

Evaluación del rendimiento del sistema de posicionamiento global (GPS) e INS/GPS sobre una trayectoria establecida

Evaluation of the performance of the Global Positioning System (GPS) and INS / GPS on an established trajectory

¹Carmen Bastidas, ²Marco Lema, ³Freddy Chávez, ⁴Fausto Cabrera, ⁵Diego Ñacato

Facultad de Informática y Electrónica
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

carmen.eba.13@gmail.com, marco.lema96@gmail.com,
freddy.chavez@esepoch.edu.ec, fausto.cabrera@esepoch.edu.ec, diego.nacato@esepoch.edu.ec

^{1,2}Investigador Independiente

^{3,4,5}Grupo de investigación en Tecnologías de la Electrónica y Automatización, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Resumen.- El análisis de la precisión del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) frente al sistema de posicionamiento híbrido entre GPS y el Sistema de Navegación Inercial (INS) permite determinar cual de ellos ofrece mayor exactitud en el seguimiento de una trayectoria establecida ejecutada por un vehículo autónomo terrestre diseñado e implementado el cual consiste en incorporar al vehículo un Módulo GPS, sensores inerciales y la tarjeta controladora Pixhawk que usa el filtro de Kalman como método de acoplamiento entre las arquitecturas GPS e INS, además de un sistema de telemetría para la transmisión de datos y una decodificadora para el mando a distancia. Los escenarios de pruebas consisten de dos trayectorias ejecutadas a las 12:00 y 20:00 debido a las condiciones atmosféricas presentes en distintas horas del día. Se confirma que el sistema GPS/INS tuvo una precisión mayor al GPS de hasta un 73.6% en promedio de los dos escenarios durante el día, mientras que en la noche incrementa la precisión de hasta 17.5%, lo que significa que el sistema implementado tiene como función la corrección de errores producidos debido a la ionización de la ionosfera siendo el principal factor de atenuación de la señal de GPS en el canal de comunicación.

Palabras Clave- Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Sistema de Navegación, Sistema Inercial, Vehículo Autónomo, Pixhawk (Hardware), Precisión.

Abstract- The analysis of the accuracy of the Global Positioning System (GPS) versus an hybrid positioning system GPS and Inertial of Navigation. System (INS) allows determining which them offers greater accuracy in following an established path a GPS Module, inertial sensors and the Pixhawk controller card uses Kalman filter as a coupling method between GPS and INS, a telemetry system for data transmission and a decoder for the remote control. The test scenarios consist of two paths executed at 12:00 and 20:00 due to the atmospheric conditions present at different times of the day.

It is confirmed that the GPS / INS system had an accuracy greater than GPS up to 73.6% on average of the two scenarios during the which day, while at night it increases the precision of up to 17.5%, function meansthe that the implemented system has as a correction produced due to ionization of the ionosphere, being the main attenuation factor of the GPS signal in the communication channel.

Keywords- Global Positioning System (GPS), Navigation System, Inertial System, Autonomous Vehicle, Pixhawk, Track Accuracy.

I. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global, el primer sistema operativo y el más conocido es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [1] Los vehículos autónomos típicamente dependen de este sistema para proveer información de posición y velocidad para la navegación, aunque el GPS por sí solo no es capaz de proporcionar información exacta y continua sobre la posición, ya que es un sistema que depende completamente de la disponibilidad de las señales en ambientes outdoor [2]. El Sistema de Navegación Inercial (INS), proporciona información para la navegación con frecuencias de muestreo más altas proporcionando información de velocidad y posición angular [3], basado en la unidad de medida inercial (Inertial Measurement Unit – IMU), la cual se conforma por sensores como giroscopio, acelerómetro y magnetómetro.

El acoplamiento de ambos sistemas a través de arquitecturas de acoplamiento ofrece una mayor precisión de la posición, velocidad y altitud en diferentes períodos de tiempo [4]. El sistema GPS evita el aumento exponencial del error introducido por Ω los sistemas inerciales debido al

proceso de integración, mientras que el INS ofrece posiciones de gran precisión [5] y actúa como método principal de posicionamiento en los momentos en que GPS no está disponible. Ante estas ventajas se propone implementar un sistema de posicionamiento basado en la integración de los sistemas GPS e INS, con el objetivo de evaluar la precisión alcanzada por los dos sistemas sobre una trayectoria de referencia.

II. METODOLOGÍA

El objetivo del sistema a implementar es brindar a un vehículo autónomo terrestre capacidad de traslado por una trayectoria establecida o de referencia. Para ellos se plantea un escenario conformada por a) trayectoria de referencia, b) prototipo de vehículo terrestre, c) software de piloto automático integrado, d) sensores inerciales, e) sistema de comunicación por telemetría, f) tarjeta de control centralizada *pixhawk*, g) Antena de GPS y h) estación base de mando y monitoreo como se muestra en la Fig. 1. respectivamente.



Fig. 1. Arquitectura del Sistema de Posicionamiento GPS/INS

A. Vehículo Terrestre

El recorrido por la trayectoria de referencia se ejecuta con dispositivo mecánico móvil que sea capaz de transportar un objeto de forma autónoma, para esto se diseña carro de locomoción diferencial, que consiste en dos ruedas principales que dan la tracción y cada una se controla de forma independiente. Además, se establece los materiales y requerimientos para el ensamblaje del carro:

- **Chasis y Rueda Loca:** El chasis es la placa de base de acrílico en donde se sostiene el vehículo, adicionalmente se necesita una rueda giratoria o una ballcaster, que será el tercer punto de apoyo junto a las ruedas principales.
- **Motor DC Tipo T:** Motor reductor Tipo T de doble eje, voltaje de operación desde 3V hasta 9 V, RPM entre 90 y 300 RPM y caja reductora plástica.
- **Batería:** Batería Lipo 2s 7,4V 22000, batería diseñadas para vehículos a control remoto.
- **Puente H:** El puente H es el que nos permite invertir el giro de un motor, necesitamos un puente H que tenga dos canales para poder controlar dos motores.

B. Controladora Pixhawk

Pixhawk es un proyecto de *hardware* libre creado con el objetivo de proveer un estándar para diseños de piloto automático de alta calidad [6], se encuentra orientado a comunidades académicas, de entretenimiento e industriales a bajo costo.

Para el sistema se ha escogido el controlador de vuelo *Pixhawk* V2.4.8, integra un procesador de alto rendimiento 32-bit ARM CortexM4, tecnología de sensor de ST Microelectronics. Además, cuenta con una IMU (Inertial Measurement Unit) que posee un

giroscopio ST Micro L3GD20H de 16 bit y un acelerómetro/magnetómetro ST Micro LSM303D, también posee un acelerómetro/giroscopio de 3 ejes cada uno MPU 6000 y un módulo sensor de presión MEAS MS5611 que incluye un elemento medidor de presión lineal y un convertidor A/D de 24 bit

Para la recepción de la señal de GPS se utiliza el Módulo NEO - M8N es un dispositivo de alta precisión y bajo consumo de potencia, el límite de precisión es de 0,6 metros y la prueba más práctica en 0,9 metros más o menos, incorpora la brújula digital HMC5883L y soporta GPS / QZSS L1 C / A, GLONASS L10F y BeiDou.

C. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección [7]. En esencia este algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente.

El algoritmo que se encuentra implementado en la controladora es el Filtro Kalman Extendido (EKF). A continuación, se muestra las variables principales:

- $x_k^{(-)}$ y $x_k^{(+)}$ Estado estimado a “priori” y “posteriori”
- z_k Medición estimada
- P_k Matriz de covarianza del error estimado
- Q_k y R_k Matrices de acoplamiento del ruido y el sensor
- K_k Matriz de Ganancia de Kalman

y las ecuaciones que intervienen en el algoritmo [8]:

Modelo Dinámico no Lineal

$$x_k = \xi_{k-1}(x_{k-1}) + w_k \quad w_k \sim \mathcal{N}(0, Q_k) \quad (1)$$

Modelo de Medición no Lineal

$$z_k = H_k(x_k) + v_k \quad v_k \sim \mathcal{N}(0, R_k) \quad (2)$$

Etapas de predicción

Predicción a “priori” $(-)$ de x_k

$$x_k^{(-)} = \Phi_{k-1} x_{k-1}^{(+)} \quad (3)$$

Predicción a “priori” $(-)$ de P_k

$$P_k^{(-)} = \Phi_{k-1} P_{k-1}^{(+)} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (4)$$

Etapas de corrección

Linealización de la medicine

$$z_k = H_k x_k^{(-)} \quad (5)$$

Ganancia de Kalman

$$K_k = P^{(-)}_k H_k^t [H_k P^{(-)}_k H_k^t + R_k] \quad (6)$$

Obtención a "posteriori" (+) de x_k

$$x^{(+)}_k = x^{(-)}_k + K_k [z_k - H_k x^{(-)}_k] \quad (7)$$

Obtención a "posteriori" (+) de P_k

$$P^{(+)}_k = [I - K_k H_k] P^{(-)}_k \quad (8)$$

D. Sistema de Comunicación

Se establece un sistema de telemetría de radio 3DR configurada con una comunicación inalámbrica half-duplex, con tasa de transmisión de 250 kbps, multiplexación por división de tiempo adaptativa (TDM), usa FHSS como técnica de modulación y posee un código de corrección de errores incorporado, razones por la cual es ideal para la implementación del sistema.

Además, el sistema cuenta con antenas omnidireccionales que radían uniformemente en todas las direcciones y posee las siguientes especificaciones:

- Potencia de 500mw
- Frecuencia 915 MHZ
- Sensibilidad del receptor a -121dBm (100mW).
- Cobertura de 1,6km.
- Firmware de código abierto.

Para verificar la funcionalidad del sistema se requiere el uso de un computador, tableta o celular como estación base en donde se pueda instalar un programa de estación terrena. *Mission Planner* es un *software* de configuración, simulación y control de la plataforma *Ardupilot* [9], este programa es utilizado para el control dinámico de vehículos autónomos.



Fig. 2. Ventana de inicio de Mission Planner

En el planificador de misiones como muestra la Fig. 2., se observa la pantalla principal de vuelo, que visualiza gran cantidad de datos como el estado de la señal GPS, calidad del enlace de conexión por telemetría, velocidad del aire, dirección de rumbo, entre otros. Además de un mapa del terreno de tal forma que se pueda monitorear en tiempo real la navegación del vehículo.

E. Implementación

Se establece el diagrama de conexión de todos los dispositivos que van incorporados al sistema (Ver Fig. 3). El

Módulo NEO - M8N se conecta al puerto GPS y al puerto 12C para activar la función del magnetómetro. El zumbador y el botón del interruptor de seguridad son obligatorios para *Pixhawk*, así que los conectamos a los puertos *BUZZER* y *SWITCH* respectivamente. Se coloca la antena transmisora del sistema de comunicación en el puerto *TELEM 1* que corresponde al periférico de radio telemetría. Seguido, se conecta la *Pixhawk* desde las salidas principales 1 y 3, hacia el Puente H que es el motor drive del carro y colocamos el receptor del radio control sobre la salida RC. Por último, le damos energía al sistema conectando la batería al puerto *POWER*.

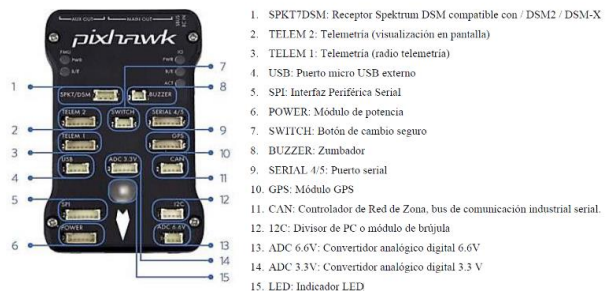


Fig. 3. Diagrama de conexión del Sistema

Ya instalado el *Mission Planner* en el computador y realizado todas las conexiones detalladas anteriormente, en la Fig. 4., observamos el sistema ya implementado.



Fig. 4. Sistema Implementado

F. Configuración Pixhawk vs Mission Planner

Mission Planner proporciona una manera simple y gráfica de configurar la navegación de vehículos, basadas en el protocolo MAVLINK. Para configurar la controladora primero desplegamos el menú del puerto COM que se encuentra en la esquina superior derecha de la pantalla. Se selecciona el puerto COM3 (puerto por defecto) y la velocidad en baudios a 57600 baudios, como muestra la Fig. 5.

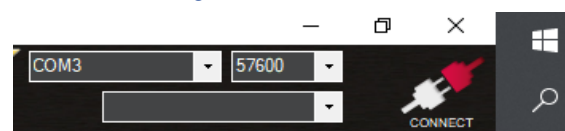


Fig. 5. Selección puerto y velocidad

Sobre la configuración inicial del planificador de misiones aparece la opción *Install firmware* (Ver Fig. 6), el gestor de arranque acepta solicitudes para cargar uno nuevo.

También en la misma ventana se muestra las opciones de vehículos a configurar entonces seleccionamos “Rover 4.0.0 OFFICIAL”. Como muestra la Fig. 7. Luego probamos que la instalación se realizó correctamente dirigiéndonos a la pantalla de Datos de vuelo de *Mission Planner* y presionando el botón *Conectar*.

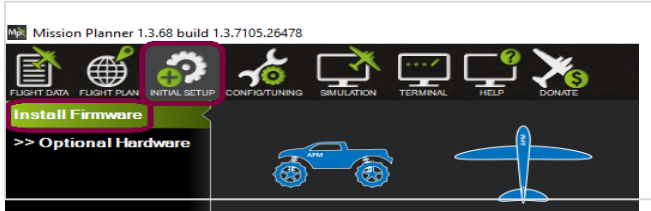


Fig. 6. Configuración del Firmware

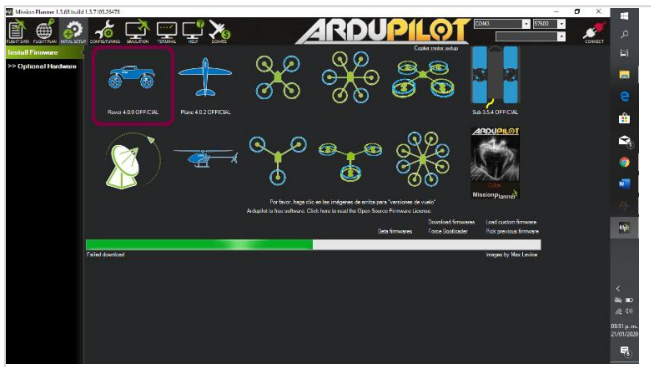


Fig. 7. Selección del vehículo

Al conectar el sistema se observa la pantalla de navegación con datos de la posición actual de vehículo (Ver Fig. 8)



Fig. 8. Selección de la configuración Rover.

En la ventana de configuraciones generales podemos modificar los parámetros de la *Pixhawk*

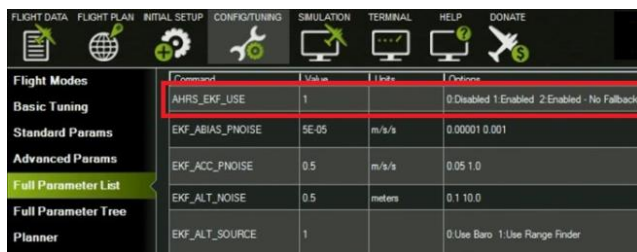


Fig. 9. Configuración del filtro de Kalman

Para activar el filtro de kalman (Ver Fig. 9). Se selecciona la opción *0.Disabled, 2:Enable EKF2* y *3:Enable EKF3*. Así se habilita el algoritmo EKF (Extended Kalman Filter). Es importante no configurar este parámetro a menos que la calibración de aceleración y brújula estén realizadas, de lo

contrario, puede producirse una ruta de vuelo errática debido a datos incorrectos del *sensor.AHRS_EKF_USE = 1*.

Para configurar los parámetros mencionados dirigirse al menú de la izquierda y seleccionamos las opciones *Accel Calibration* y *Compass*, confirmamos que las casillas se encuentren activadas, no es necesario alterar ningún otro parámetro.

La configuración de la dirección diferencial se realiza estableciendo los parámetros:

SERVO1_FUNCTION en 73 el motor gira a la izquierda
SERVO3_FUNCTION en 74 el motor gira a la derecha

Y se activa las dos funciones que se muestran en la Fig. 10., activando así los motores.



Fig. 10. Configuración servo motores

Por último, para configurar la antena GPS se realiza recorridos completos de la trayectoria en todos los sentidos, obteniendo así los registros de datos que se almacenan en la memoria de *flash* de datos a bordo del piloto automático. De esta forma se establece una trayectoria de referencia. (Ver Fig. 11).



Fig. 11. Trayectoria de Referencia en el Mission Planner

III. RESULTADOS

Se considera dos escenarios para la ejecución de pruebas, primero utilizando únicamente el sistema GPS y luego GPS /INS integrado, para poder contrastar las diferencias y precisión de cada sistema.

Para cada escenario se realizó cuatro pruebas con respecto a dos variables:

- Hora del día: 12:00 y 20:00,
- Sistema de navegación: GPS y GPS/INS.

En la Tabla I se resume las características en las que se efectuó cada prueba.

Tabla I
CONDICIONES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS PARA LOS DOS

	GPS	ESCENARIO INS.	DIA	HORA
PRUEBA 1	Activado	Desactivado	18 de diciembre	12:00
PRUEBA 2	Activado	Activado	19 de diciembre	12:00
PRUEBA 3	Activado	Desactivado	18 de diciembre	20:00
PRUEBA 4	Activado	Activado	19 de diciembre	20:00

A. Primer Escenario

Se estableció en el parque “Sesquicentenario” ubicado en la provincia de Chimborazo, ciudad de Riobamba, se encuentra rodeada de vegetación densa compuesta principalmente por árboles de entre 2 y 2.5 m de altura, en sus alrededores no se encuentran edificaciones de gran altura que puedan provocar interferencia por multicamino sobre la señal GPS.

En la Fig. 12., observamos los puntos de la trayectoria que ha recorrido el vehículo de forma autónoma, la frecuencia de muestreo que presenta el sistema es una muestra por segundo y la información obtenida de la navegación se almacena en la memoria de la tarjeta controladora.



Fig.12. Vista aérea de la trayectoria de referencia en el parque “Sesquicentenario”

Con datos de posición obtenidos de la navegación en las pruebas 1 y 2, realizamos la gráfica de las trayectorias y la comparamos con la trayectoria de referencia.

En la Fig. 13., se observa que la trayectoria ejecutada por el vehículo con el GPS difiere notablemente de la trayectoria de referencia, esto debido a que las pruebas se realizaron en la hora en que la radiación solar incrementando la cantidad de TEC en la ionosfera lo que refleja la señal de GPS provocando su degradación. La trayectoria efectuada por la integración del GPS/INS se asemeja a la de referencia.

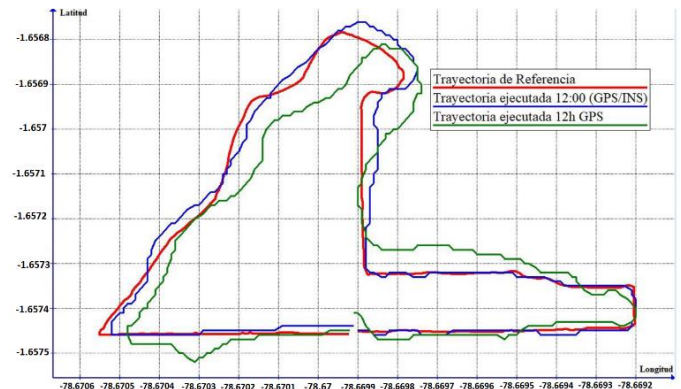


Fig. 13. Trayectorias de pruebas 1 y 2 vs trayectoria de referencia.

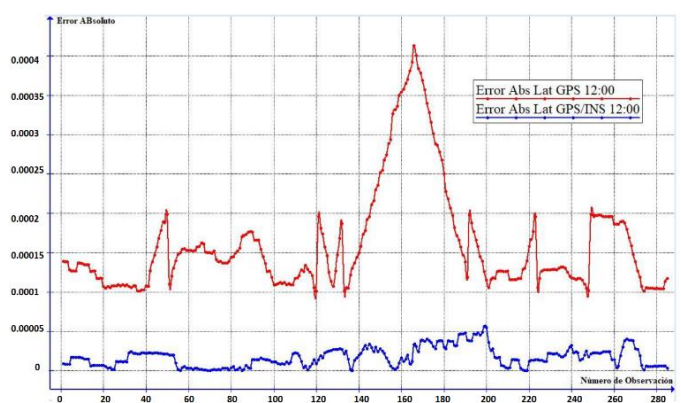


Fig. 14. Error Absoluto en latitud de las trayectorias ejecutadas con GPS (roja) vs GPS/INS (azul) a las 12:00

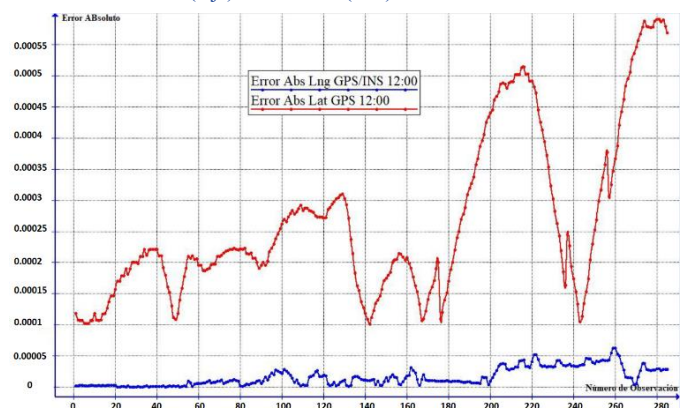


Fig. 15. Error Absoluto en longitud de las trayectorias ejecutadas con GPS (roja) vs GPS/INS (azul) a las 12:00.

Para evaluar el nivel de precisión alcanzado se realiza el cálculo del error absoluto en latitud y longitud, de cada punto de la trayectoria.

En las Fig. 14 - 15, se aprecia la disminución del error en la navegación con el uso conjunto del GPS y el sistema de navegación inercial con respecto a los resultados obtenidos únicamente con el GPS.

Tabla II
ERROR OBTENIDO EN LATITUD DEL SISTEMA GPS
CON RESPECTO AL SISTEMA GPS/INS A LAS 12:00.

Trayectoria de referencia: -1.6569
Trayectoria en latitud medida por GPS: -1.6573
Trayectoria en latitud medida con GPS/INS: -1.6569

Latitud	Diferencia entre Referencia – GPS	Diferencia Referencia – GPS/INS
Error Absoluto Máximo [%]	0.000413	0.000032
Error Relativo [%]	0.024925	0.001991

En la Tabla II se muestra el mayor valor de error absoluto en latitud alcanzado por el GPS y el valor de error en el mismo punto con el sistema GPS/INS, entonces se realiza la comparación de cada uno con respecto al sistema de referencia. Con el resultado obtenido se establece que sistema integrado GPS/INS mejora la precisión del sistema GPS consiguiendo una reducción de error del 89.84%.

Tabla III
ERROR OBTENIDO EN LATITUD DEL SISTEMA GPS CON RESPECTO AL SISTEMA GPS/INS A LAS 12:00.

Trayectoria de referencia: -78.66928
Trayectoria en longitud medido por GPS: -78.66987
Trayectoria en longitud medida con GPS/INS: -78.66931

Longitud	Diferencia Referencia – GPS	Diferencia Referencia – GPS/INS
Error Absoluto Máximo [%]	0.000590	0.000005
Error Relativo [%]	0.000749	0.0000038

En la Tabla III se muestra los datos en longitud y aplicando el análisis anterior se establece una reducción del error de GPS de 79.51%. El promedio de estos valores muestra la reducción del error de navegación de un 84.68%

Con los datos de posición obtenidos de la navegación en las pruebas 3 y 4, se realiza la gráfica de las trayectorias y la se compara con la trayectoria de referencia.

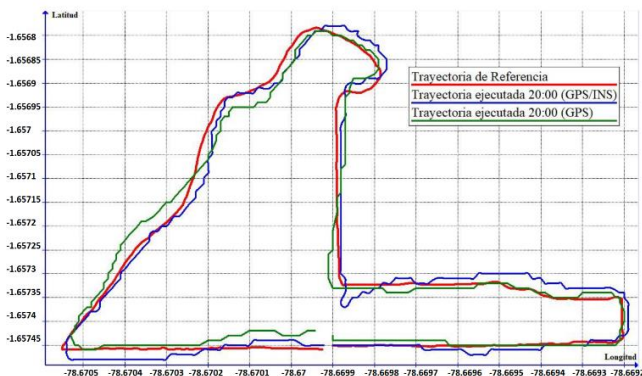


Fig. 16. Trayectorias de las pruebas 3 y 4 vs la trayectoria de referencia.

En la Fig. 16., se observa que la trayectoria ejecutada por el vehículo con el GPS es similar a la trayectoria de referencia, esto debido a que las pruebas se realizaron en la noche donde no existe pérdida de

la señal GPS por la ionización, aun así, la trayectoria efectuada por la integración los sistemas GPS/INS se asemeja más al de referencia.

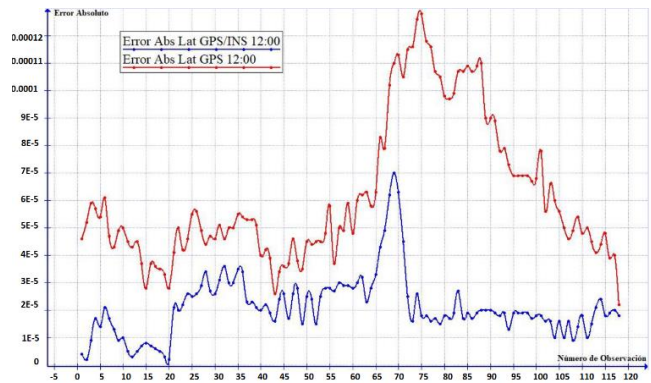


Fig. 17. Error Absoluto en latitud de las trayectorias ejecutadas con GPS (roja) vs GPS/INS (azul) a las 12:00.

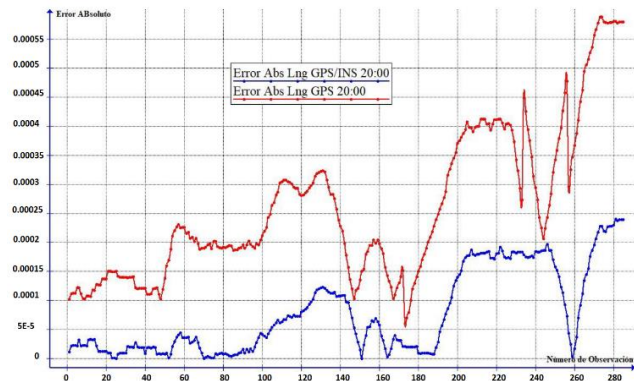


Fig. 18. Error Absoluto en longitud de las trayectorias ejecutadas con GPS (roja) vs GPS/INS (azul) a las 20:00.

Para el análisis de precisión se realiza el cálculo del error absoluto y relativo con respecto a latitud y longitud. Aunque en la Fig. 16., no se aprecia muy bien la diferencia de las trayectorias en las Fig. 17 - 18 es muy notable el porcentaje de error existente entre los dos sistemas.

Tabla IV
ERROR OBTENIDO EN LATITUD DEL SISTEMA GPS CON RESPECTO AL SISTEMA GPS/INS A LAS 20:00.

Trayectoria de referencia: -1.656929
Trayectoria en latitud medida por GPS: -1.65723
Trayectoria en latitud medida con GPS/INS: -1.65709

Latitud	Diferencia Referencia – GPS	Diferencia Referencia – GPS/INS
Error Absoluto Máximo [%]	0.000401	0.000151
Error Relativo [%]	0.018166	0.009113

De acuerdo con los datos numéricos de error absoluto en latitud establecidos en la Tabla IV y al realizar la comparación entre los dos sistemas se establece que el sistema GPS/INS corrige el error del GPS un 16.56%. con respecto a la longitud la corrección del error es de 15.65%. lo que significa que la corrección del error de navegación del GPS es de 16.11%.

Tabla V
ERROR OBTENIDO EN LONGITUD DEL SISTEMA GPS
RESPECTO AL SISTEMA CON GPS/INS A LAS 20:00.

Trayectoria de referencia: -78.66928
Trayectoria en longitud medido por GPS: -78.66951 Trayectoria en longitud medida con GPS/INS: -78.66987

Longitud	Diferencia Referencia -GPS/INS	Diferencia Referencia -GPS
Error Absoluto Máximo [%]	0.00059	0.00023
Error Relativo [%]	0.000749	0.000301

B. Segundo Escenario

El denominado “Parque del Estudiante” ubicado dentro del campus de la Escuela Superior politécnica de Chimborazo, se caracteriza por ser un lugar despejado, las interferencias en la recepción de GPS pueden producirse por los dispositivos móviles de los estudiantes que transitan por el lugar.

Los puntos de navegación obtenidas por el vehículo se muestran en la Fig. 19, donde cada muestra posee los datos de longitud y latitud.

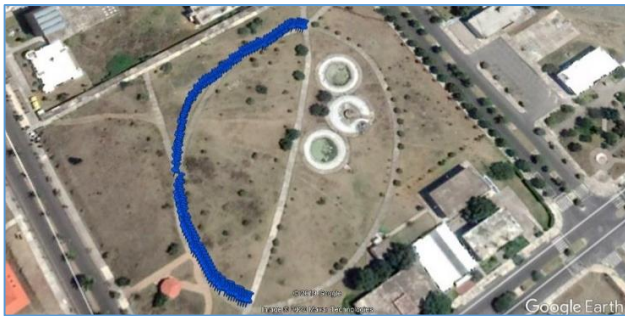


Fig. 19. Vista aérea de la trayectoria de referencia en el “Parque del Estudiante” en ESPOCH

En la Fig. 20 observamos las trayectorias que resultan de las pruebas 1 y 2, donde es notable el error que produce el sistema GPS y aunque el sistema GPS/INS trata de eliminar ese error no le es posible ya que este sistema también puede verse afectado por la condición del terreno, factor que es determinante para la estabilidad de los sensores inerciales.

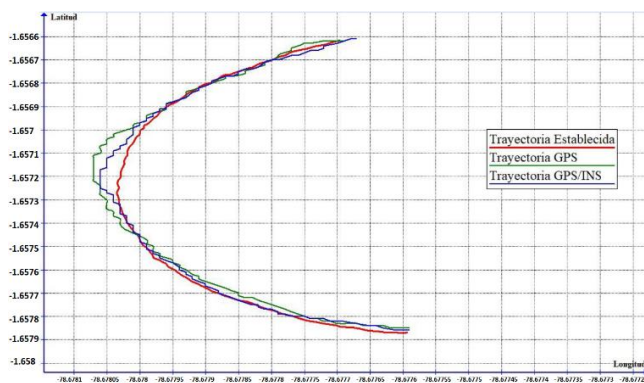


Fig. 20 Comparación de las trayectorias obtenidas en las pruebas 1 y 2 con respecto a la trayectoria de referencia.

Se realizó el cálculo de errores de latitud y longitud obtenidos en estas pruebas, y son presentados en las Tablas VI y VII respectivamente.

Tabla VI
ERROR OBTENIDO EN LATITUD DEL SISTEMA GPS CON
RESPECTO AL SISTEMA GPS/INS A LAS 12:00.

Trayectoria de referencia: -1.657538
Trayectoria en latitud medido por GPS: -1.65741
Trayectoria en latitud medida con GPS/INS: -1.65752

Latitud	Diferencia Referencia -GPS	Diferencia Referencia -GPS/INS
Error Absoluto Máximo [%]	0.000148	0.000018
Error Relativo [%]	0.004223	0.006636

Tabla VII
ERROR OBTENIDO EN LATITUD DEL SISTEMA GPS
RESPECTO AL SISTEMA CON GPS/INS A LAS 12:00.

Trayectoria de referencia: -78.67788
Trayectoria en longitud medido por GPS: -78.6778
Trayectoria en longitud medida con GPS/INS: -78.67795

Longitud	Diferencia Referencia -GPS/INS	Diferencia Referencia -GPS
Error Absoluto Máximo [%]	0.000084	0
Error Relativo [%]	0.000074	0.0012065

Se determina que en los puntos de mayor error registrado tanto en latitud como en longitud con el sistema GPS se tuvo una mejora de la precisión con el uso del sistema GPS/INS del 72% y 100% respectivamente. Lo que proporciona una reducción del error de navegación de 86%

Los resultados del seguimiento de la trayectoria establecida en las pruebas 3 y 4, se visualizan en la Fig. 21., en donde las trayectorias ejecutada por el GPS y el GPS/INS son casi idénticas y el margen de error que presentan los dos sistemas es imperceptible a simple vista.

La razón para obtener esta precisión es que como las pruebas se realizaron en la noche la señal de GPS no tuvo interferencias producidas por la radiación.

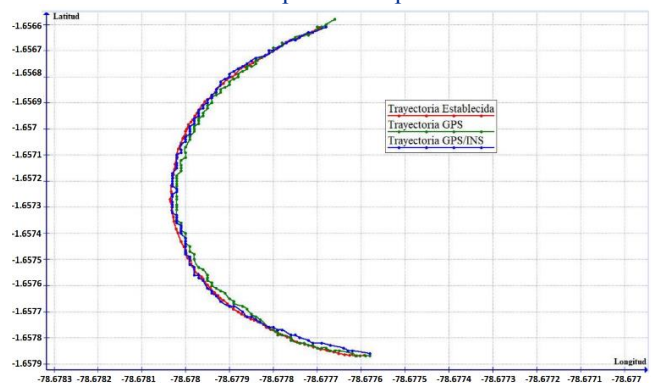


Fig. 21. Comparación de las trayectorias obtenidas en las pruebas 3 y 4 con respecto a la trayectoria de referencia.

Se realiza el cálculo del error absoluto en latitud y longitud, los resultados se muestran en la Tabla VIII y la Tabla IX respectivamente.

Tabla VIII
ERROR OBTENIDO EN LATITUD DEL SISTEMA GPS CON
RESPECTO AL SISTEMA GPS/INS A LAS 20:00.

Trayectoria de referencia: -1.657538
Trayectoria en latitud medida por GPS: -1.65745
Trayectoria en latitud medida con GPS/INS: -1.6574

Latitud	Diferencia Referencia - GPS	Diferencia Referencia - GPS/INS
Error Absoluto Máximo [%]	0.000188	0.000148
Error Relativo [%]	0.005309	0.00892891

Tabla IX
ERROR OBTENIDO EN LONGITUD DEL SISTEMA GPS CON
RESPECTO AL SISTEMA GPS/INS A LAS 20:00.

Trayectoria de referencia: -78.677963
Trayectoria en longitud medido por GPS: -78.6779
Trayectoria en longitud medida con GPS/INS: -78.67792

Longitud	Diferencia Referencia - GPS/INS	Diferencia Referencia - GPS
Error Absoluto Máximo [%]	0.000143	0.000013
Error Relativo [%]	0.000054	0.000016

Realizando la comparación de los sistemas se pudo determinar que en los puntos de mayor error registrado en latitud con el sistema GPS se tuvo una mejora de la precisión con el uso del sistema GPS/INS del 27,02%. Y en longitud se obtiene una mejora del 10%. Por tanto, la reducción del error de navegación del sistema GPS/INS frente al GPS es de 18.51%.

IV. CONCLUSIONES

La implementación del Sistema de Posicionamiento híbrido entre GPS e INS sobre un vehículo autónomo terrestre basado en *software* y *hardware* libre permite establecer las trayectorias a seguir intercambiando entre sistemas de navegación, se verifica que la precisión individual de cada sistema varía de acuerdo a las características de los escenarios propuestos debido a la robustez y debilidades que posee cada sistema. Es claro que al acoplar estos dos sistemas se logra fusionar las mejores características de cada sistema permitiendo incrementar la precisión sobre la posición del vehículo autónomo. El acoplamiento de las arquitecturas se realiza por medio de la tarjeta controladora *Pixhawk* como procesador del sistema ya que al contar con el algoritmo del Filtro de Kalman Extendido (EKF), realiza la fusión de medidas de GPS e INS eliminando errores comunes entre ambas arquitecturas y mejorando el rendimiento del sistema de navegación al incrementar la precisión sobre la trayectoria establecida, así se concluye que durante el día en donde la señal de GPS se ve afectada por la radiación solar y *multipath*, se verifica que el sistema integrado GPS/INS alcanzó mayor

precisión y redujo el error de navegación del GPS en un 84.68% mientras que en la noche donde los receptores de GPS no se ven afectados por la ionización, el sistema GPS/INS realiza una corrección de hasta un 16.11% en el error de posicionamiento sobre la trayectoria de navegación analizada.

REFERENCIAS

- [1] SANZ SUBIRANA, J., et al. GNSS DATA PROCESSING, Vol. I: Fundamentals and Algorithms. Noordwijk-Netherlands: ESA Communications, 2013, pp. 1-63.
- [2] GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE PERFORMANCE STANDARD, 4th ed., Department of Defense, United States of America, Sep 2008, approved for public release, distribution is unlimited.
- [3] DURÁN IGLESIAS, Victor. Sistema de navegación inercial 3D para VFR. 2017. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [4] WANG, G., et al., "A GNSS/INS Integrated Navigation Algorithm Based on Kalman Filter". IFAC-PapersOnLine, (2018). p. 232-237. ISSN 2405896
- [5] MIGUEZ ALGABA, A., Integración de los sistemas de navegación inercial a bordo de buques de posicionamiento dinámico [en línea]. (tesis) Universidad de la Laguna S.I.: s.n. 2014. pp. 48-64 [Consulta: 19 enero 2020]. Disponible en: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/198>.
- [6] PIXHAWK. What is *Pixhawk* [en línea]. 2018. [Consulta: 20 enero 2020]. Disponible en: <https://Pixhawk.org/>.
- [7] ESTRADA-TREJO, Astrid C., et al. Predicción de trayectorias usando el filtro de Kalman. Research in Computing Science, 2019, vol. 148, p. 307-316.
- [8] LEÓN, J., & CUENCA, L. Implementación de un sistema de navegación inercial, para mejorar la precisión de posicionamiento de un prototipo GPS en una trayectoria dentro de la ESPOCH. [en línea]. (tesis) ESPOCH. Riobamba-Ecuador, 2017, pp. 15-50. [Consulta: 14 enero 2020]. Disponible en: <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/7959>.
- [9] ARDUPILLOT Motor and Servo Configuration [en línea]. 2019. [Consulta: 30 enero 2020]. Disponible en: <https://ardupilot.org/ardupilot/index.html>.