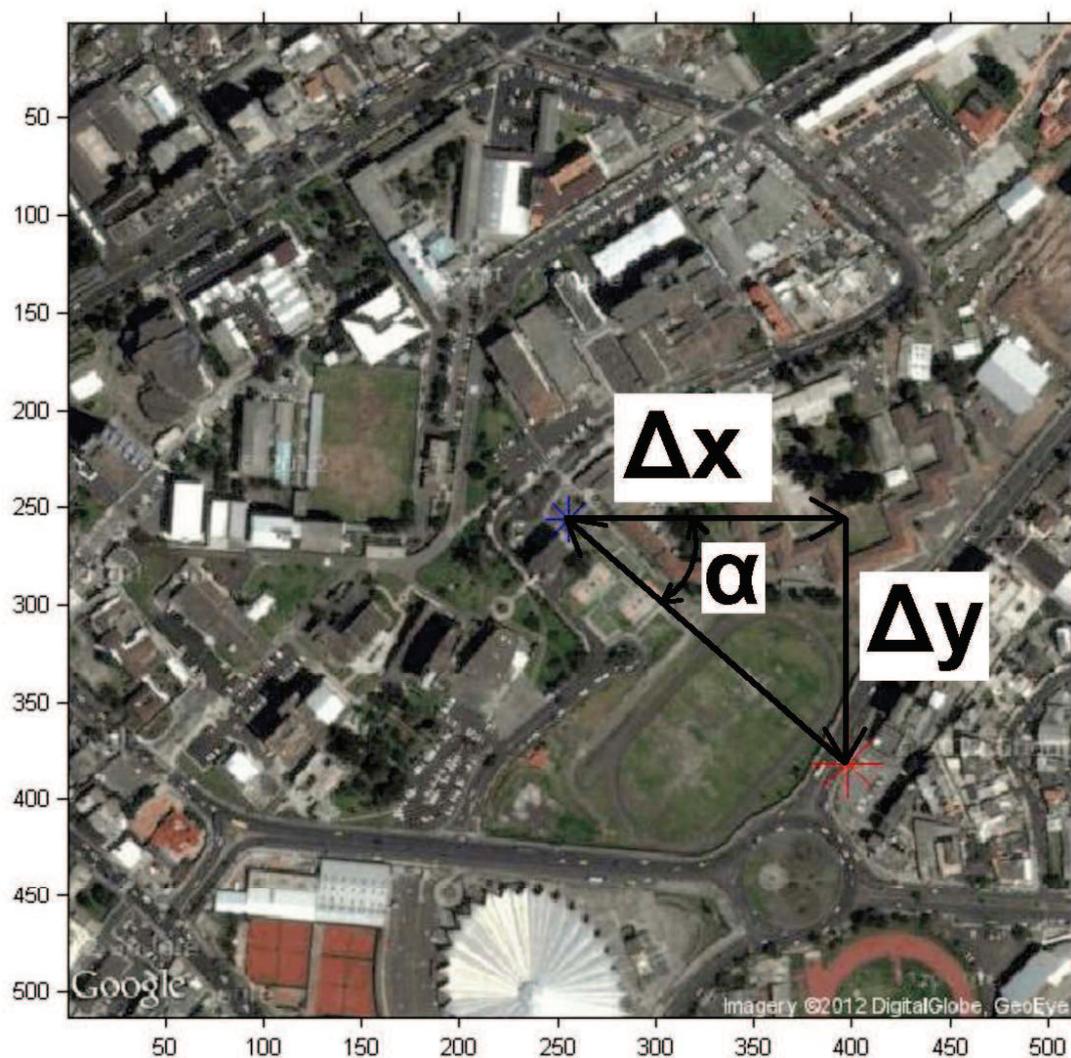


Figura 4.8 Descripción de variables para geo-estabilizar

- Calcula α , ángulo de inclinación entre el punto geográfico del sistema y el objeto que se desea apuntar.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

- 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 proceso de geo-estabilización se describe a continuación:



Figura 4.9 Diagrama de flujo de geo-estabilización

4.1.5. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA 164PA

En esta sección se describe el software que contiene el microcontrolador ATmega 164PA, en la figura 4.10 se muestra el diagrama de flujo del programa global:

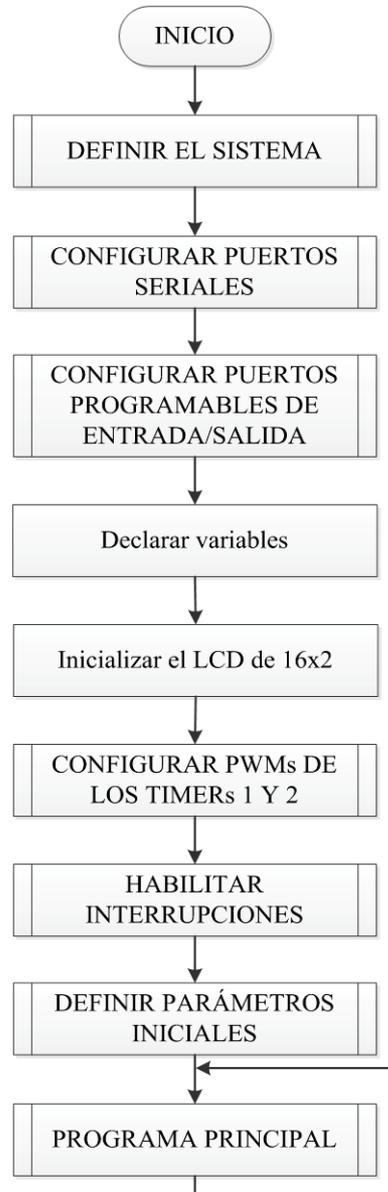


Figura 4.10 Diagrama de flujo global del software en el ATmega 164PA

El programa consta de bloques distribuidos de acuerdo a un orden sistemático que permite la correcta ejecución de las acciones programadas, en las siguientes figuras se indica una descripción más detallada de cada bloque.

El bloque “DEFINIR SISTEMA” consiste en la especificación del microcontrolador y su oscilador principal, este último es seleccionado mediante un análisis de los ciclos de máquina del sistema a fin de efectuar el programa con la velocidad apropiada y evitar la pérdida de los comandos de control transmitidos serialmente. Por tanto, para la velocidad de transmisión establecida de 19200 baudios (bits por segundo) en los otros componentes del sistema (IMU, GPS, XBee), el oscilador con el cual se tiene el menor error de transmisión es de 20 MHz, además sus ciclos de máquina garantizan que no se pierda ningún dato porque se dispone de tiempo suficiente para recibir y ordenar la secuencia de los comandos de control.

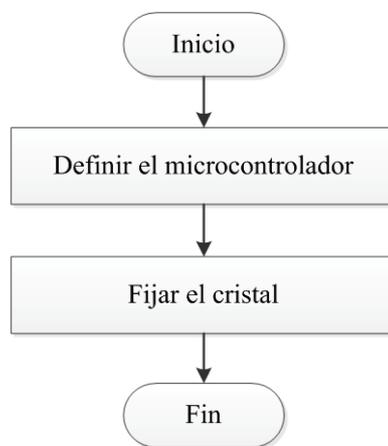


Figura 4.11 Bloque “DEFINIR SISTEMA”

“CONFIGURAR PUERTOS SERIALES” es el bloque donde se definen los parámetros de la comunicación serial, dado por: puerto, baudrate, paridad y bits de parada, para completar se abren los puertos requeridos.

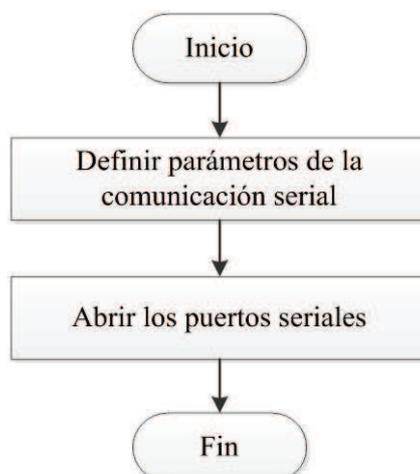


Figura 4.12 Bloque “CONFIGURAR PUERTOS SERIALES”

“CONFIGURAR PUERTOS PROGRAMABLES DE ENTRADA/SALIDA” conforma el código correspondiente a la inicialización de los puertos de entrada/salida del sistema microcontrolado de acuerdo al análisis de entradas/salidas revisado en el capítulo anterior. Se toma como principal prioridad establecer como entradas y fijar el nivel lógico bajo, 0L, a todo pin del microcontrolador que no se utilice con el propósito de evitar el ingreso de una potencial interferencia porque en el caso de no realizar esta acción los pines funcionarían como antenas.

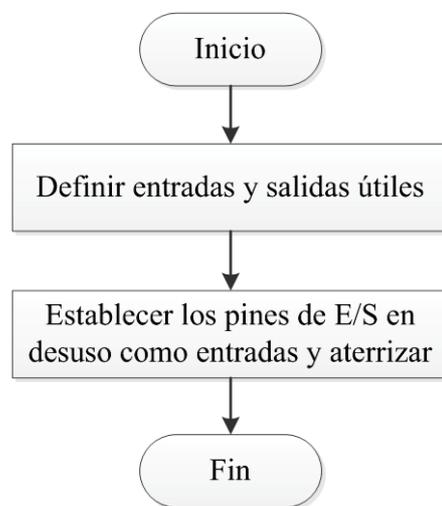


Figura 4.13 Bloque “CONFIGURAR PUERTOS PROGRAMABLES DE ENTRADA/SALIDA”

Los bloques que tratan sobre “CONFIGURAR PWMs DE LOS TIMERS 1 y 2” se encargan seleccionar el modo de funcionamiento de los timers; para el timer 1 se escoge el modo de generación de forma de onda 14 cuya operación es PWM rápida (fast PWM) y la característica más importante es que permite obtener dos señales PWM de frecuencia deseada con una resolución de 16 bits, mientras el timer 2 opera en el modo de generación 1 con salida PWM de fase correcta (PWM, phase correct) mediante esta configuración se logra obtener una señal apropiada de frecuencia similar a las anteriores con una resolución de 8 bits, el modo síncrono permite que el timer 2 use el oscilador principal en lugar del cristal de 32 KHz destinado para funciones de reloj en tiempo real.

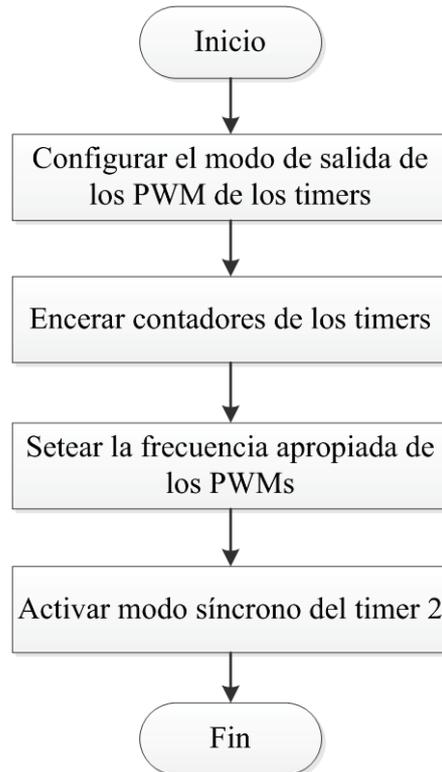


Figura 4.14 Bloque “CONFIGURAR PWMs DE LOS TIMERS 1 y 2”

Para este proyecto la frecuencia de las señales PWM obtenidas con el timer 1 es de 50 Hz y la ventaja de trabajar en 16 bits es el amplio rango de variación del pulso en alto de la señal permitiendo que los pasos de los servomotores sean pequeños a fin de estabilizar la imagen ante pequeñas variaciones de la superficie o zona donde se mueva la plataforma robótica móvil que pueden representar desviaciones considerables cuando se enfoque el objetivo a distancias considerables. En relación al timer 2, se obtiene una señal PWM de alrededor de 38 Hz con resolución de 8 bits cuyo inconveniente son los pocos pasos que se puede efectuar, sin embargo, esta característica es suficiente para el control del zoom gobernado por tres estados del servomotor: izquierdo, neutro, derecho.

La figura 4.15 muestra un UAV que opera en conjunto con un sistema electro-óptico donde se observa que los movimientos característicos del sistema como cambios inesperados de actitud son eliminados y/o atenuados en la adquisición de la imagen gracias al trabajo del sistema de estabilización.

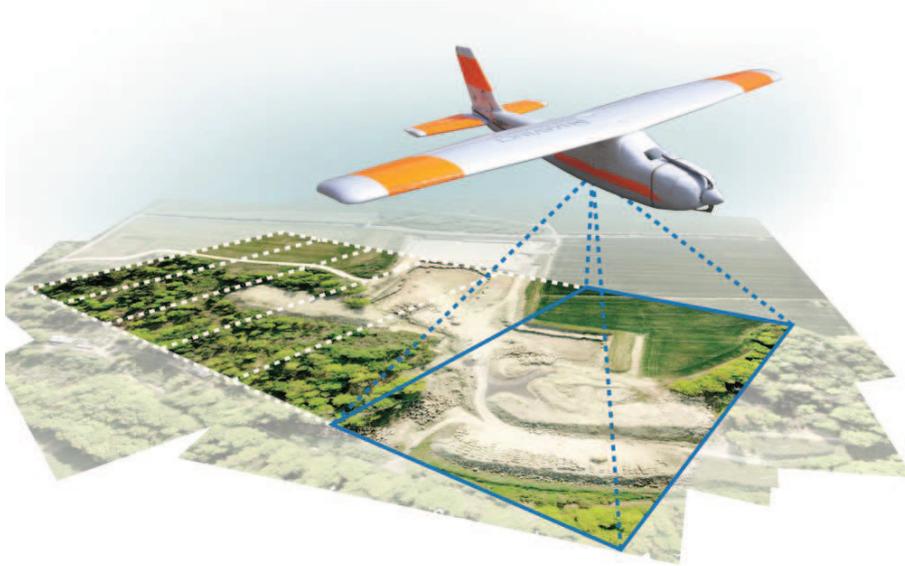


Figura 4.15 Sistema aéreo no tripulado: UAV + EO. Resultado de la adquisición de imagen con un sistema de geo-estabilización [34]

La tabla 4.3 describe los rangos controlables de las señales PWM que maneja el microcontrolador ATmega 164PA a través de los pines OC1A, OC1B y OC2B. Los ciclos de máquina que cuenta el timer 1 del sistema microcontrolado es en pasos de 0.4 us que se obtiene al dividir para 8 el cristal de 20 MHz mediante el prescalador interno, luego para obtener una frecuencia de 50 Hz se carga en el registro de comparación del conteo a 50000, como resultado se obtiene una señal PWM cuyo periodo es de 20 ms exactos; por ejemplo, la circuitería de los servos funcionan entre 1 a 2 ms como valores estándar, el ancho de pulso puede ser regulado de 2500 a 5000 unidades de ciclo de máquina del microcontrolador que representa las unidades controlables, de esta manera se tiene un rango de control con la diferencia de los dos valores anteriores obteniendo 2500. En cambio, el timer 2 al no disponer de un registro de comparación de conteo se utilizar el prescalador para obtener una frecuencia parecida, la más cerca se consigue dividiendo los 20 MHz para 1024, obteniéndose como resultado un PWM de aproximadamente 38 Hz cuyo ancho de pulso se regula mediante un registro de 8 bits, el ciclo de máquina con el que opera el timer 2 es de 51.2 us y el modo PWM de fase correcta hace que se duplique el periodo en relación al modo PWM rápido.

Tabla 4.3 Características de las Señales PWM

| Pin de salida | Movimiento | Frecuencia | Rango de movimiento | Rango de control |
|---------------|------------|------------|---------------------|------------------|
| OC1A | Horizontal | 50 Hz | -360° a +360° | 0 a 4520 |
| OC1B | Vertical | 50 Hz | -90° a +90° | 0 a 1140 |
| OC2B | Zoom | 38 Hz | --- | 0 a 7 |

Los valores del rango de control se han obtenido experimentalmente y se puede observar que existe una pequeña diferencia propia del sistema pan & tilt, es decir, una media vuelta para el servo que efectúa el movimiento horizontal de la cámara se consigue con un rango de control de 1130, mientras para el vertical con 1140.

El bloque “HABILITAR INTERRUPTIONES” consiste en especificar la subrutina que se ejecutará cuando suceda el evento de interrupción, la primera es la interrupción de desborde del timer 2 que se implementa a fin de realizar la actualización de los comandos de control con una frecuencia de 38 Hz, la otra es la interrupción de recepción serial completa cuya subrutina es utilizada para recibir serialmente sin pérdida de datos la trama que contiene los comandos de control.

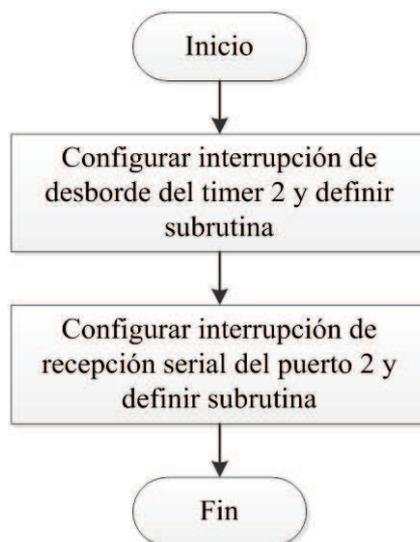


Figura 4.16 Bloque “HABILITAR INTERRUPTIONES”

“DENIFIR PARÁMETROS INICIALES” es el bloque de código que inicializa y carga variables del sistema, los más importantes son los que controlan el PWM,

además se despliega el saludo inicial en el módulo LCD y finalmente se habilita la interrupción global la que permite que las interrupciones activadas de forma individual puedan ejecutarse.

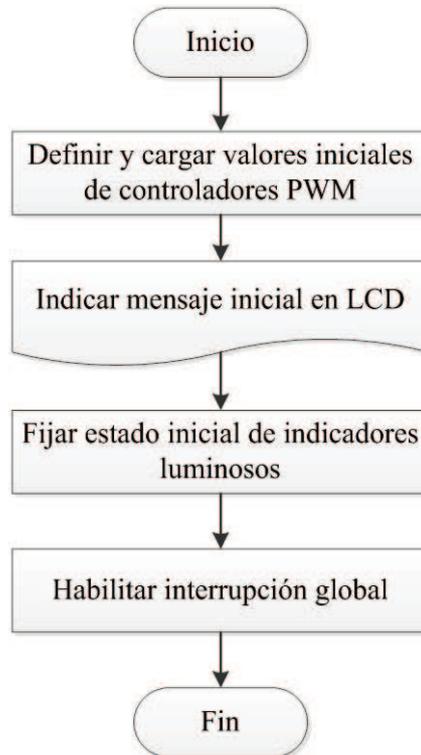


Figura 4.17 Bloque “DEFINIR PARÁMETROS INICIALES”

Los bloques que siguen corresponden a las dos subrutinas que se ejecutan como parte del programa principal, tomando en cuenta que el bloque “PROGRAMA PRINCIPAL” está libre a fin de realizar alguna otra acción que se pueda requerir en el futuro.

El algoritmo de control funciona en base a la interrupción del timer 2, dentro está el algoritmo principal de control y adicionalmente un pequeño programa que controla las luces del sistema. El algoritmo principal pretende actualizar los datos de los comandos de control cada 26 ms (38 Hz) para ello hace dos verificaciones, una, la trama esté completa y otra, los datos de la trama sean válidos, luego efectúa el programa relacionado a los controladores PWM, caso contrario sale de la subrutina y espera para tomar nuevos datos por el puerto serial.

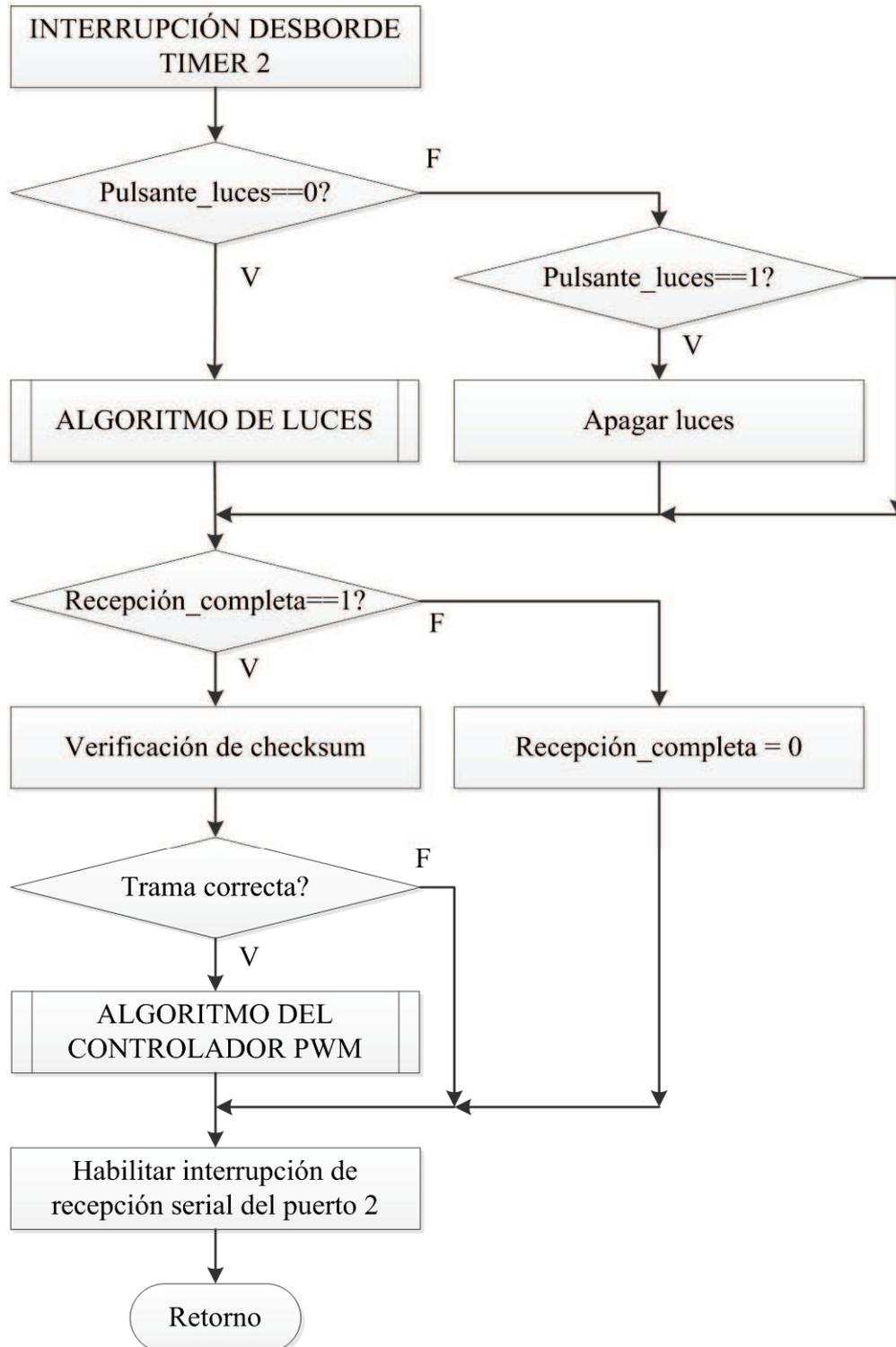


Figura 4.18 Subrutina de Interrupción de desborde del timer 2

En la figura 4.19 se muestra el diagrama de flujo del programa donde se carga los valores de los controladores PWM:

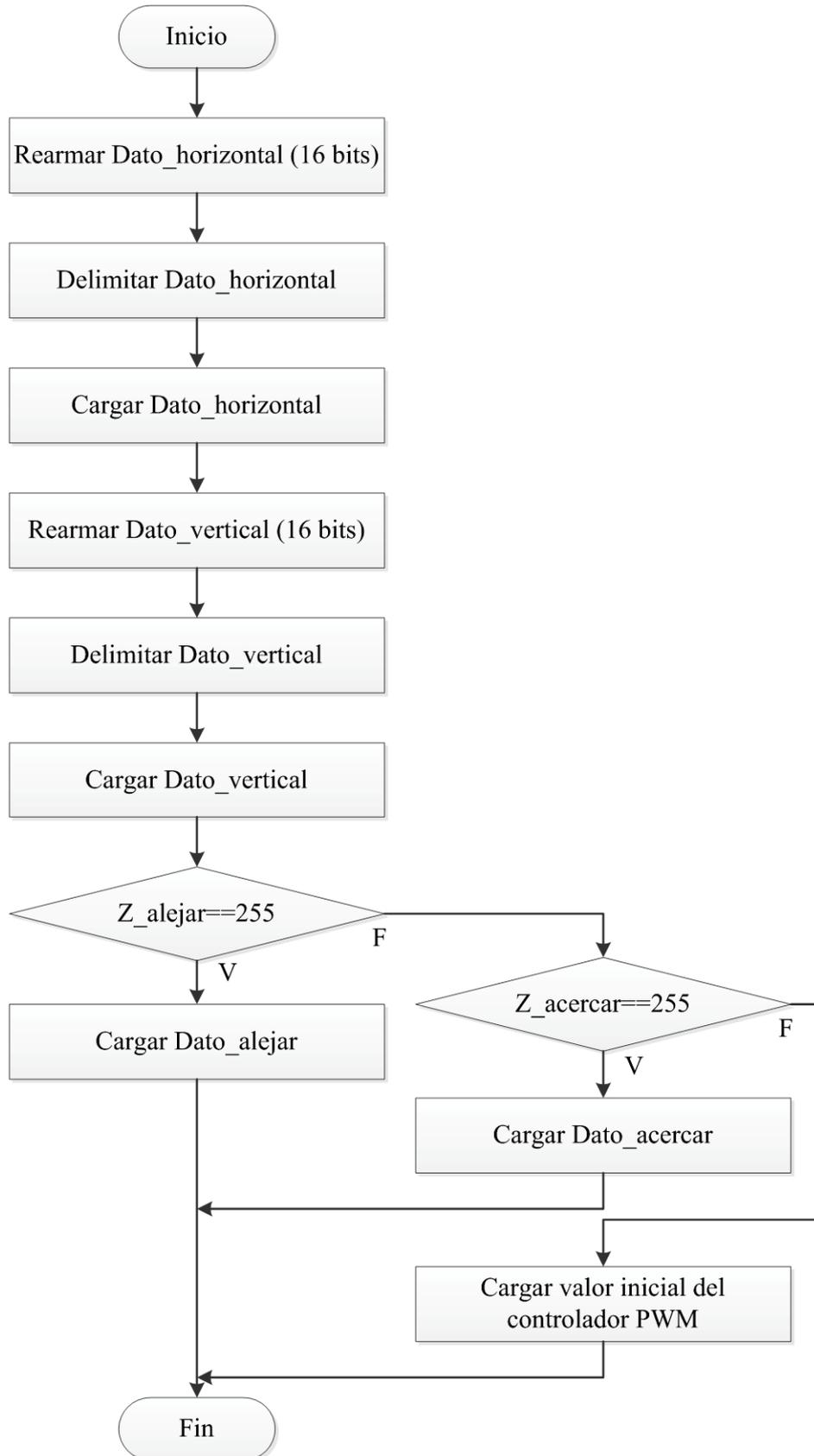


Figura 4.19 Bloque “ALGORITMO DEL CONTROLADOR PWM”

Diagrama de flujo de la secuencia para ordenar los datos de la trama de 13 bytes:

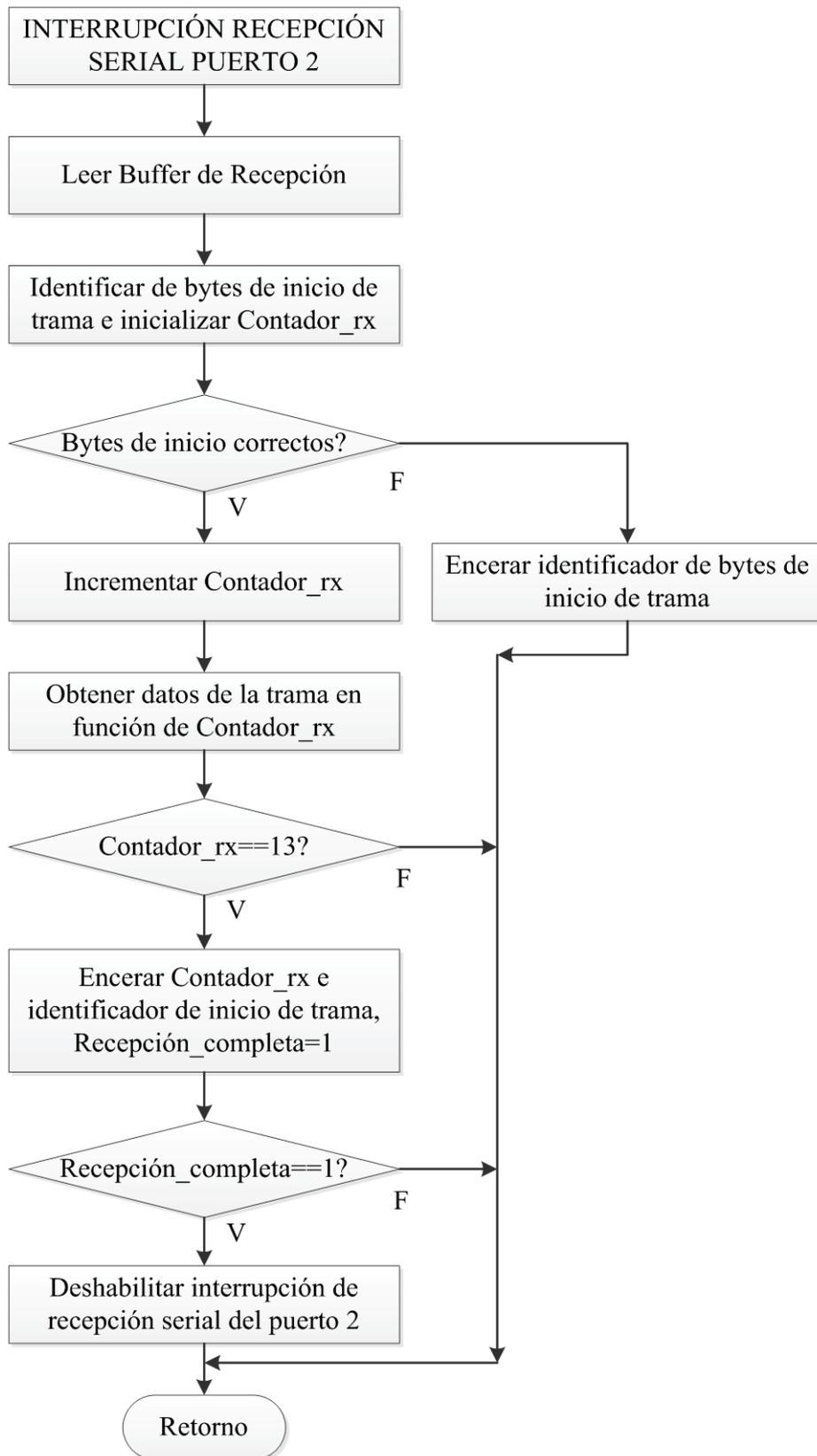


Figura 4.20 Subrutina de Interrupción de recepción serial completa del puerto 2

Los resultados esperados del programa desarrollado en BASCOM-AVR para el microcontrolador ATmega 164PA se obtiene por simulación en ISIS Proteus, que reflejan con mucha exactitud el comportamiento global del sistema.

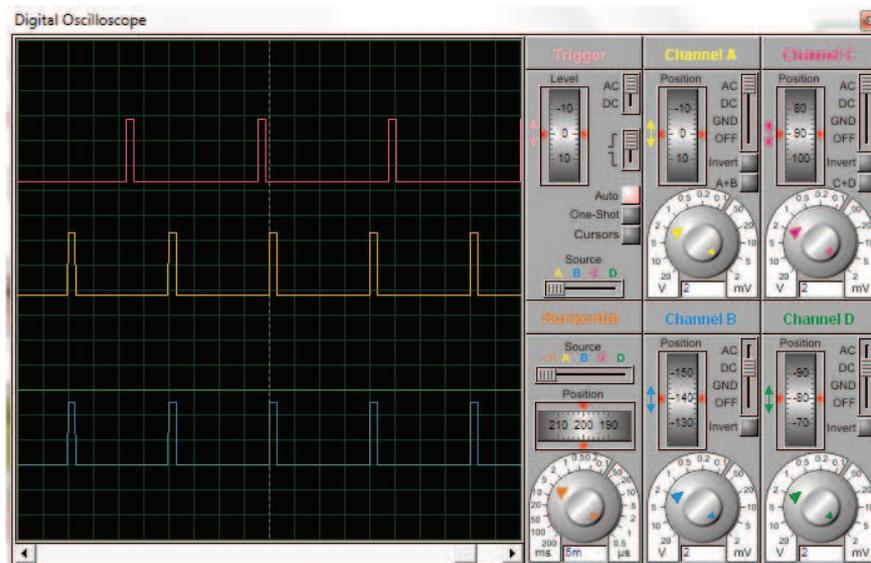
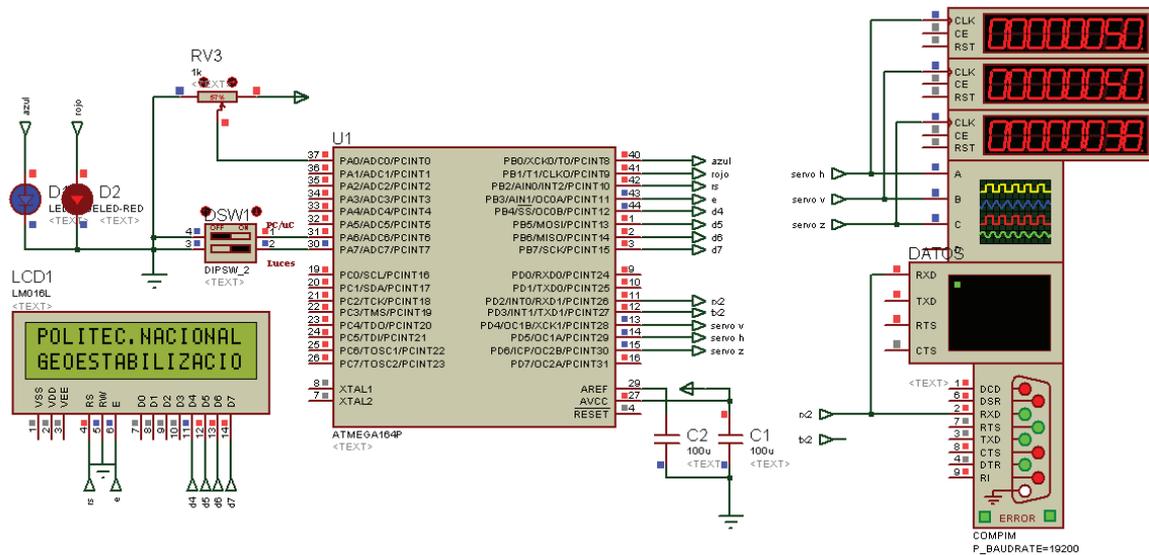


Figura 4.21 Simulación en Proteus, ISIS, del software implementado en el ATmega 164PA

4.1.6. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA 168

Se describe el software que contiene el microcontrolador ATmega 168 como un algoritmo muy parecido al del microcontrolador ATmega 164PA, se indican las principales diferencias en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Comparación entre los algoritmos de control ATmega 164 PA y 168

| Algoritmo/Diagrama | ATmega 164PA | ATmega 168 |
|--------------------------------------|--|---|
| DEFINIR SISTEMA | Cristal de 20 MHz | Cristal de 8 MHz |
| CONFIGURAR PUERTOS SERIALES | Puerto COM 2 | Puerto COM 1 |
| CONFIGURAR PUERTOS DE ENTRADA/SALIDA | De acuerdo al respectivo análisis de E/S | De acuerdo al respectivo análisis de E/S |
| Inicializar el LCD de 16x2 | Disponible | No se requiere |
| CONFIGURAR PWMs DE LOS TIMERS 1 Y 2 | Se activa las salidas OC1A, OC1B y OC2B PWM del timer 2 se genera a 38 Hz | - Se activa las salidas OC1B y OC2B - PWM del timer 2 se genera a 1.96 KHz |
| HABILITAR INTERRUPTOS | Desborde timer 2 (actualización de comandos a 38 Hz) | Desborde timer 0 (actualización de comandos a 50 Hz) |
| DEFINIR PARÁMETROS INICIALES | Mensaje inicial en el LCD | No maneja LCD |
| INTERRUPCIÓN DESBORDE TIMER 2 | Maneja algoritmo complementario de luces | No tiene algoritmo de luces |
| ALGORITMO DEL CONTROLADOR PWM | Regula tres controladores PWM, dos de 16 bits y uno de 8 bits | - Regula dos controladores PWM, ambos de 8 bits - Tiene dos línea de control adicionales para los sentidos de giro |

En definitiva, cuando se trata del algoritmo de control, el microcontrolador ATmega 164PA está destinado a efectuar los comandos contenidos en los bytes 3° a 8°, mientras el ATmega 168 ejecuta los que están en los bytes 9° a 12° de la trama de trece bytes.

- Datos de los sensores.
- Estabilización de cámara por ángulos.
- Geo-estabilización por GPS y ángulos Euler.
- Visualización del vídeo de la cámara transmitido inalámbricamente.

En todas las modalidades el control manual está activado, esto permite tener control del vehículo y de la estructura que mueve la cámara.



Figura 4.23 Ventana principal HMI

4.2.1. FUNCIÓN SENSORES

En la modalidad “SENSORES” se eligen los datos a visualizar. Se puede seleccionar datos de cada tipo y en cada eje del sensor, el dato seleccionado se muestra en un gráfico independiente. Se grafica los datos de los siguientes sensores:

- Ángulos
- Magnetómetro
- Acelerómetro
- GPS



Figura 4.24 Pantalla de selección de datos a graficar

Una vez elegidos los datos se grafican, los resultados están en las figuras 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28. Las figuras 4.25 a 4.28 muestran la visualización de datos para cada sensor:

- Giroscopio:

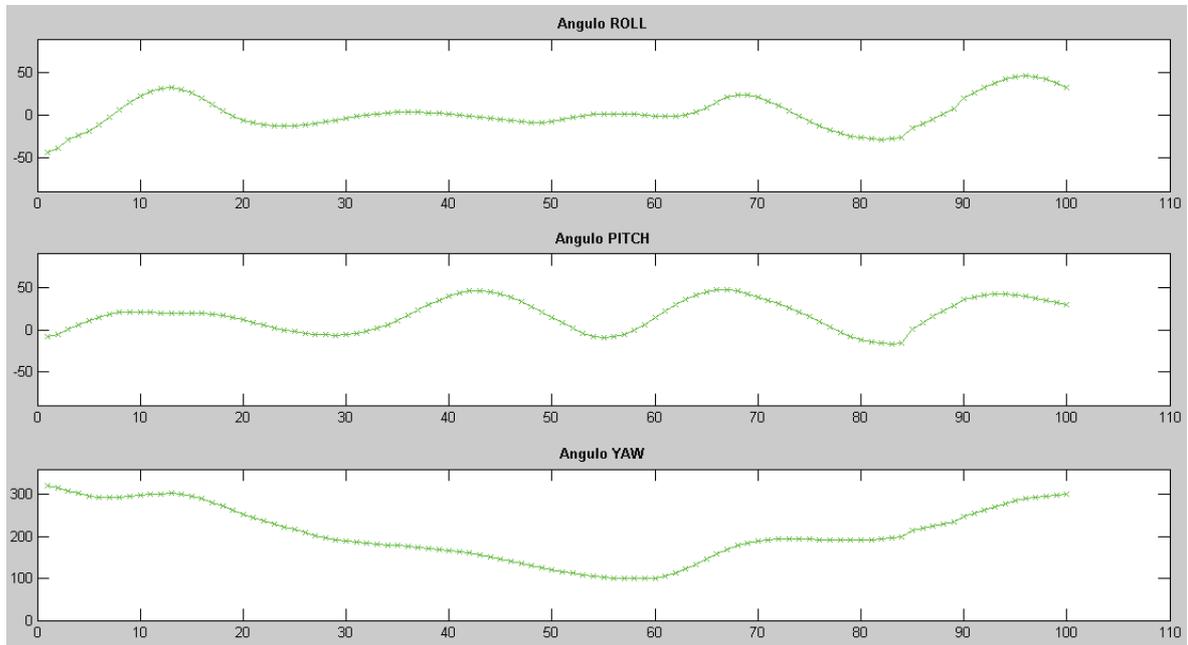


Figura 4.25 Ángulos ROLL, PITCH, YAW

- Acelerómetro:

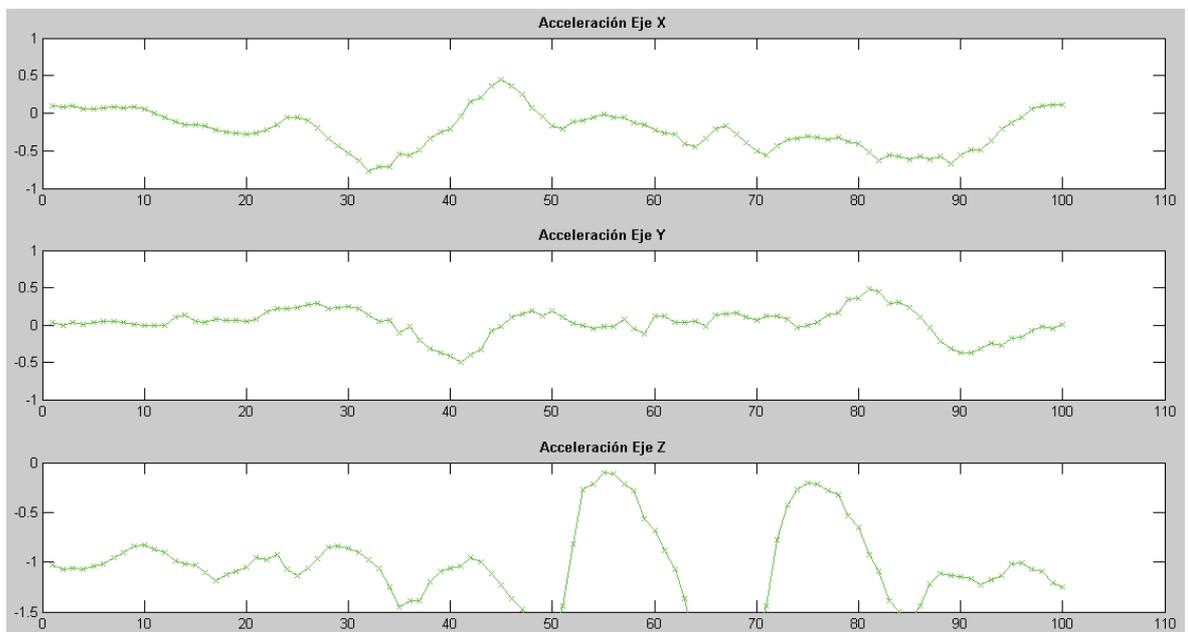


Figura 4.26 Aceleración en ejes x, y, z

- Magnetómetro:

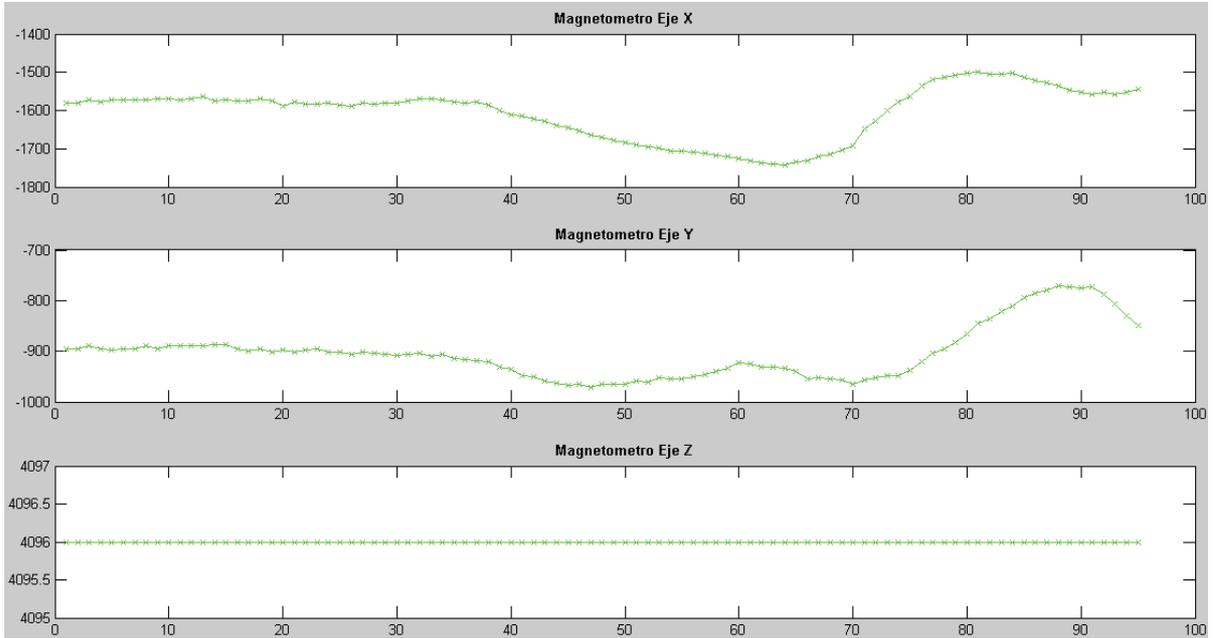


Figura 4.27 Campo Magnético en ejes x, y, z

- GPS:

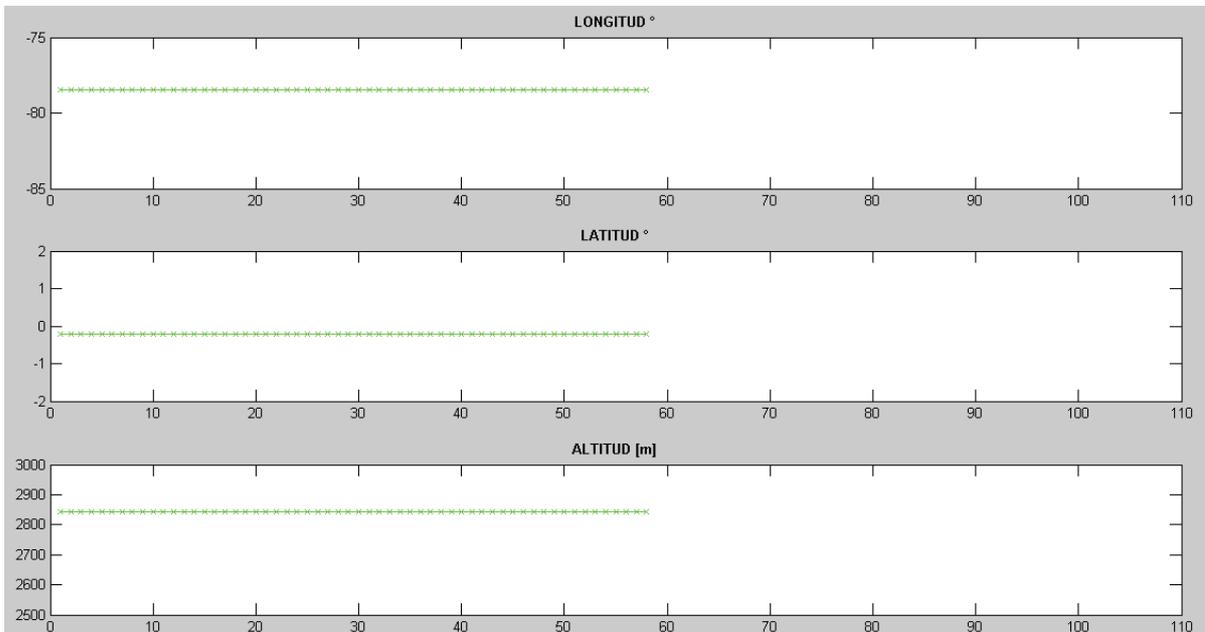


Figura 4.28 Longitud, latitud y altura

4.2.2. FUNCIÓN ESTABILIZACIÓN

Esta función permite ver la orientación del sistema reflejado en una imagen 3D que se indica en la figura 4.29. Se tiene el modelo de un avión en el cual está reflejado los giros de la plataforma inercial. De esta manera las perturbaciones de ángulo en pitch, yaw y roll que sean aplicadas al vehículo móvil serán representadas por el modelo de la aeronave en 3D [35].

Mientras se ejecute esta función el sistema estabiliza la cámara en una orientación fijada por el control manual. El sistema está encargado de calcular el ángulo a compensar para mantener la orientación de la cámara y enviarlo al vehículo para mover los servomotores.

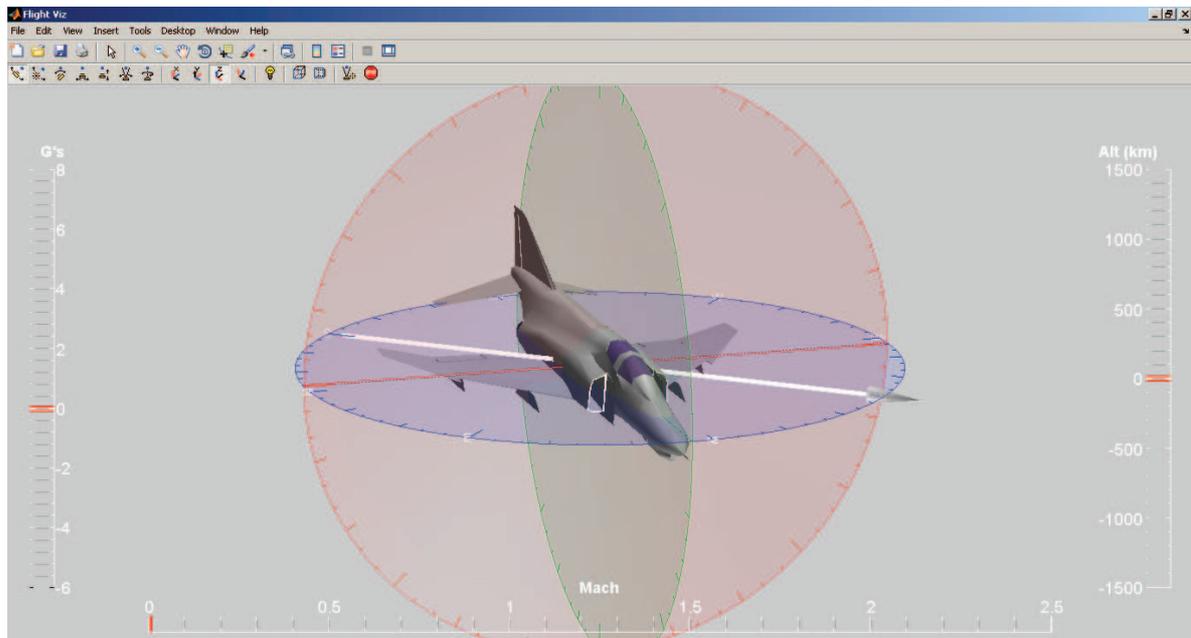


Figura 4.29 Representación de giros en el HMI.

4.2.3. FUNCIÓN GEO-ESTABILIZACIÓN

Esta función realiza la tarea de geo-estabilizar la cámara en un objeto elegido por el control manual, usando los datos de GPS y ángulos Euler. Se muestra gráficamente en un mapa satelital dos punteros, uno rojo y otro azul que representan:

Azul -> Ubicación del robot móvil.

Rojo -> Ubicación del objeto a apuntar.

En la interfaz gráfica se muestran los datos de:

- Longitud, latitud y altura para el robot móvil.
- Longitud y latitud del objeto a apuntar.
- Orientación del robot móvil dada en ángulo YAW.
- Distancia en metros entre el sistema móvil y el objeto a apuntar.

Adicionalmente esta graficado un vector de color “verde” el cual muestra la orientación del robot móvil, ver la figura 4.30.

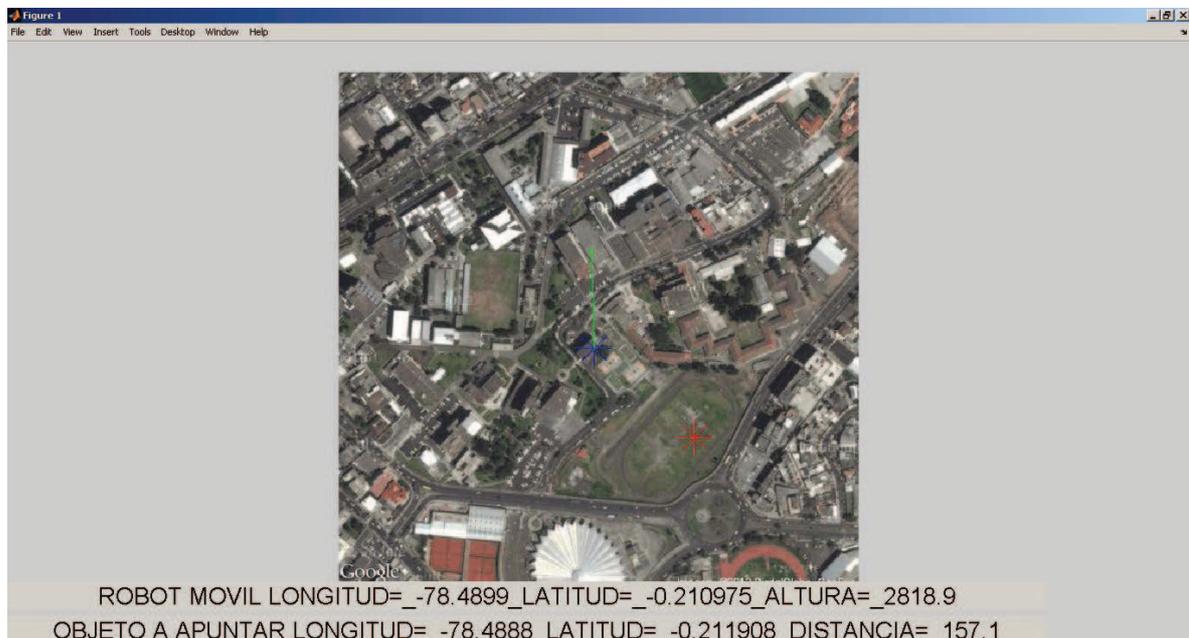


Figura 4.30 Interfaz gráfica para la geo-estabilización

4.2.4. FUNCIÓN CÁMARA

Visualiza el vídeo transmitido inalámbricamente desde la cámara instalada en el vehículo. La imagen se adquiere con MATLAB y se la muestra con una resolución de 352 x 240 píxeles. La imagen se adquiere en formato RGB como una matriz 352 x 240 x 3.

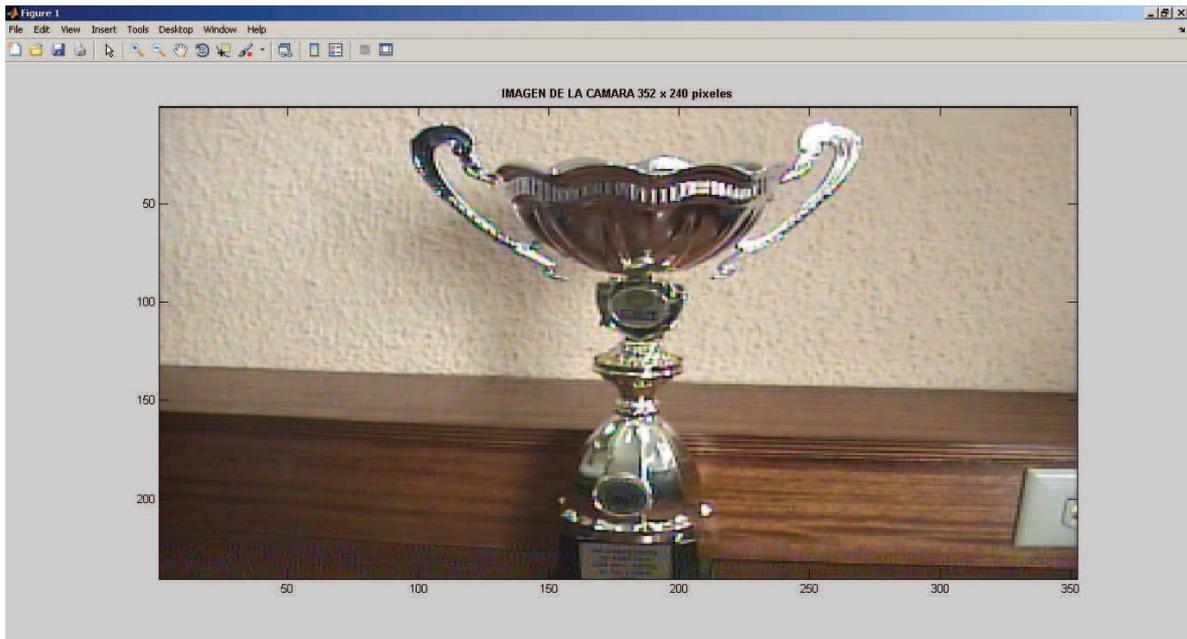


Figura 4.31 Interfaz gráfica para la visualización de imagen.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

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

5.1. EXPERIMENTACIÓN EN LABORATORIO

Se describen las pruebas realizadas en el laboratorio de Energías, en el Proyecto de Sistemas Electro-Ópticos en la Facultad de Ciencias. Adicionalmente se incluyen pruebas en ambiente externo realizadas en el estadio de la Escuela Politécnica Nacional. Las pruebas que se muestran a continuación son el resultado final del proyecto desarrollado.

5.1.1 PRUEBA DE LOS ENLACES INALÁMBRICOS

Se utilizan dos canales de comunicación inalámbrica, una de imagen y otra de datos de control, ambas trabajan a 2.4 GHz. Las pruebas se hacen en dos tipos de ambientes: interno y externo. Para la comunicación en enlaces inalámbricos es necesario tener línea de vista para conseguir un mayor alcance de datos e imagen válidos.

5.1.1.1. Prueba del canal inalámbrico de imagen

El enlace de la transmisión de imagen realizado a corta distancia es satisfactorio y se puede visualizar una imagen clara y no presenta ningún tipo de interferencia, para medir el factor alcance y calidad de imagen se procede a variar la distancia de separación entre la estación de control y la estación móvil. En las pruebas de alcance se evalúa la imagen que se mira en el computador de la estación de control con las siguientes características:

- Imagen a color
- Visualización en tiempo real
- Claridad, es decir, sin distorsión o deformación, ejemplo rayas o parpadeo

Las pruebas cuando solo funciona el subsistema de transmisión de imagen arrojan los siguientes resultados:

Tabla 5.1 Resultados del alcance de la transmisión de imagen por radiofrecuencia

| 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 |

5.1.1.2. Prueba de enlace inalámbrico de comandos de control

De manera similar, se toma el alcance de la transmisión de los comandos de control a través de los módulos XBeePRO serie 1. La consideración para llevar a cabo esta prueba es 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 5.2 Tabulación del alcance de la transmisión de datos por XBee

| Distancia [m] | Ambiente Interno | Ambiente Externo |
|---------------|------------------|------------------|
| 10 | Satisface | Satisface |
| 15 | Satisface | Satisface |
| >20 | No Satisface | Satisface |
| >130 | No Satisface | No Satisface |

5.1.1.3. Prueba de enlace inalámbrico simultáneo: imagen y datos de control

Las pruebas de los enlaces de datos inalámbricos se finalizan tomando el alcance cuando funcionan todos los controles del sistema desarrollado:

Tabla 5.3 Tabulación del alcance de los enlaces inalámbricos

| Distancia [m] | Ambiente Interno | Ambiente Externo |
|---------------|------------------|------------------|
| 10 | Satisface | Satisface |
| 15 | Satisface | Satisface |
| >15 | No Satisface | Satisface |
| >40 | No Satisface | No Satisface |

Ambiente interno (indoor): Para medir la correcta recepción y transmisión de datos tanto en la estación fija como en la remota se mide el tiempo de recepción de un paquete de datos de 900 bytes mientras se prueban los controles del robot trasladándolo por un ambiente conocido. Los datos en el tiempo, conforme se va variando la distancia se almacenan y grafican.

Sabiendo que el IMU envía 900 bytes por segundo se tiene una recepción perfecta si se recibe el paquete completo. La transmisión se ve afectada con la distancia, por ello al alejarse el sistema móvil se miden menos datos por segundo en la estación fija, ver tabla 5.4.

Tabla 5.4 Tiempo de recepción de datos en función de la distancia, indoor

| Distancia [m] | Tiempo de recepción de 900 bytes [s] |
|---------------|--------------------------------------|
| 1 | 1.006 |
| 5 | 1.024 |
| 10 | 1.103 |
| 15 | 1.201 |
| 20 | 1.213 |
| 25 | 3.991 |
| 30 | 5.633 |

A partir de los datos medidos se concluye que la comunicación se pierde casi en su totalidad a partir de los 20 metros. Debido a que se trabaja con una trama de datos y check sum, un dato perdido afecta la consistencia de una trama de control y se la considera trama no válida.

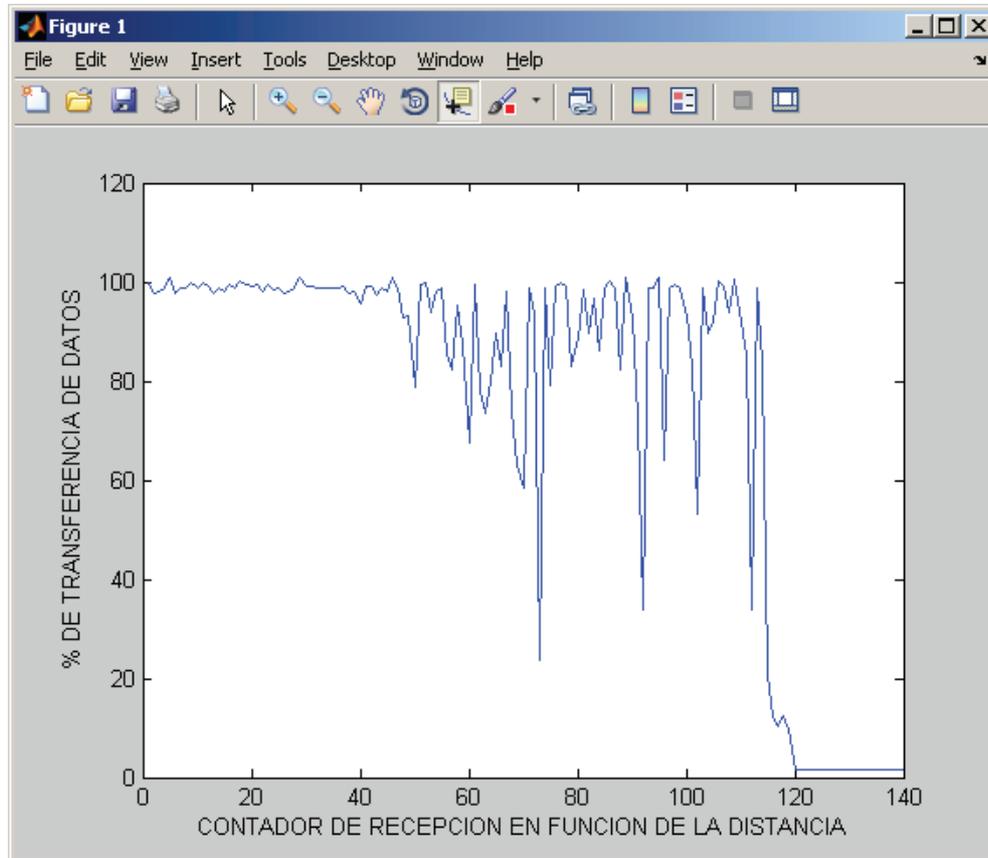


Figura 5.1 Integridad de comunicación indoor

Ambiente externo: La prueba para la transmisión de datos de control en campo abierto se realiza con el siguiente método:

- Se recibe un paquete de datos de 900 bytes para comprobar la comunicación.
- Se mide el tiempo de recepción de cada paquete, si la comunicación es correcta debe llegar un paquete de 900 bytes cada segundo.
- Se aleja el robot móvil de la estación fija para comprobar la comunicación.
- Se almacenan los datos en el tiempo a medida que va variando la distancia para analizar la comunicación.

La prueba muestra los siguientes datos:

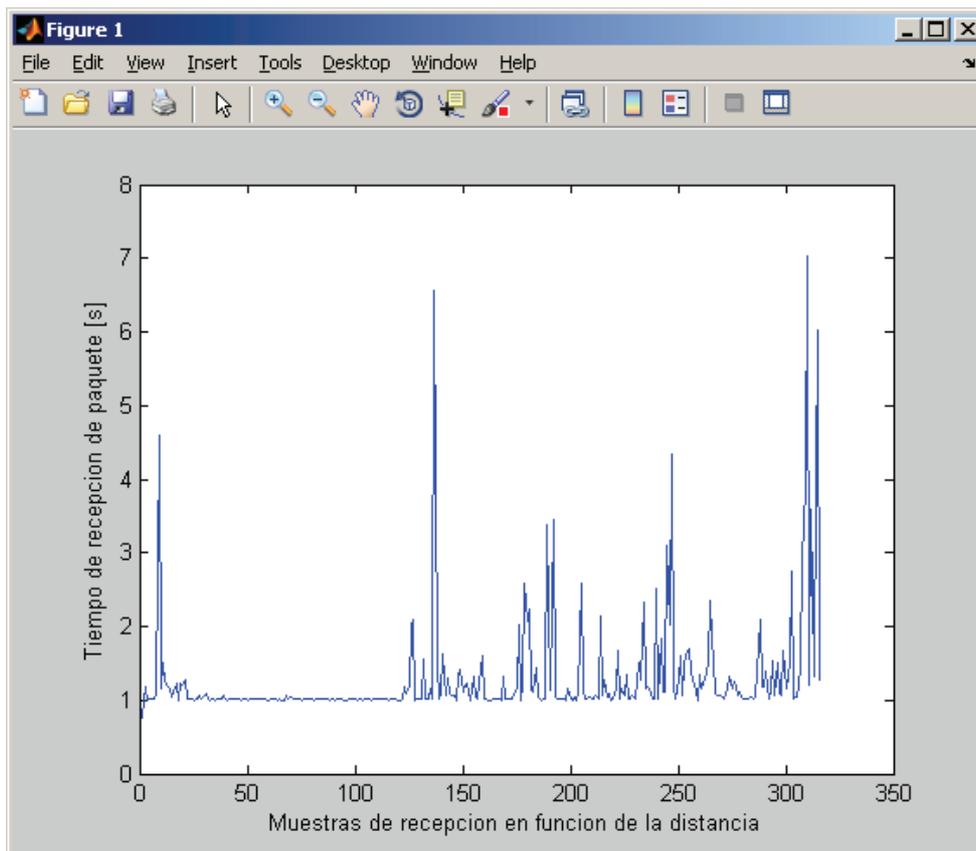


Figura 5.2 Integridad de comunicación outdoor

Se concluye que la comunicación para los módulos XBeePRO serie 1 en campo abierto se establece hasta los 130 metros. Esto no significa que sea una conexión correcta, los datos se pierden y no llegan al receptor. Una medida de esto es el tiempo de recepción de un paquete modelo, en este caso es de 900 bytes.

Tabla 5.5 Tiempo de recepción de datos en función de la distancia, outdoor

| Distancia [m] | Tiempo de recepción de 900 bytes [s] |
|---------------|--------------------------------------|
| 1 | 1.006 |
| 5 | 1.024 |
| 10 | 1.016 |
| 15 | 1.012 |
| 20 | 1.055 |
| 30 | 1.179 |
| 40 | 1.219 |

Para que exista un control correcto deben llegar tramas de control completas, esto es bytes identificadores, bytes de datos y byte de check sum. Si un byte de cada trama de control es incorrecto toda la trama es considerada errónea.

En campo abierto se concluye que el control funciona a una distancia máxima de 40 metros.

5.1.2. PRUEBAS DEL SENSOR ELECTRO-ÓPTICO

Se comprueba la adquisición inalámbrica de la imagen incrementando la distancia de separación entre la plataforma móvil y la estación fija para dos tipos de ambiente: interno y externo. Se finaliza esta experimentación con las pruebas del zoom apuntando dos objetivos diferentes.

La percepción de la imagen se realiza en tres resoluciones definidas por el conversor de vídeo analógico a USB. Las resoluciones que con las que se puede trabajar son:

- 352x240
- 352x480
- 720x480

La transmisión en cualquier resolución se realiza dentro de los alcances del enlace de radio y no está sujeto a retardos.

Ambiente interno: La adquisición de imagen en las instalaciones del laboratorio presenta los resultados de la figura 5.3. Para hacer la prueba se siguen los pasos a continuación:

- Se procede a probar el buen funcionamiento del sistema a corta distancia
- Se aleja al vehículo móvil de la estación de control
- En los puntos de interés se captura la imagen del mismo objeto

La selección del objeto común que sale en las imágenes permite apreciar de mejor manera los cambios que sufre la transmisión debido a la distancia dentro de un ambiente con obstáculos para la señal, como lo son las paredes.

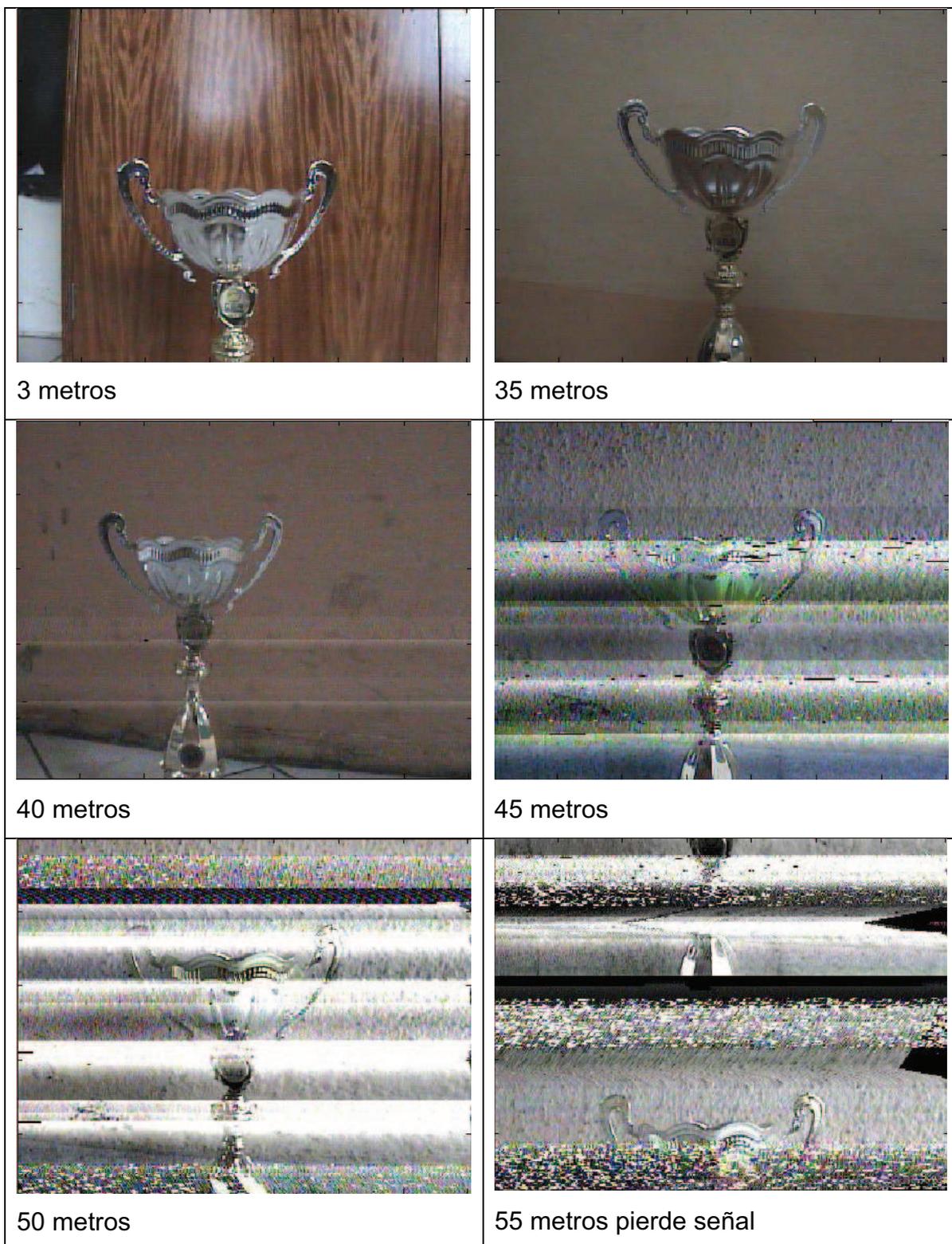


Figura 5.3 Recepción de imagen en las instalaciones del laboratorio

Ambiente externo: Las pruebas de imagen se realizan en las instalaciones del estadio de la EPN. El método que se utiliza es el siguiente:

- Se adquiere la imagen del sistema mediante el transmisor inalámbrico y el capturador de vídeo en MATLAB.
- Se aleja el robot móvil de la estación fija para ver la respuesta de la transmisión de vídeo en función de la distancia.
- Se almacena las imágenes de toda la prueba para después analizarlas.
- Se analiza las imágenes tomadas a distintas distancias y se aprecia la distorsión presentada.

Se aprecia que en campo abierto a diferencia de un ambiente interno la transmisión de vídeo tiene un alcance mayor y menor distorsión en la imagen por cuanto existe línea de vista. Aun así existen ciertos ruidos y perturbaciones que afectan a la imagen aleatoriamente.

La prueba en campo abierto da como resultado un grupo de imágenes a distintas distancias, como se muestra en la figura 5.4:

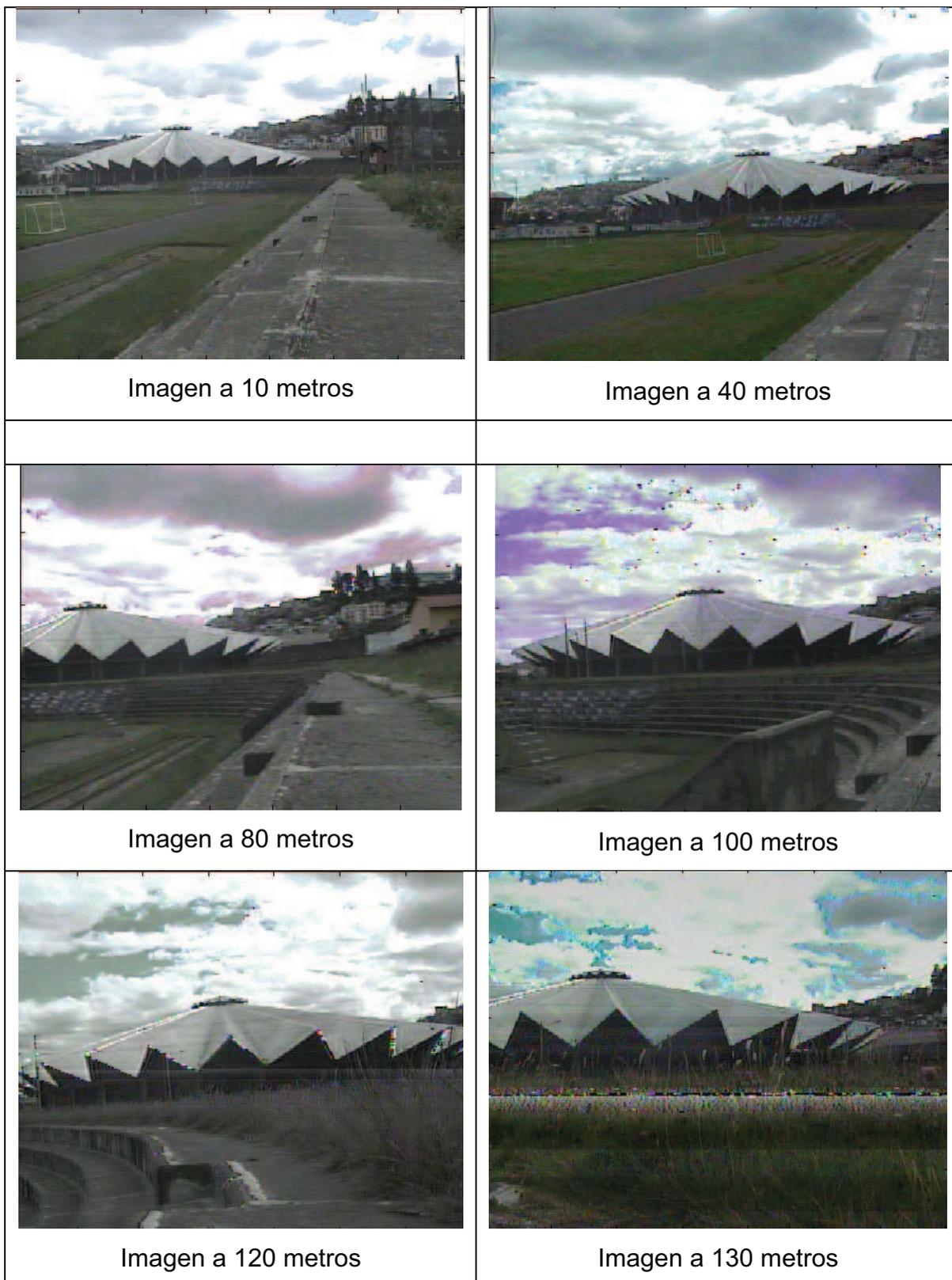


Figura 5.4 Recepción de imagen en las instalaciones del estadio

El alcance del zoom óptico de 40X de la cámara de vídeo, se cuantifica tomando una secuencia de imágenes a diferentes estados de zoom. Se adquieren las imágenes en MATLAB cambiando el zoom con el control manual y se muestran los resultados en las figuras 5.5 y 5.6.

El control del zoom se prueba a través del joystick (control manual), los porcentajes indicados son estimados de acuerdo al indicador en el LCD de la filmadora Sony.

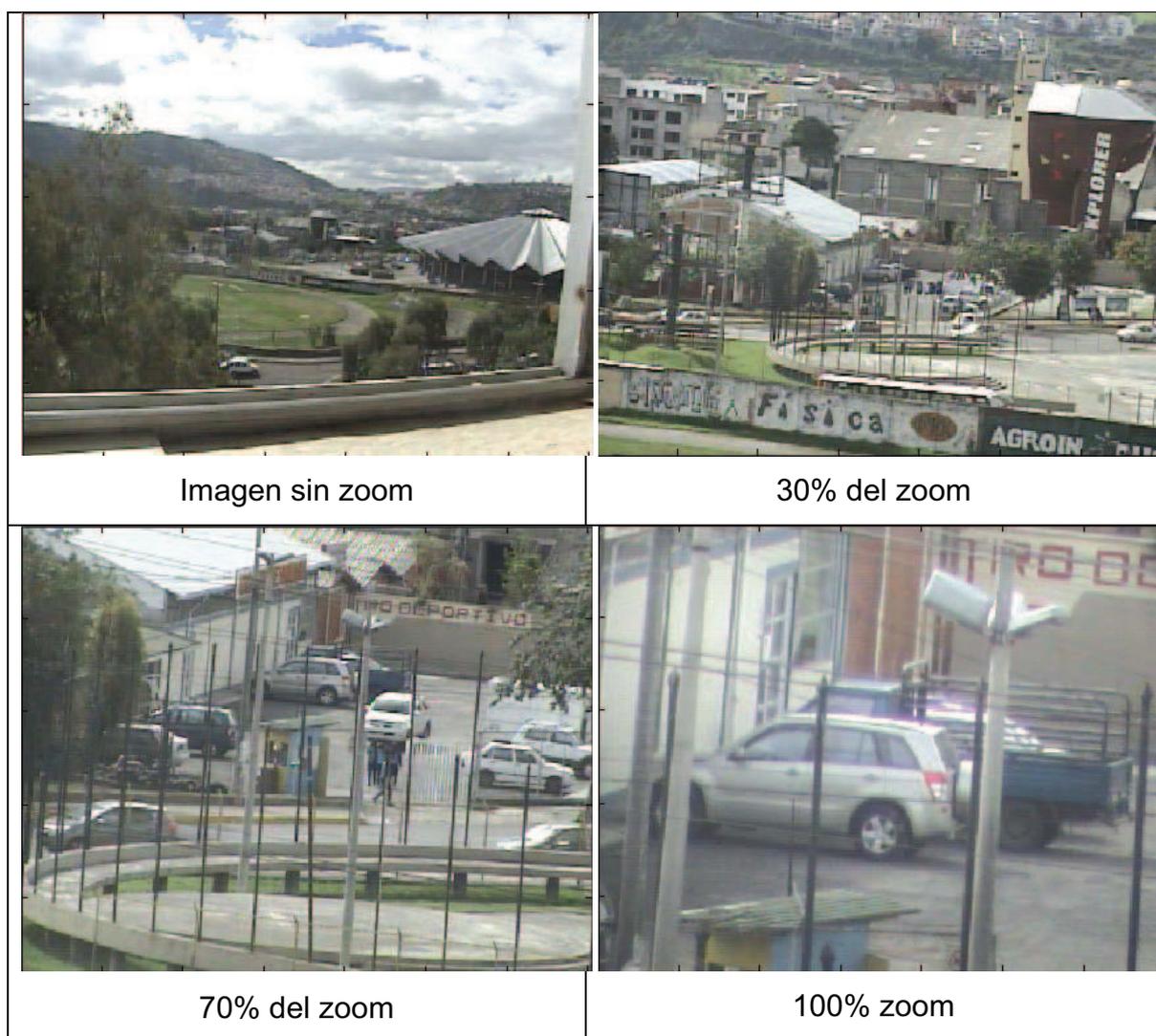


Figura 5.5 Prueba de zoom, acercamiento a un vehículo

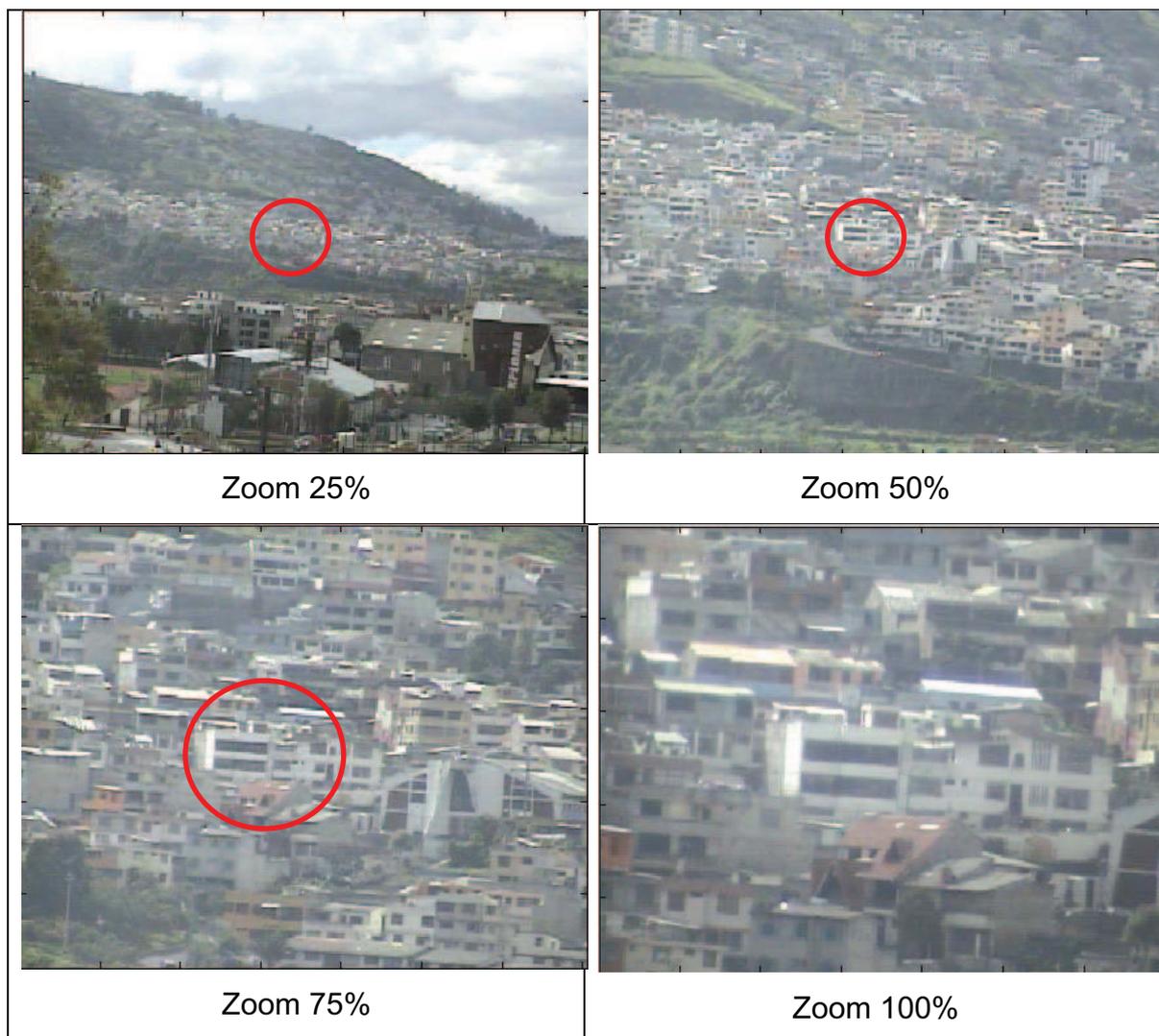


Figura 5.6 Prueba de zoom, acercamiento a una casa

5.1.3. ESTABILIZACIÓN DE IMAGEN CON IMU

Las imágenes que se muestran en la figura 5.7 son el resultado de la estabilización de imagen, la orientación del modelo de la aeronave en 3D refleja la del vehículo móvil y se puede observar que la imagen del objetivo se mantiene en la mira de la cámara de vídeo. La imagen se obtiene mediante el software del conversor a USB de vídeo analógico porque el procesamiento de imágenes desde MATLAB utiliza mucho recurso computacional impidiendo ver ambas figuras.

Se hacen las pruebas del funcionamiento de los controles para los movimientos horizontal y vertical para apuntar hacia el objetivo deseado.

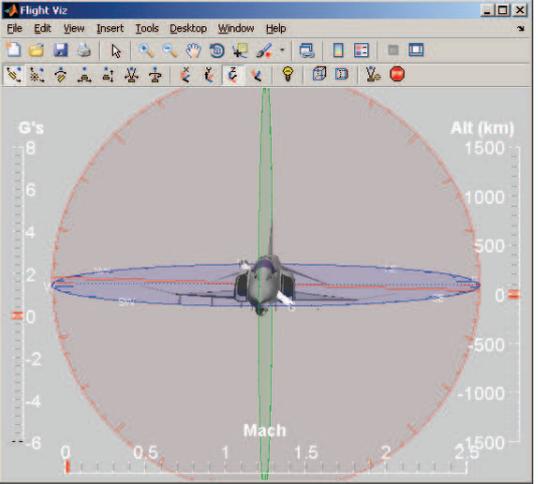
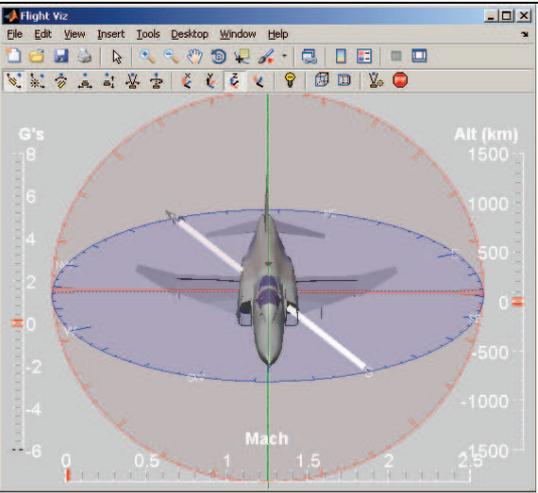
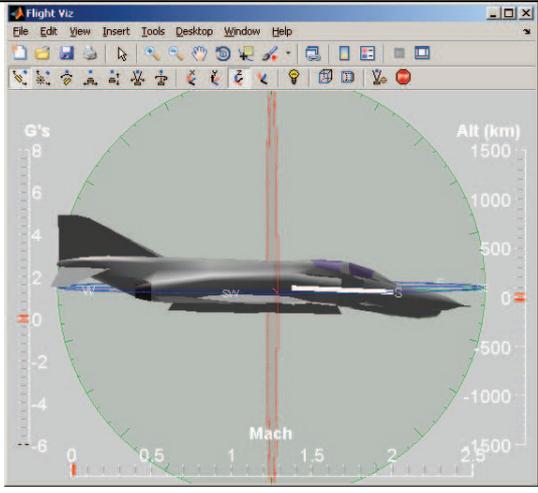
| Modelo 3D: Representación de giros | Imagen del objeto apuntado |
|---|---|
|  |  <p data-bbox="839 689 1366 725">Objeto apuntado: Coliseo Rumiñahui</p> |
| Orientación inicial | |
|  |  <p data-bbox="799 1258 1406 1352">Apuntamiento después de perturbación en ángulo pitch.</p> |
| Perturbación Pitch | |
|  |  <p data-bbox="799 1823 1366 1917">Apuntamiento después de perturbación en ángulo Yaw.</p> |
| Perturbación YAW | |

Figura 5.7 Estabilización de imagen con sensores inerciales

5.1.4. GEO-ESTABILIZACIÓN CON GPS

Las imágenes que se muestran en la figura 5.8 son el resultado del apuntamiento con GPS. El mapa muestra la ubicación geográfica del robot móvil, ubicación del objeto a apuntar y se puede observar la imagen al objetivo apuntado. Al igual que en el caso anterior, la imagen se obtiene mediante el software del conversor a USB de vídeo analógico a fin de utilizar menos recurso computacional y poder apreciar mejor la imagen.

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. Tiene un vector verde que indica la orientación del vehículo con relación al norte.

El puntero rojo es el que permite el movimiento de la cámara. El algoritmo calcula el ángulo para fijar la cámara al objeto seteado:

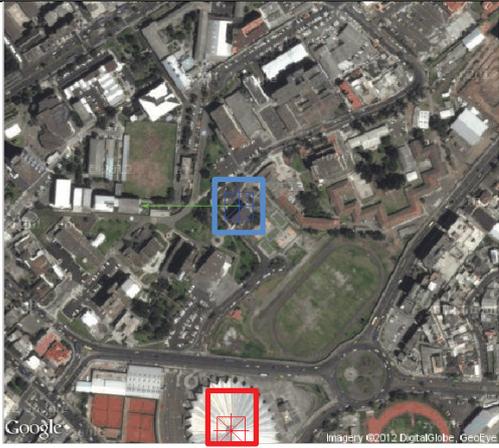
| UBICACIÓN DEL ROBOT MOVIL | IMAGEN DEL OBJETO A APUNTAR |
|--|--|
|  <p>Google Imagery ©2012, DigitalGlobe, GeoEye</p> <p>Longitud = -78.4900 ° Latitud = -0.210877 ° Altura = 2813.5 metros Yaw = 270.011 °</p> |  <p>Coliseo Rumiñahui</p> <p>Longitud = -78.4901 ° Latitud = -0.213348 ° Distancia = 275.261 metros</p> |
|  <p>Google Imagery ©2012, DigitalGlobe, GeoEye</p> <p>Longitud = -78.4899 ° Latitud = -0.210918 ° Altura = 2808.7 metros Yaw = 271.022 °</p> |  <p>Esquina del estadio en la EPN</p> <p>Longitud = -78.4897 ° Latitud = -0.212298 ° Distancia = 157.043 metros</p> |
|  <p>Google Imagery ©2012, DigitalGlobe, GeoEye</p> <p>Longitud = -78.4900 ° Latitud = -0.210917 ° Altura = 2807.5 metros Yaw = 271.527 °</p> |  <p>Universidad Simón Bolívar</p> <p>Longitud = -78.4881 ° Latitud = -0.211898 ° Distancia = 235.244 metros</p> |

Figura 5.8 Estabilización de imagen con GPS y ángulo yaw

5.1.5. SENSORES

Para comprobar el funcionamiento de los giroscopios que son los sensores fundamentales para la estabilización, interesa saber la desviación angular con la plataforma inercial inmóvil y la desviación angular con la plataforma inercial en movimiento.

En las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 se muestra el valor del ángulo de desviación con la plataforma inmóvil para cada ángulo de Euler: roll, pitch y yaw.

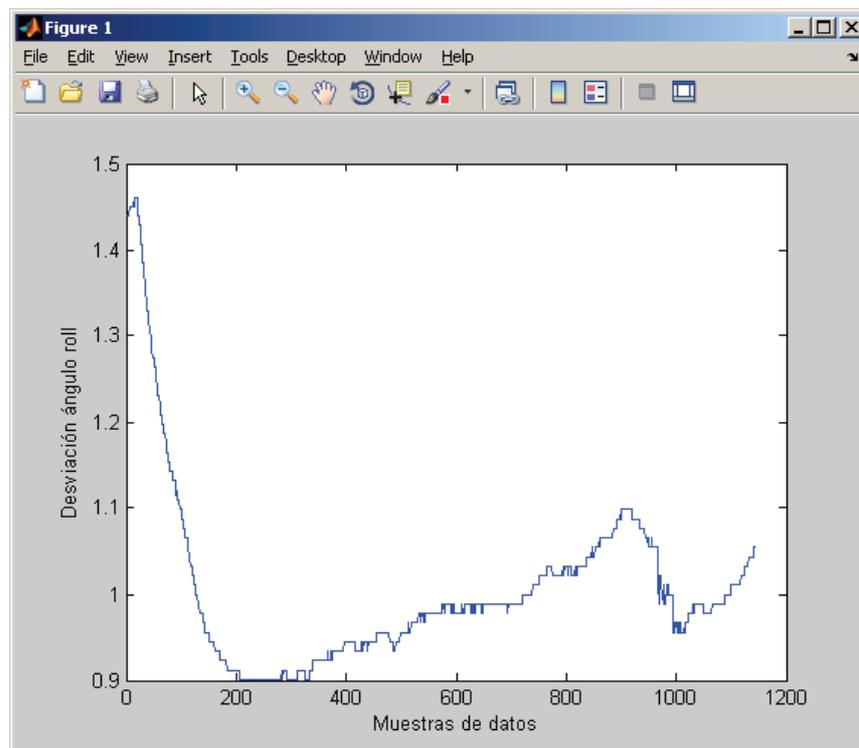


Figura 5.9 Desviación para el ángulo roll

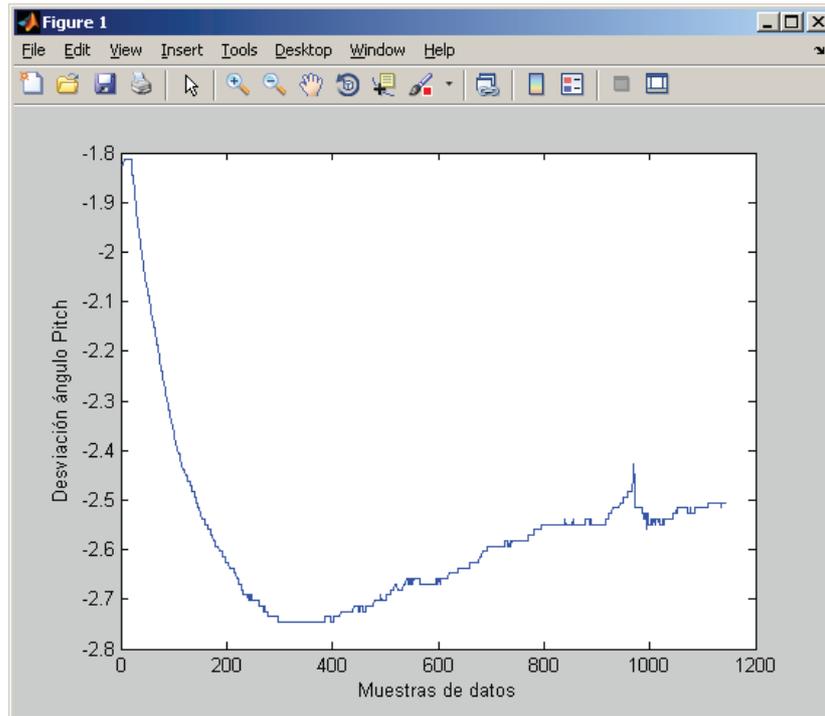


Figura 5.10 Desviación para el ángulo pitch

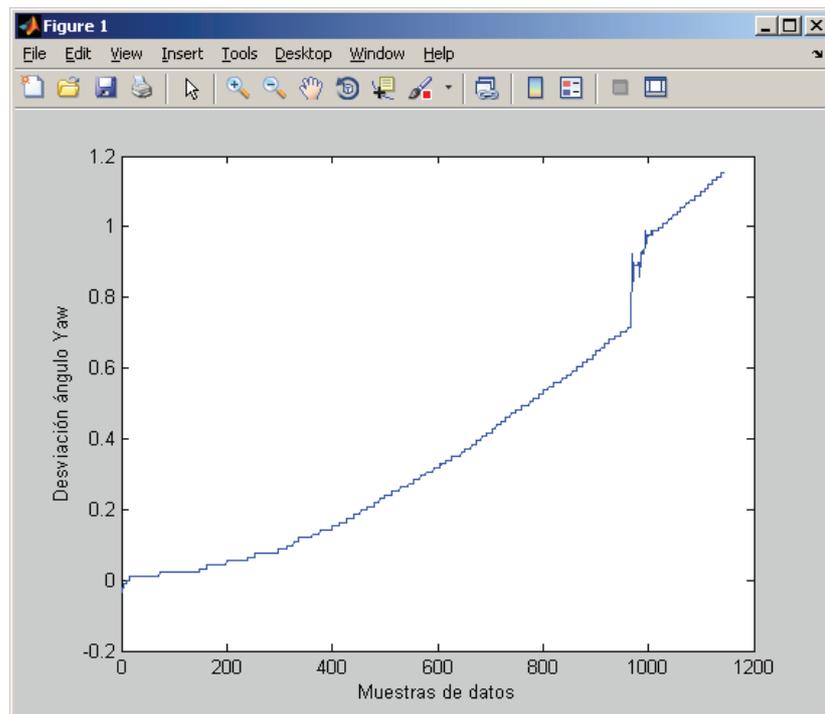


Figura 5.11 Desviación para el ángulo yaw

Se concluye que la plataforma inercial presenta una desviación angular de 1° por minuto cuando esta inmóvil.

Para la medida de la desviación con la plataforma en movimiento se sigue este procedimiento:

- Se guardan los datos del sensor en el tiempo para luego ser analizados.
- Se gira el robot móvil 360° para ver el deslizamiento en el ángulo Yaw.
- Se analiza la señal de salida y se aprecia el deslizamiento.
- El deslizamiento se aprecia como la diferencia de ángulo en la parte superior de la señal.

En la figura 5.12 se muestra el valor de ángulo de desviación con la plataforma móvil para el ángulo yaw.

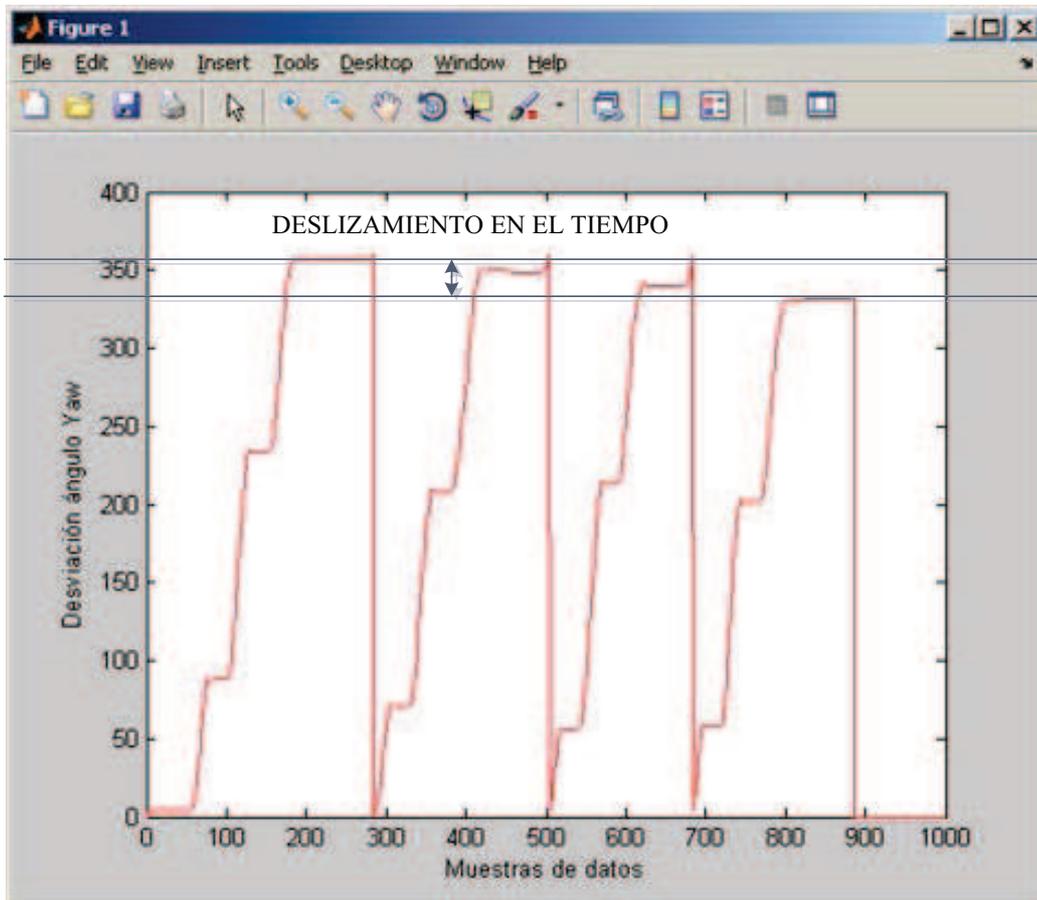


Figura 5.12 Desviación de ángulo yaw en la plataforma móvil

Se concluye que la plataforma inercial presenta una desviación angular máxima de 7° por cada 360° de giro.

5.2. EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO

Las pruebas de campo están acorde a los alcances planteados y consisten en una demostración práctica del sistema, los resultados de experimentación de esta sección se muestra el funcionamiento completo del proyecto desarrollado que cumple a cabalidad con las siguientes funciones:

- Control de la plataforma robótica móvil desde la estación fija.
- Visualización y almacenamiento de la imagen u objetivo en el computador de la estación de control.
- Apuntamiento y estabilización de imagen utilizando la plataforma inercial CHR-UM6.
- Apuntamiento y estabilización de objetivos globales utilizando el receptor GPS LS20031.



Figura 5.13 Sistema desarrollado

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo final contiene las conclusiones y recomendaciones más relevantes acerca del proyecto.

6.1. CONCLUSIONES

De acuerdo a las pruebas efectuadas y el funcionamiento actual del sistema desarrollado se concluye:

- El sistema robótico desarrollado funciona de acuerdo a los alcances del proyecto 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.
- La estabilización de la imagen con sensores inerciales es una característica del sistema que conlleva a medir la variación de la orientación angular del vehículo móvil para compensar dicha variación en el sentido contrario cumpliendo con dos propósitos, una atenuar cambios rápidos y mantener la imagen en la mira.
- La geo-estabilización es una herramienta importante ya que permite el constante apuntamiento a un objeto en tierra, esto significa que en un UAV el apuntamiento involucra compensación de giros, compensación de movimiento y se sabe la ubicación geográfica del objeto a apuntar.
- El sistema de geo-estabilización con GPS e IMU es fundamental para determinar la orientación externa de la cámara porque se puede tener información sobre posición geográfica y orientaciones durante la tarea de adquisición de imagen y exploración del medio lo que implica tener un sistema referenciado globalmente.
- La velocidad de procesamiento establecido en los microcontroladores depende de la cantidad de información a procesar, se maneja velocidades de acuerdo a la tarea que hace cada microcontrolador.

- MATLAB desempeño un excelente trabajo para la consecución del proyecto. Se explotó algunas de sus utilidades como lo son:
 - Adquisición de imagen.
 - Comunicación serial.
 - Comunicación USB.
 - Comunicación con páginas web.
 - Diseño de filtros.
 - Análisis de señales.
 - Procesamiento discreto.
 - Grafica de señales.
- El procesamiento de señales en MATLAB es una herramienta importante ya que permite realizar cambios rápidos en el diseño, implementación y visualización de filtros. Esto significa, que los cambios en la programación tienen un efecto inmediato sobre las señales de entrada.
- Los filtros pasa bajos implementados funcionan estable y rápidamente debido a que fueron diseñados a la frecuencia de trabajo de las señales y ajustados para que su respuesta sea tan pronto suceda el cambio de señal de entrada.
- El software de los microcontroladores basado en el lenguaje C de BASCOM AVR conjuntamente con el simulador PROTEUS permite la rápida programación y simulación de los algoritmos de control, además se conoce lo suficiente su manejo cuya integración permite un buen ahorro de tiempo en las pruebas del software previo a transferir el código a hardware.
- El uso de módulos XBee hace que los enlaces de transición de comandos de control se maneje de forma fácil y sencilla como cualquier comunicación serial y es un sistema de enlace seguro de datos a pesar de utilizar una banda de frecuencias libres.
- 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, utilizando el check sum de los bytes de la trama permite procesar solo aquella trama de datos que satisface la verificación y no cualquier valor aleatorio provocado por ruido u otro factor externo.

- La transmisión, visualización y almacenamiento de imagen se hace en tiempo real, esto le da al sistema una gran funcionalidad y dinamismo, cumpliendo uno de los objetivos del proyecto que es transmisión de imagen en un electro-óptico.
- La adquisición de imagen se hace mediante el toolbox de MATLAB "Image adquisición". Para que la visualización y almacenamiento de imagen se realice en tiempo real se trabaja con la resolución mínima (352 x 240 x 3) ya que la imagen se transforma en una matriz dentro de MATLAB. Estas características amplían el rango de aplicación empezando por el procesamiento de imágenes para encontrar formas y realizar tracking, hasta procesamiento e identificación de modelos para reconocimiento en imágenes hiperespectrales.
- La elaboración de las tarjetas de control cuyos componentes están ordenadamente distribuidos permiten obtener un buen comportamiento ante diferentes adversidades del entorno. La construcción de manera desmontable de los principales componentes hace factible cambiar dichos sistemas por otros modelos mejorados.
- Las baterías LiPo como fuentes de energía seleccionadas proveen un voltaje de salida estable y la suficiente corriente para el funcionamiento del sistema considerando que es una plataforma móvil y requiere energía que dure un tiempo considerable.

6.2. FUTURAS MEJORAS

Las potenciales mejoras y recomendaciones acerca del sistema desarrollado son:

- El software de estabilización con plataforma inercial programado en el sistema microcontrolado puede duplicar los ciclos de máquina manejando un lenguaje C legítimo de Atmel en lugar del lenguaje C de BASCOM AVR.
- La estabilización de imagen con sensores inerciales dependiente de la estación fija podría volverse autónoma manejando microcontroladores desde el lenguaje C y permitiría una optimización del código, además utilizará menos recurso computacional en la estación fija porque el

algoritmo de estabilización se ejecutará en el microcontrolador y el computador será utilizado para visualización de imagen y actitud del vehículo, además para la selección de parámetros iniciales.

- Los enlaces de comunicación pueden mejorar significativamente utilizando un transmisor de vídeo analógico que trabaje a una frecuencia diferente a la de los módulos XBee.
- Una limitante del procesamiento de señales digitales por computador es su velocidad que es inferior a la de un microcontrolador DSP (digital signal processing). Por lo cual en un sistema independiente los procesos de filtrado, integración, filtro de Kalman extendido deben realizarse en un microcontrolador.
- Para que el sistema electro-óptico sea aplicable en un UAV se debe reducir peso, aumentar velocidad de giro en los motores, aumentar el alcance de los enlaces de comunicación inalámbricos y finalmente incluir un sistema de amortiguación de vibraciones.

GLOSARIO

UAV: Acrónimo de Unmanned Aerial Vehicle, en español vehículo aéreo no tripulado. Es una aeronave que vuela sin tripulación humana a bordo. Son usados mayoritariamente en aplicaciones militares [36]

GPS: Acrónimo de Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global), el GPS viene utilizándose para la orientación en todo tipo de vehículos. En el caso del UAV generalmente se utiliza un GPS de tipo diferencial, con este sistema se puede conocer la posición de la aeronave (latitud, longitud y altitud) con una precisión en el orden de 3 m, y algo menos en la altura.

IMU: Acrónimo de Inertial Measurement Unit, en español unidad de medida inercial, proporciona información sobre la orientación, aceleraciones lineales y velocidades angulares en los tres ejes del espacio, a través de giróscopos, magnetómetros y acelerómetros.

Navegación: Es la actividad que permite determinar la posición, la velocidad y la orientación de un vehículo en función del tiempo con respecto a uno o varios sistemas de referencias seleccionados.

Navegación inercial: Es la navegación basada en instrumentos inerciales: giróscopos, acelerómetros y/o plataformas inerciales.

Navegación a estima (aeronáutica): La navegación aérea a estima es aquella en la que, utilizando tecnología básica (reloj y brújula), el piloto estima la posición estimación actual de la aeronave.

Pan: O movimiento panorámico, es el giro de la cámara sobre su eje de izquierda a derecha o viceversa. Movimiento horizontal de una cámara.

Tilt: O Inclinación, es el movimiento de la cámara de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo sobre su eje. Movimiento vertical de una cámara.

DoF: Degrees of Freedom, en español grados de libertad (mecánica), desplazamientos independientes y / o rotaciones que especifican la orientación del cuerpo o sistema [37].

ICM: Aplicaciones industriales, científicas y médicas (de la energía radioeléctrica). Aplicación de equipos o de instalaciones destinados a producir y utilizar en un espacio reducido energía radioeléctrica con fines industriales, científicos, médicos, domésticos o similares, con exclusión de todas las aplicaciones de telecomunicación [14].

Receptor AV: Los receptores AV o receptores de audio y vídeo son uno de muchos de los componentes electrónicos de consumo que se encuentran típicamente en un sistema de cine en casa. Su propósito principal es amplificar el sonido de una multitud de posibles fuentes de audio, así como señales de ruta de vídeo a su TV a partir de diversas fuentes [38].

Telémetro: Dispositivo capaz de medir distancias de forma remota. Existen diversos tipos que incluyen: telémetros ópticos, sónicos, y láser [39].

Centro de gravedad: El centro de gravedad es el punto en un cuerpo alrededor del cual el momento de torsión resultante debido a las fuerzas de gravedad se hace nula. Cerca de la superficie de la tierra, donde la gravedad actúa hacia abajo como un campo de fuerza paralela, el centro de gravedad y el centro de masa son los mismos. En relación al estudio de la dinámica de las aeronaves, vehículos y embarcaciones asume que el sistema se mueve cercano a la Tierra la gravedad, y por lo tanto el centro términos de gravedad y el centro de masa se utilizan indistintamente [40].

Declinación magnética: Es el ángulo entre la brújula hacia el norte (la aguja apunta hacia el extremo norte de una brújula) y el norte verdadero o la dirección a lo largo de la superficie de la Tierra hacia el polo norte geográfico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] 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.

[2] Airforce technology; **Electro-Optical and Precision Motion Control Systems**.
<http://www.airforce-technology.com/contractors/surveillance/controp/controp4.html>

[3] Pozo D.; **Diseño y Construcción de una Plataforma Didáctica para medir Ángulos de Inclinación usando Sensores Inerciales como Acelerómetro y Giroscopio**; Proyecto de Titulación (Ingeniería en Electrónica y Control); Escuela Politécnica Nacional; Quito, Ecuador; 2010.

[4] Wikipedia; **Ángulos de Navegación**.
http://es.wikipedia.org/wiki/Ángulos_de_navegación.

[5] Manual de Vuelo; **Principios Básicos**.
<http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV15.html>

[6] Merino L., Caballero F., Martínez de Dios J.R., Ferruz J., Ollero A.; **A Cooperative Perception System for Multiple UAVS: Application to Automatic Detection of Forest Fires**; Journal of Field Robotics; vol. 23; no. 3; pp. 165-184; España; 2005.
<http://www.upo.es/isa/lmercab/papers/JFRpreprintPublished.pdf>

[7] Ho-Pyeong L., Inn-Eark Y.; **Robust Control Design for a Two-Axis Gimbaled Stabilization System**; Agency for Defense Development; Korea; 2008.
http://www.regional-robotics.org/lab_info/Paper/Journal/Robust%20Control%20Design%20for%20a%20Two-axis%20Gimbaled%20Stabilization%20System.pdf

[8] Amr A., Chengzhi S., Hany F., Yu Zheng L.; Tongyu W.; **Design a Robust PI Controller for Line of Sight Stabilization System**; International Journal of Modern Engineering Research (IJMER); College of Mechanical and Electric Engineering; Changchun University of Science and Technology; Beijing, China; 2012.

http://www.ijmer.com/papers/vol2_issue2/Y022144148.pdf

[9] Thingiverse; **Pan & Tilt Servo**.

<http://www.thingiverse.com/thing:2831>

[10] Vélez M.; **Control de Sistemas de Aeronaves no Tripuladas (UAS)**; Ingeniería Matemática-Ingeniería Física; Maestría en Matemáticas Aplicadas; Medellín; 2009.

[11] Betanzos E.; **Sistemas de Transmisión Inalámbrica de Vídeo y Comandos para Controlar un Móvil**; Tesis profesional (Ingeniería Electrónica); México; 2002.

http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/7484.pdf

[12] Wikipedia; **Bandas de Frecuencia**.

http://es.wikipedia.org/wiki/Bandas_de_frecuencia

[13] Wikipedia; **Radiofrecuencia**.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Radiofrecuencia>

[14] CONATEL, SENATAL; **Plan Nacional de Frecuencias**; Dirección General de Gestión del Espectro Radioeléctrico; Quito, Ecuador; 2012.

[15] Fmuser; **100W digital DSP-FM Transmisor de Radio Profesional Regulable 1W-100W**.

<http://es.fmuser.org/high-power-fm-transmitter/100W-Digital-DSP-FM-Professional-Radio-Transmitter-adjustable-1w100w.html>

[16] Rivas M.; **Unidad de Medida Inercial Algoritmo de Estimación e Implementación Software**; Universidad de Sevilla; Sevilla, España; 2006.

[17] Mohinder S., Grewal L., R. Weill A.; **Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration**; First Edition; John Wiley & Sons, Inc.; New York, USA; 2001.

[18] Simon D.; **Optimal State Estimation**; Wiley; Hoboken, NJ, USA; 2006.

[19] CHRobotics; **UM6 Orientation Sensor**

<http://www.chrobotics.com/shop/orientation-sensor-um6>

[20] Mesías R., Romero L.; **Construcción y Automatización de un Sistema de Apuntamiento de Antenas para Radioenlace Móvil Punto-Punto destinado para el Proyecto “Plataforma de Gran Altitud” de Fuerza Aérea Ecuatoriana (F.A.E)**; Proyecto de titulación (Ingeniería en Electrónica y Control); Escuela Politécnica Nacional; Quito, Ecuador; 2011.

[21] Enríquez C.; **Integración de los Sistemas de Información Geográfica y del Sistema de Posicionamiento Global**; Dpto. de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría; Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén; Granada, España; 2006.

[22] Sparkfun; **66 Channel LS20031 GPS 5Hz Receiver**.

<https://www.sparkfun.com/products/8975>

[23] Wikipedia; **Global Navigation Satellite System**.

http://es.wikipedia.org/wiki/Global_Navigation_Satellite_System

[24] Servocity; **PT785-S Pan & Tilt System.**

http://www.servocity.com/html/pt785-s_pan___tilt_system.html

[25] Gómez J.; **Robótica Móvil. Estudio y Caracterización del Robot Móvil Kjunior Desarrollo de Aplicación de Robot Laberinto**; Proyecto de titulación (Ingeniería en Electrónica Industrial); Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena; Cartagena, España; 2011.

[26] ZigBee; **Protocolo ZigBee.**

<http://www.zigbee.org>

[27] XBee; **Módulo XBee.**

<http://www.xbee.cl>

[28] Wikipedia; **Modulación por Ancho de Pulso.**

http://es.wikipedia.org/wiki/Modulación_por_ancho_de_pulsos

[29] Servocity; **How do servos work?.**

http://www.servocity.com/html/how_do_servos_work_.html

[30] Robotplatform; **Servo Control tutorial.**

http://www.robotplatform.com/knowledge/servo/servo_control_tutorial.html

[31] Flightpower; **LiPo EON-X™ 30.**

<http://www.flightpowerusa.com/eonx-30-index.html>

[32] Wikipedia; **Batería (electricidad).**

[http://es.wikipedia.org/wiki/Batería_\(electricidad\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Batería_(electricidad))

[33] Google; **Imagen descargada mediante Google Maps Api.**

<https://developers.google.com/maps/>

[34] MAVinci; **Unmanned Aerial Systems**.

http://www.mavinci.eu/download/MAVinci_SIRIUS.pdf

[35] Brown G.; **Flight Visualization**; MathWorks; 2008

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18363-flight-visualization/content/flightviz.m>

[36] Wikipedia; **Unmanned Aerial Vehicle**.

http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle

[37] Wikipedia; **Degrees of Freedom**.

http://en.wikipedia.org/wiki/Degrees_of_freedom

[38] Wikipedia; **AV Receiver**.

http://en.wikipedia.org/wiki/AV_receiver

[39] Wikipedia; **Telémetro**.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Telémetro>

[40] Wikipedia; **Center of Gravity**.

http://en.wikipedia.org/wiki/Center_of_gravity