

SADA – SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE UNA AERONAVE NO TRIPULADA

CARLOS GABRIEL MARTIN MARÍN

OMAR FABIAN PINEDA CARRILLO

JUAN CAMILO RIVERA MEDINA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BOGOTÁ D.C. – 2011

SADA – SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE UNA AERONAVE NO TRIPULADA

CARLOS GABRIEL MARTIN MARÍN

OMAR FABIAN PINEDA CARRILLO

JUAN CAMILO RIVERA MEDINA

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero Electrónico

DIRECTORES:

ING. LEONARDO SOLAQUE GUZMAN Ph.D.

ING. CAMILO ALBERTO OTÁLORA SÁNCHEZ M.Sc

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BOGOTÁ D.C. – 2011

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

RECTOR

GARCÍA, S.J.

DECANO ACADÉMICO

DECANO DEL MEDIO UNIVERSITARIO

DIRECTOR DE CARRERA

DIRECTORES DEL PROYECTO

P. JOAQUÍN EMILIO SÁNCHEZ

ING. FRANCISCO JAVIER REBOLLEDO MUÑOZ

P. SERGIO BERNAL RESTREPO S.J.

ING. JUAN MANUEL CRUZ MSc.

ING. LEONARDO SOLAQUE GUZMAN Ph.D.

ING. CAMILO ALBERTO OTÁLORA SÁNCHEZ M.Sc

DEDICATORIAS

El presente trabajo de grado se lo dedico a mis papás quienes han sido el mayor apoyo en mi vida, a mi hermano quien ha sido un modelo de vida a seguir y a la niña dueña de mi corazón.

Omar Pineda

Este trabajo se lo dedico a mis padres Julio y Roció quienes han sido mi más grande apoyo durante todo mi proceso de formación personal y profesional, guiándome por el mejor camino para poder llegar a cumplir todas mis metas, a mi hermano Manuel que con su apoyo incondicional siempre ha estado a mi lado, a mi novia Jennifer quien ha tenido ha vivido el esfuerzo, las alegrías y las desgracias de todo este proyecto y de muchos anteriores pero que siempre me ha estado apoyando, de igual forma a toda mi familia, a mi abuela Amparo y a mis tías quienes que a pesar de no tenerlos cerca se que siempre se encuentran dándome buenas energías para poder continuar luchando por mis objetivos. Por último quiero también dedicarlo a mis amigos, con quienes nos hemos esforzado para que no solo este proyecto saliera a satisfacción, sino también en muchos trabajos anteriores hemos trabajado sin descanso.

Juan Camilo Rivera Medina

Con este trabajo de grado culminan muchos momentos importantes de mi vida, momentos llenos de felicidad, grandes esfuerzos, tristezas, alegrías, nostalgia, y muchas otras sensaciones, pero que al final dejan una enorme satisfacción porque la meta principal, en esta etapa de mi vida, se ha alcanzado.

Lo de dedico a mis padres Carlos y Myriam quienes con su esfuerzo, apoyo, ejemplo y comprensión supieron guiarme y darme las mejores herramientas, a mi hermana Lorena por ser un ejemplo a seguir y la mejor consejera, a mi abuelita Maruja por brindarme su ternura y amor en cada momento de la vida, a mi novia Carolina quien con su comprensión y amor estuvo presente a lo largo de todo este proceso, y en general a todas las personas que estuvieron a mi lado apoyándome durante este camino.

Carlos Gabriel Martín Marín

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de Grado no hubiera sido posible sin el apoyo constante de los Ingenieros Leonardo Solaque Guzmán, de la Universidad Militar y Camilo Otálora Sánchez de la Pontificia Universidad Javeriana, que fueron los directores del proyecto.

También agradecemos el apoyo brindado por el personal de laboratorio de la facultad de Ingeniería Electrónica, en cabeza del ingeniero Manuel Parraga y Carlos Gómez quienes brindaron las herramientas necesarias para poder llevar a cabo el presente proyecto; igualmente al Ingeniero Gilberto Pérez quien brindó su apoyo incondicional en la solución de problemas.

“La universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de grado, solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y moral católicos y porque el trabajo no contenga ataques y polémicas puramente personales, antes bien, se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia.”

Reglamento de la pontificia Universidad Javeriana Artículo 23 de la resolución N° 13 de 1964

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 MARCO CONTEXTUAL	9
1.1.1 Antecedentes	9
1.1.2 Aviación en Colombia	10
1.1.3 Aeronaves No Tripuladas en el Mundo	10
1.1.4 Sistemas de Adquisición	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo General	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL.....	15
2.2 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM).....	17
2.3 MICROCONTROLADOR	17
3.1 ADQUISICIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE LAS SEÑALES ANÁLOGAS.....	18
3.2 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)	25
3.3 RUTINAS MICROCONTROLADOR.....	28
3.4 COMUNICACIONES	50
3.5 ULTRASONIDO	54
3.6 MATLAB – INTERFAZ DE USUARIO	54
3.6.1 Modo Online	55
3.6.2 Modo Offline.....	65
4. IMPLEMENTACIÓN FISICA Y RESULTADOS	68
4.1 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO.....	68
SOFTWARE.....	68
4.1.1 CONSIDERACIONES PARA ELABORACIÓN DEL IMPRESO.....	69
Consideraciones Generales	70
Consideraciones Específicas.....	71
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES	72
4.2.1 RESULTADOS ANÁLOGOS	72
4.2.2 RESULTADOS CONVERSIÓN ANÁLOGO- DIGITAL.....	76
4.3 RESULTADOS UTILIZANDO SENSORES – EN ESTADO ESTABLE.....	86
4.4 RESULTADOS DEL SISTEMA EN MOVIMIENTO.....	88
5 CARACTERISTICAS SADA	94
6 CONCLUSIONES	95

REFERENCIAS	96
INDICE DE FIGURAS.....	97
INDICE DE TABLAS	99
INDICE DE IMAGENES	99
ANEXOS.....	100
A. ESPECIFICACIONES DE COMPONENTES UTILIZADOS	100
B. CODIGO DE MATLAB.....	114
C. CODIGO EN C DEL MICROCONTROLADOR.....	114
D. CODIGO EN PYTHON	114
E. ESQUEMATICO Y CIRCUITO IMPRESO	114
F. COSTOS DEL PROYECTO.....	115

1. INTRODUCCIÓN

El hombre cumplió su sueño de volar a principios del siglo XX con la invención del planeador. En los últimos cien años la aviación ha sido pieza fundamental para el desarrollo de los países, ya que a través de la misma se ha logrado llegar a lugares que anteriormente no era posible; estos desarrollos llevan a que el hombre pueda ir supliendo ciertas necesidades, pero así mismo van surgiendo otras que llevan a ampliar los horizontes y a buscar nuevas aplicaciones y nuevos desarrollos que permitan mejorar lo que se tiene actualmente. Para mejorar cada uno de los trabajos realizados el ser humano ha creado equipos autónomos y semi-autónomos que permitan realizar de una mejor manera y sin descanso distintas tareas brindando seguridad y confianza. Recientemente se han venido utilizando equipos autónomos tales como las aeronaves no tripuladas, incursionando en diferentes campos, como los son el ambiental, búsqueda y rescate, monitoreo de territorios y aplicaciones militares, gracias a su versatilidad, seguridad y sin poner en riesgo las vidas humanas.

Actualmente las aeronaves no tripuladas ayudan a las comunidades permitiendo desarrollar nuevos proyectos que mejoren la calidad de vida de las personas. En Colombia el desarrollo de aeronaves no tripuladas comenzó con el proyecto Efigenia por parte de la Universidad del Cauca, en donde se realizó un desarrollo desde la teoría mecánica hasta aplicación en el control de la misma, pero actualmente las aeronaves utilizadas por diferentes entidades son adquiridas a través de empresas extranjeras, las cuales brindan todo un soporte de tecnología a muy altos costos; por esta razón ha aumentado el desarrollo de aeronaves no tripuladas en el país. Uno de los principales avances se ha realizado por parte de la Fuerza Aérea Colombia con el fin de utilizar estas aeronaves para el monitoreo y seguridad de áreas determinadas.

El presente trabajo de Grado forma parte de un proyecto inter-universitario en el cual el objetivo a futuro es desarrollar en Colombia una aeronave no tripulada; para poder implementar dicho proyecto se desarrolla un Sistema de Adquisición de datos que permita almacenar ciertas variables análogas y digitales de la aeronave no tripulada con el fin de poder conocer su posición, velocidad, aceleración, entre otras; dichas variables provienen en su mayoría de una unidad de medida inercial (IMU), la cual cuenta con acelerómetros, giroscopios y sensores magnéticos, a través de los cuales es posible determinar la posición en la que se encuentra la aeronave, de igual forma se cuenta con una unidad de GPS la cual brindará información de posición geográfica de la aeronave a través de señales digitales. El desarrollo del presente proyecto busca principalmente la implementación de un sistema que permita adquirir, almacenar y visualizar variables análogas y digitales que describan el comportamiento de una aeronave no tripulada; así como también incentivar la investigación y desarrollo de las mismas en Colombia.

1.1 MARCO CONTEXTUAL

1.1.1 Antecedentes

La aviación describe el comportamiento controlado a través del aire, de aparatos que usan fuerzas sustentadoras fijas o móviles para desarrollar su vuelo, impulsados por sus propios motores [1].

Los orígenes de la aviación se remontan a los tiempos pre-históricos cuando el hombre observaba las aves en la naturaleza, posteriormente fueron surgiendo un sin número de historias mitológicas en donde se

describen a personas con dones divinos que tenían la capacidad de volar. Muchas personas consideraron que el volar era imposible para los seres humanos, pero el sueño de algunos continuaba latente en la búsqueda del vuelo [1].

Muchos intentos de volar se dieron a través del tiempo comenzado por experimentos con globos aerostáticos que lograban elevarse, pero no se podía tener un control sobre ellos, luego a principios del siglo XX se dieron los primeros vuelos controlados por parte de los hermanos Wright, aunque existen ciertas afirmaciones que consideran también que el brasilero Alberto Santos Dumont fue quien realizó los primeros vuelos. A partir de estos logros realizados por el hombre, la aviación ha venido evolucionando hasta nuestros días. Los diseñadores se han encargado de mejorar las capacidades con el fin de transportar personas o carga, de igual forma se han integrado sistemas electrónicos que han ayudado a mejorar la seguridad y dan mayor confianza debido a su versatilidad y exactitud [2].

1.1.2 Aviación en Colombia

Los inicios de la aviación en Colombia se remontan al año de 1893, en donde por primera vez en nuestro país el argentino José María Flores voló sobre la ciudad de Popayán en un globo inflado con gas de petróleo, en los años siguientes se presentaron distintas demostraciones, pero hasta 1912 el canadiense John Smith realizó un vuelo de acrobacias sobre la ciudad de Barranquilla a bordo de un avión Farman de la época [3]. En el año de 1919 bajo el gobierno del presidente Marco Fidel Suárez se crea la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), la cual fue llamada para la época Arma de Aviación. La creación de la FAC se da con el fin de desarrollar la aviación en Colombia, con la ayuda del presidente Marco Fidel Suárez y su homólogo francés fue posible la obtención de las primeras aeronaves militares [4].

Actualmente la aviación en el país ha logrado un gran desarrollo, destacándose empresas como Avianca la cual fue fundada en el año de 1919 y actualmente cuenta con una flotilla de 62 aviones volando a más de 290 vuelos diarios [5], de igual forma la modernización de la Fuerza Aérea Colombiana, se ha realizado con la compra de nuevas aeronaves de muy alta tecnología que sirven para cumplir misiones de transporte y defensa.

1.1.3 Aeronaves No Tripuladas en el Mundo

En años recientes el uso de aeronaves no tripuladas ha sido de gran ayuda para países y organizaciones que buscan tener una gran versatilidad en el desarrollo de tareas que puedan presentar riesgo para los seres humanos o que deban realizarse con altos grados de precisión.

Las aeronaves no tripuladas (UAV) tuvieron sus inicios en diferentes organizaciones militares alrededor del mundo después de la segunda guerra mundial, con el fin de brindar seguridad o con el propósito de monitorear ciertas regiones. Los UAV son equipos que pueden ser controlados desde tierra o que cuentan con un sistema embarcado que les permite realizar tareas de manera autónoma dependiendo de una programación determinada hecha previamente, una de las mayores ventajas que pueden brindar las aeronaves no tripuladas es su versatilidad en la carga útil, de tal manera que pueda llevar cámaras de reconocimiento, armamento para aplicaciones militares o cualquier tipo de carga que sea necesaria dependiendo de la misión que se encuentre realizando la aeronave.

Con el desarrollo de las aeronaves no tripuladas no sólo se ha logrado grandes desarrollos en disciplinas diferentes a las de la aeronáutica sino que también se han realizado desarrollos en sistemas electrónicos y de telecomunicaciones que permitan monitorear el estado y posición de la aeronave en tiempo real y así brindar una información clara al usuario. El mejoramiento en sistemas de adquisición para aeronaves se ha convertido en una de las piezas fundamentales para el buen desempeño de las mismas, teniendo la capacidad de adquirir una gran cantidad de variables con el fin de lograr un buen control. Existen diferentes proyectos que se han basado en el desarrollo de sistema de adquisición. La Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica de España, ha desarrollado en un sistema de adquisición de una aeronave no tripulada, donde su mayor objetivo es tener el sistema embarcado en la aeronave y poder obtener los parámetros de vuelo del avión y ser enviados a una estación en tierra cada determinado tiempo si la estación lo requiere [6]. Por otro lado existen proyectos para aplicaciones civiles como el sistema de adquisición integrado para el monitoreo de costas y ambientes marítimos en donde se desea desarrollar el sistema para que tenga la capacidad de mantener una carga útil menor a 4kg, con una completa herramienta de sensores para permitir el análisis de los sensores de forma remota [7].

1.1.4 Sistemas de Adquisición

Los sistemas de adquisición de datos actualmente son una pieza fundamental en cualquier sistema que se desea controlar o monitorear. Las aeronaves cuentan con instrumentos de control que le permiten al piloto a través de indicadores ejercer un control seguro del vuelo de la aeronave, entre estos indicadores se encuentran los de velocidad aerodinámica, rumbo, velocidad vertical, altímetro, coordinador de giro, inclinómetro, e indicadores de potencia de la aeronave entre otros. Muchos de estos sistemas se han venido modernizando, realizando la integración de equipos electrónicos que permitan tener mejores resultados.

Con el auge en los avances en aeronaves no tripuladas la aplicación de sistemas de adquisición ayudan a suplir las labores que anteriormente eran realizadas por el piloto, monitoreando cada uno de los indicadores, dejando la manipulación de cada una de las variables a un equipo especializado diseñado para tener la capacidad de procesar muy bien cada uno de los datos, para realizar de una forma optima distintas tareas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

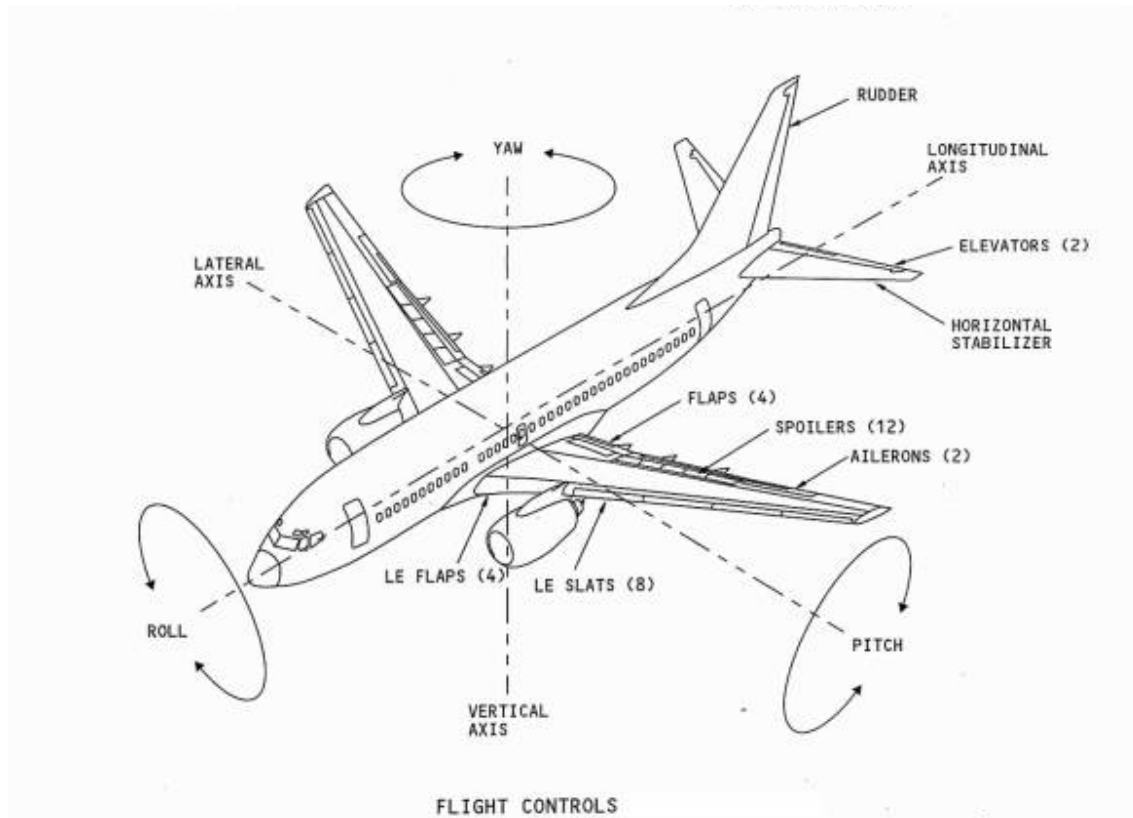
Implementar un sistema de adquisición y supervisión de variables análogas y digitales de una aeronave no tripulada.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Adquirir las señales de la tarjeta SparkFun 6DOF-v4-Rev [8], el GPS Trimble [9] y el sensor de proximidad en canales diferentes, y restringir el ancho de banda de cada uno de ellos.
- ✓ Implementación de un sistema de almacenamiento basado en un micro-controlador o un micro-procesador.
- ✓ Realizar comunicación serial alámbrica, utilizando un protocolo RS-232 o USB entre el sistema y un PC fijo.
- ✓ Realizar una interfaz que permita supervisar y registrar el estado del sistema en un archivo tipo texto.
- ✓ Minimizar el tamaño y consumo del sistema a embarcar en la aeronave no tripulada; teniendo como referencia un sistema de adquisición de datos anterior.

2. MARCO TEÓRICO

Los movimientos de una aeronave sobre el eje pueden ser descritos en 3 variables diferentes como lo muestra el figura 1.



Movimientos de roll, pitch y yaw de una aeronave. Figura 1

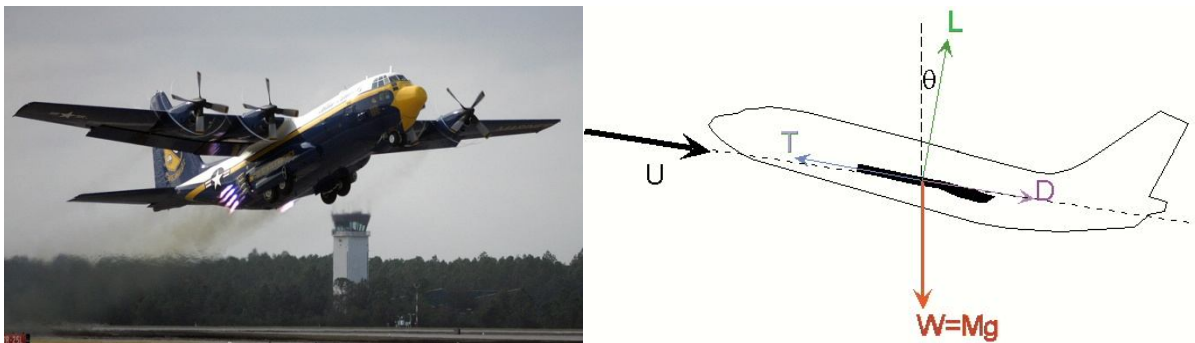
Los movimientos de pitch, describen la inclinación hacia arriba o hacia abajo de la cabecera de la aeronave, por otro lado los movimientos en roll, describen el comportamiento lateral de la aeronave sobre su propio eje, y por último los movimiento de yaw describe el comportamiento de la aeronave hacia izquierda y derecha. Cada uno de estos movimientos pueden ser sensados utilizando giroscopios que bien posicionados, pueden llegar a brindar información sobre la tasa de cambio de cada uno de los ángulos.

Estos movimientos pueden ser monitoreados utilizando acelerómetros, los cuales describen los cambios de aceleración en cada una de las componentes del plano sobre el cual se encuentre la aeronave.



Plano de Desplazamiento de la Aeronave. Figura 2

La combinación de estos seis movimientos describen la dinámica total de la aeronave y su interacción entre cada uno de ellos. Un ejemplo claro de esta relación entre las variables es posible observarla cuando la aeronave en desplazamiento horizontal genera un movimiento en el pitch de tal forma que la nariz del aeronave se desplaza hacia arriba sobre el plano horizontal, este movimiento combinado con la velocidad de desplazamiento de la aeronave genera una desviación en la trayectoria, aumentando la altura debido al empuje que se genera sobre el fuselaje de la aeronave, tal como se muestra en la figura [3].



Movimiento de Pitch debido al empuje del Aire sobre el Aeronave. Figura 3

En la navegación de una aeronave es importante tener siempre presente la ubicación relativa de la aeronave con respecto a un punto de referencia fijo en la tierra, es por esto que es necesario el uso de un sensor magnético con el fin de poder usarlo como instrumento de navegación, detectando el campo magnético de la tierra. El sensor magnético o compas brindan información sobre el campo magnético de la tierra relativo a cada una de las variables en el plano x, y, z, conociendo estas tres variables es posible obtener la componente total del campo magnético. Estos valores son dados en unidades de gauss.

Debido a los avances tecnológicos que se han dado en las últimas décadas, actualmente el uso de GPS (Global Positioning System) brinda información muy acertada sobre la velocidad relativa de un objeto, así como su posición espacial sobre la tierra.

2.1 UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL

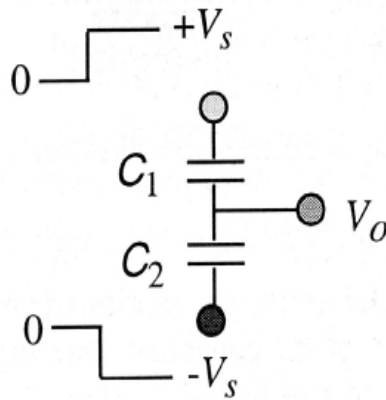
Como se nombro anteriormente se utilizo una Unidad de medida inercial fabricada por SparkFun, la cual posee: acelerómetros, giroscopios y sensores magnéticos, los cuales se explicaran a continuación:

Acelerómetro:

Los acelerómetros como su nombre lo indica, son los encargados de brindar información sobre la aceleración del cuerpo que está en movimiento, estos se encuentran fabricados con materiales que permitan detectar cualquier variación de movimiento.

Existen diferentes tipos de acelerómetros, y el uso de los mismos va a depender de la aplicación deseada. La IMU (SparkFun 6DOF-v4-Rev) cuenta con acelerómetros capacitivos de referencia MMA7260Q fabricados por la empresa Freescale Semiconductors. Estos acelerómetros de alta sensibilidad sensan los cambios de velocidad de la aeronave en los tres ejes (x, y, z).

Los acelerómetros MMA7260Q, cuentan con una capacitancia variable de alta sensibilidad la cual va cambiando su valor a medida que detecta cambios en la aceleración.



x_0 : distancia entre placas

dx : distancia diferencial entre placas

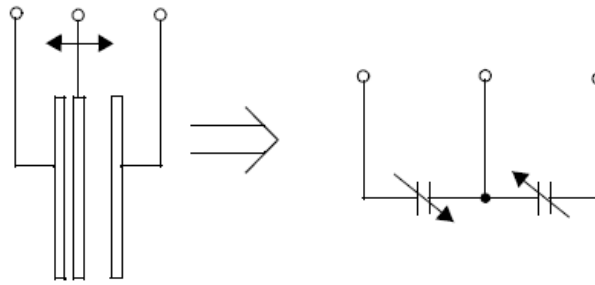
$$V_o = -V_s + \frac{C_1}{C_1 + C_2} * 2V_s = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} * V_s \quad (2.1)$$

$$C_1 = C * \frac{x_0}{x_0 + \delta x} \quad C_2 = C * \frac{x_0}{x_0 - \delta x} \quad (2.2)$$

$$C_1 - C_2 = C \left(\frac{x_0}{x_0 + \delta x} - \frac{x_0}{x_0 - \delta x} \right) = C \left(\frac{-2x_0\delta x}{x_0^2 - \delta x^2} \right) \approx -C \frac{2}{x_0} \delta x \quad (2.3)$$

$$C_1 + C_2 \approx 2C \quad (2.4)$$

$$V_o \approx -\frac{\delta x}{x_0} * V_s \quad (2.5)$$



Modelo Sencillos de la Capacitancia del Acelerómetro. Figura 4

A medida que la placa del medio comienza a moverse, la distancia relativa a las otras placas va a cambiar, aumentando la distancia en un lado y disminuyéndola en la misma proporción en el otro lado, luego este cambio de distancia es una medida de aceleración. Esta distancia se refleja como un voltaje equivalente de salida V_o , el cual será proporcional a la distancia entre placas del condensador dado por x_0 , la cual cambiara dependiendo de la dirección de la aceleración que se está midiendo.

Giroscopio:

Un giroscopio es un dispositivo que permite medir la orientación. Cualquier cuerpo en rotación presenta las siguientes propiedades: la inercia giroscópica (rigidez en el espacio) y la precesión que es la inclinación del eje en ángulo recto ante cualquier fuerza que tienda a cambiar el plano de rotación. Como tal un giroscopio es un dispositivo generalmente mecánico donde su esencia es una masa con forma de rueda girando alrededor de un eje. A su vez está montado sobre un sistema que permite que el eje pueda tomar cualquier orientación. Una vez que está girando tiende a resistir los cambios en la orientación del eje de rotación debido a las propiedades indicadas anteriormente.

La inercia giroscópica se debe a la Primera Ley de Newton que afirma que un cuerpo tiende a continuar en su estado de reposo o movimiento uniforme si no está sometido a fuerzas externas; por lo cual una vez la rueda del giroscopio empiece a girar, tiende a seguir rotando en el mismo plano en torno al mismo eje espacial.

Si se aplica una fuerza a un giróscopo, este siempre tiende a cambiar la dirección del eje de rotación, el eje se desplaza en una dirección que forma un ángulo recto con la dirección de aplicación de la fuerza. Este movimiento es causado a la vez por el momento angular del cuerpo en rotación y por la fuerza aplicada.

La IMU cuenta con el integrado IDG-300 que es un sensor angular de 2 ejes (giroscopio). Este a su vez usa dos sensores con la nueva configuración de vibración de doble masa de silicio, el cual emula el funcionamiento de un giroscopio mecánico y de tal manera sensa la rotación del plano x y del plano y. El IDG-300 posee además filtros pasa bajos y una memoria EEPROM, tiene un alto grado de aislamiento de los dos ejes, lo que brinda independencia a las mediciones que realiza y fue especialmente diseñado para aplicaciones de alto desempeño que requieren bajo costo y ante todo una optimización en tamaño. [11]

Sensor Magnético:

Es un sensor utilizado para medir la intensidad ad del campo magnético en una posición en el espacio determinada. El sensor que se utiliza posee una tecnología llamada “Anisotropic Magnetoresistive” que provee ventajas sobre los sensores de bobina; ya que son sensores magnéticos de estado sólido con alta sensibilidad; desde 120 micro Gauss hasta 6 Gauss. [12]

2.2 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

Uno de los dispositivos fundamentales para el sistema de adquisición es el uso de un GPS, de tal forma que el sistema se encuentre en la capacidad de conocer o almacenar la información sobre la ubicación.

El sistema de adquisición fue diseñado para ser embarcado en una aeronave, es por esto que es necesario varios datos fundamentales como lo son la longitud, latitud y altitud, cada uno de estos datos serán procesados realizando algunas transformaciones, con el fin de obtener las coordenadas X, Y y Z con respecto al centro de la tierra.

El GPS Trimble cuenta con 3 modos de comunicación a través de distintos protocolos los cuales pueden ser elegidos por el usuario utilizando unas configuraciones específicas. Los protocolos disponibles son el TSIP (Trimble Standard Interface Protocol), el cual da la información de ubicación, velocidad, y hora utilizando una configuración Hexadecimal, por otro lado tiene la disponibilidad de un segundo protocolo llamado TAIP (Trimble ASCII Interface Protocol), el cual envía su información utilizando diferentes caracteres en modo ASCII, los cuales pueden ser descifrados utilizando su equivalente hexadecimal, finalmente utiliza también el protocolo NMEA (National Marines Electronics Association), el cual brinda la información utilizando diferentes tramas, en donde cada uno de los datos se encuentran separados por comas y son enviados en modo ASCII.

2.3 MICROCONTROLADOR

El sistema de adquisición requiere de ciertas características las cuales deben ser cumplidas por el micro controlador, estas son:

- Alta velocidad de procesamiento.
- Mínimo 14 puertos de entradas análogas.
- Módulos de comunicación Serial para mantener comunicación con PC y GPS.
- Módulos de salidas de PWM para generar señales de reloj con los filtros Anti-Aliasing.
- Conversor Análogo digital mínimo de 10bits.
- Diferentes puertos de entrada salida para otras aplicaciones.

2.4 ULTRASONIDO

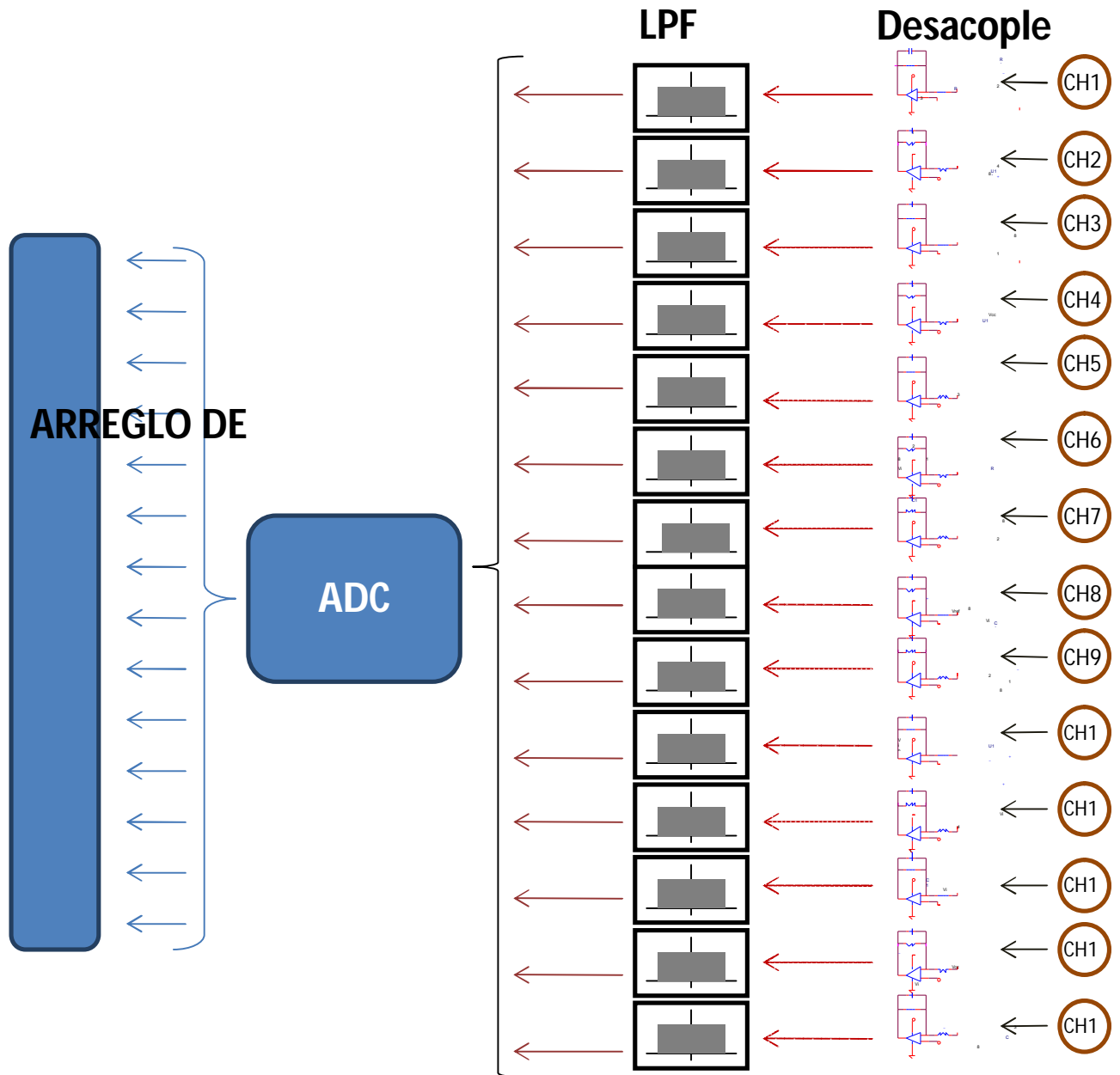
Este dispositivo sonar de ultrasonido permite trabajar en un rango de detección de largo o corto alcance entre 6 a 256 pulgadas, de igual forma permite tener varios formatos de salida de la información, lo cual brinda una mayor versatilidad en el sistema.

3. DESARROLLOS

3.1 ADQUISICIÓN Y DIGITALIZACIÓN DE LAS SEÑALES ANÁLOGAS

La fase de adquisición es considerada la parte fundamental en el desarrollo de este sistema, ya que a través de ella será posible la conexión de diferentes tipos de sensores que brindaran información sobre el estado actual de la aeronave. El sistema cuenta con la capacidad de recibir 14 entradas análogas provenientes de diferentes fuentes, lo cual le da versatilidad al sistema de tal forma que se puedan adaptar señales que no fueron determinadas en el diseño inicial pero que puedan llegar a ser necesarias en el desarrollo de alguna aplicación.

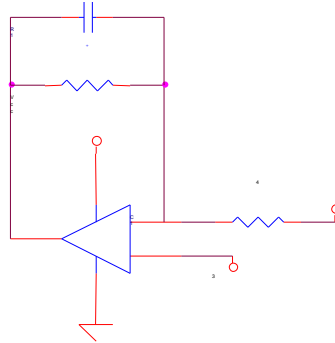
El proceso de adquisición puede ser dividido en 4 etapas, tal como lo muestra la Figura 5:



Proceso de Adquisición Figura 5

Acoplamiento de señal

En el diseño de un sistema de adquisición es fundamental que este no afecte las señales de salida de las fuentes, generando efectos de carga o atenuaciones que van a tener como consecuencia una mala lectura de las señales de entrada. Para el caso particular del sistema de adquisición fue necesario diseñar un acoplador de señal que permitiera, darle un DC a la señal de entrada, esto debido a que la región lineal de los filtros anti-aliasing se encontraba entre 1,3V y 4V lo cual impedía una buena lectura de cada una de las variables provenientes de los sensores, las cuales trabajan de 0 – 3.3.



Amplificador Operacional en Configuración Seguidor. Figura 6

Dado que cada una de las señales que ingresan al sistema serán filtradas con el fin de evitar que señales de frecuencias no deseadas sean muestreadas, se utiliza un acoplador de señal, permitiendo así cambiar los voltajes de entrada dados por los sensores de 0 - 3.3V a 1.4 - 4V, con el fin de mantener la linealidad de cada uno de los dispositivos utilizados.

El diseño del acoplador de señal se basa en el siguiente procedimiento:

$$\frac{V_{in} - V_{ref}}{R1} = \frac{V_{ref} - V_o}{R2} \quad (3.1)$$

Se despeja V_o ,

$$V_o = V_{ref} - \left(\frac{V_{in} - V_{ref}}{R1} \right) * R2 \quad (3.2)$$

Luego cuando $V_{in} = 0$

$$V_o = V_{ref} + \left(\frac{V_{ref}}{R1} \right) * R2 \quad (3.3)$$

Cuando $V_{in}=0$, $V_o=4$, y para $V_{in}=3$, $V_o=1.4$, luego para cumplir con este propósito se establecen los siguientes valores de resistencias y voltaje referencia.

$$V_{ref} = 2,21 V \quad (3.4)$$

$$R1 = 12,1k\Omega \quad (3.5)$$

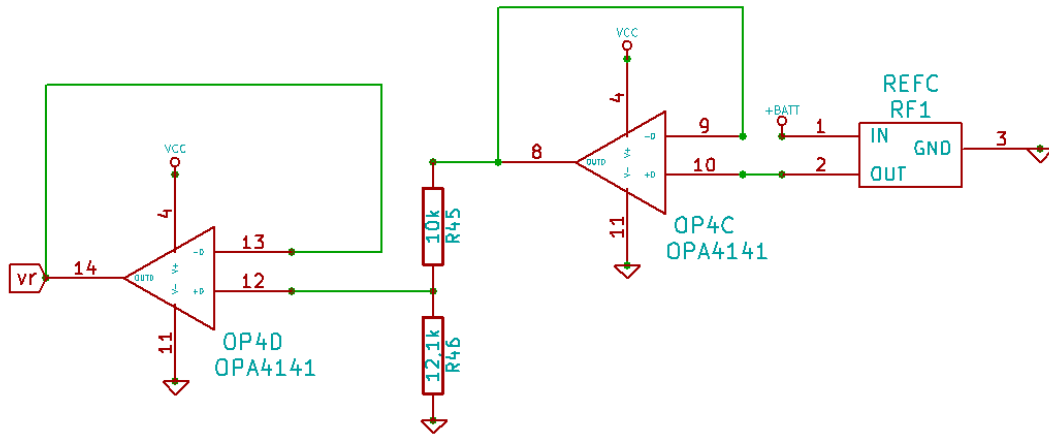
$$R2 = 9,53k\Omega \quad (3.6)$$

Con el fin de tener un voltaje estable sobre el acoplador se utiliza una referencia de voltaje, la cual se encuentra a un valor fijo de 4,093V, y se calcula un divisor resistivo que permita tener el valor de 2,21V, que se calculo anteriormente.

$$V_{ref} = \frac{R3}{R3 + R4} * 4,093 \quad (3.7)$$

$$R4 = 10k\Omega \quad (3.8)$$

$$R3 = 12.1k\Omega \quad (3.9)$$



Esquemático voltaje de offset de acoplador de señal Figura 7

En el diseño de cualquier sistema electrónico es necesario tener en cuenta la influencia del ruido externo, generado por equipos electrónicos externos, los cuales pueden producir que señales de frecuencias diferentes interfiera en el funcionamiento del circuito, es por esta razón que se decide limitar el ancho de banda a 16kHz de cada uno de los amplificadores, utilizando un condensador en paralelo sobre la resistencia R2 como se muestra a continuación:

$$\omega = \frac{1}{R2 * C} \quad (3.10)$$

Dado que $w = 2\pi$

$$2\pi * f = \frac{1}{R2 * C} \quad (3.11)$$

$$C = \frac{1}{R2 * f * 2\pi} \quad (3.12)$$

Luego para $R_2=9,53k\Omega$, $f=16kHz$ se obtiene lo siguiente:

$$C = \frac{1}{9,53k * 16k * 2\pi} = 1,04nF \quad (3.13)$$

Luego se utiliza un condensador $C=1nF$, en paralelo con la resistencia de $9,53k\Omega$.

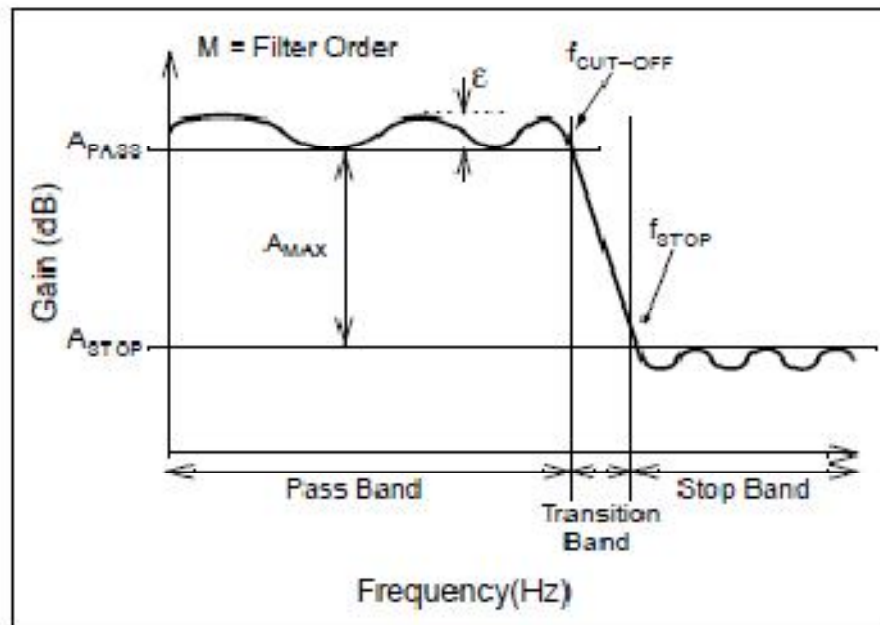
Filtros Anti-Aliasing

Los filtros análogos son ampliamente utilizados en diferentes aplicaciones con el fin de limitar el ancho de banda de las señales con las cuales se está trabajando, o en muchas oportunidades, con el fin de eliminar ruido (componentes de otras frecuencias). Los filtros anti-aliasing son ampliamente utilizados en sistema en los cuales es necesario digitalizar señales, ya que permite mejorar la lectura de cada una de estas. [11]

Consideraciones para el diseño de un Filtro Análogo

En el diseño de un filtro análogo, existen varias características que son de gran importancia y que van a variar dependiendo de la aplicación con la cual se desee trabajar.

Un filtro LPF (Low pass Filter; Filtro pasa bajos), es posible caracterizarlo basándose en 5 parámetros:

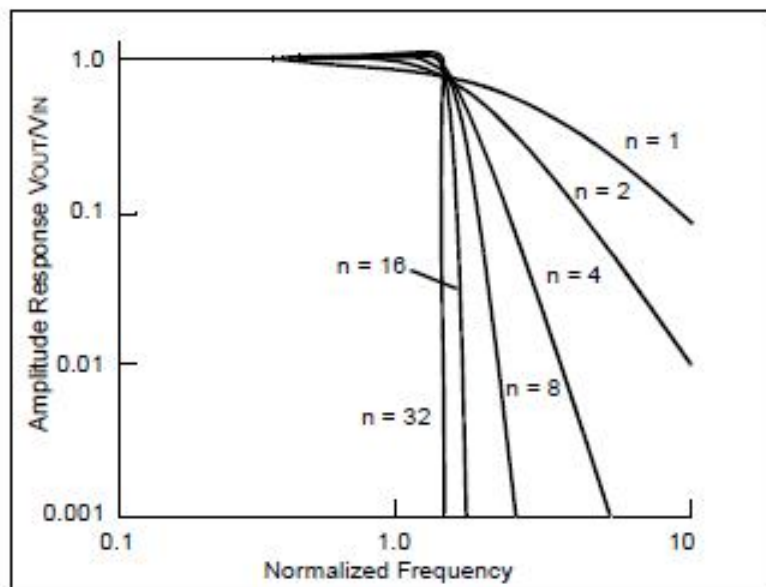


Respuesta en Frecuencia Figura 8

- Banda de Paso: Es el valor de las frecuencias definidas entre DC y la frecuencia de corte que se desea del sistema, esta banda de frecuencias debe tener una ganancia la cual está dada como A_{ps} .
- Frecuencia de corte: Es la frecuencia definida, como la frecuencia en la cual la ganancia de la banda de paso ha decaído 3dB.
- Frecuencia de Parada: Es la frecuencia a la cual el filtro llega a tener su mínima atenuación sobre la señal de entrada.
- Banda de Transición: Esta banda se encuentra definida como la diferencia entre la frecuencia de corte y la frecuencia de parada ($F_{cut}-F_{stop}$).

- Banda de Parada: La cual se define como la banda después de que el filtro ha pasado la frecuencia de parada.

Cada una de estas características se debe tomar en cuenta dependiendo de la implementación a la cual se quiera llegar. Es importante destacar que existen diferentes tipos de filtros y así mismo estos pueden tener diferentes órdenes de magnitud, los cuales van a estar directamente relacionados con la banda de transición, a medida que la banda de transición se hace mas angosta el orden del filtro tendrá que ser más alto de tal manera que logre cumplir con el desempeño necesario, tal como se muestra en la figura 9.



Frecuencia de corte y orden del Filtro. Figura 9

Consideraciones y Diseño de Filtro Anti-Aliasing

El diseño de los filtros anti-aliasing se encuentra directamente relacionado con las características de digitalización de las señales. En los criterios de diseño las variables que influyen serán, la frecuencia de muestreo, la frecuencia de corte, la banda de paso, la cantidad de bits a los cuales puede convertir el ADC.

El diseño del filtro se basara en 4 consideraciones, la primera será, la atenuación necesaria que se encuentra directamente relacionada con la cantidad de bits a convertir, la segunda es el tipo de filtro con el cual se va a trabajar, la tercera y cuarta, son la frecuencia de muestreo con la cual va a trabajar el sistema de adquisición y la frecuencia de corte de los filtros. El procedimiento se describe de manera detallada a continuación:

1. Se define la atenuación que debe tener el filtro dependiendo de la cantidad de bits efectivos con los cuales trabaja el ADC. El sistema de adquisición trabajará con un modulo de ADC de 10bits el cual se encuentra integrado en el micro controlador.

$$Atenuacion = 20 * \log \left(\frac{1}{2^n} \right) \quad (3.14)$$

$$Atenuacion = 20 * \log \left(\frac{1}{2^{10}} \right) = -60.2dB \quad (3.15)$$

Este valor de atenuación corresponde a cuánto debe ser el rechazo en dBs del filtro para obtener un buen desempeño.

2. Se plantea el uso de un filtro del tipo Butterworth, debido a sus características de funcionamiento, ya que es constante en la banda de paso y a medida que aumenta el orden del filtro este únicamente cambia la pendiente sobre la banda de transición. A diferencia de filtros como el Chebyshev, el cual en la banda de parada puede presentar un ripple, dando así valores no deseados en la señal, el filtro butterworth posee una banda plana, que en ocasiones puede presentar algunas ondulaciones pero que llegan a ser mínimas.
3. Conociendo dos características principales como los son el tipo de filtro a utilizar y la atenuación, se estudia entonces la relación entre la frecuencia de muestreo y la frecuencia de corte con la cual se va a trabajar. En la tabla[2], se muestra la relación de frecuencias que se debe cumplir para que el filtro tenga el rechazo a frecuencias alias necesario dependiendo del orden del mismo.

Filtro	-20dB	-40dB	-60dB	-80dB
Butterworth 4° orden	2.76	4.14	6.67	10.86
Butterworth 8° orden	2.33	2.78	3.38	4.14

Tabla de relación Frecuencia de corte y Frecuencia de Muestreo. Tabla 1

De la tabla se toman los siguientes valores:

Con el fin de que el orden del filtro no sea muy alto se toma una relación mayor, lo cual influye directamente en los valores de la banda de transición. El valor de relación del uno al otro será:

$$\frac{f_s}{f_c} = 10.86 \cong 11 \quad (3.16)$$

Luego la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo 11 veces mayor a la frecuencia de corte con la cual se va a trabajar. Esta característica es de vital importancia ya que permitirá tener una reconstrucción acertada de la señal en el momento de su digitalización, la cual se explicará posteriormente.

4. Finalmente conociendo todas las características necesarias se verifica el orden del filtro con el cual se desea trabajar, a pesar de que en la tabla 2 existe una relación entre la atenuación y el orden del filtro se decide verificar su orden utilizando la siguiente ecuación:

$$-60.2dB = 20 * \log \left(\frac{1}{\left(\frac{f_s}{f_c} + 1\right)^N} \right) \quad (3.17)$$

$$N = \frac{3.01}{\log \left(\frac{f_c + f_s}{f_c} \right)} \quad (3.18)$$

Reemplazando $f_c = 10.86 * f_s$ Se obtiene el siguiente resultado:

$$N = \frac{3.01}{\log\left(\frac{10.8 * fc + fc}{10.8 * fc}\right)} \quad (3.19)$$

$$N = \frac{3.01}{\log\left(\frac{10.8 * 120 + 120}{10.8 * 120}\right)} = 2.81 \quad (3.20)$$

Luego el orden del filtro obtenido es de 2.81, pero con el fin de tener un buen funcionamiento, se decide utilizar un filtro de orden 4. [13]

Digitalización

La tercera fase del proceso de adquisición de las señales análogas se basa en la digitalización de cada uno de los valores de entrada provenientes de la IMU. Para este proceso es necesario tener en cuenta varias consideraciones. La primera es la teoría de muestreo, la segunda tener cuidado en el uso de los voltajes referencia, y el tercero es el buen manejo de los valores obtenidos. En el proceso de digitalización es posible abarcar los últimos dos bloques, tanto el de digitalización como el de buffer ya que los dos se encuentran directamente relacionados.

Muestreo de Señales Análogas

La base fundamental de la aplicación del presente sistema de adquisición es el capturar de 9 señales análogas provenientes de distintos sensores, cada uno de estos sensores poseen un ancho de banda diferente, dado por el fabricante tal como lo muestra la tabla 3.

Sensor	Referencia	Ancho de Banda (BW)
Acelerómetro	MMA7260Q	150Hz
Giroscopio	IDG-300	120Hz
Sensor Magnético	HMC1052	312Hz

Características sensores Tarjeta Sparkfun. Tabla 2

Basándose en el ancho de banda de cada uno de los sensores, y con el fin de que la frecuencia de muestreo no fuera diferentes para cada uno de ellos, se decide que los filtros anti-aliasing logren filtrar las señales de entrada a una misma frecuencia, la cual va a ser ingresada por el usuario con el fin de facilitar al implementación en el momento del muestreo de las señales, se determina que la frecuencia de muestreo mínima con la cual se trabajará para todos los canales será de:

$$fs = 10.86 * fc \quad (3.21)$$

Luego cada valor de entrada será asignado a un nivel dentro de la escala. La cantidad de niveles estará definido dependiendo de la cantidad de bits con los cuales trabaje el conversor análogo digital. Dado que el modulo de ADC del micro controlador cuenta con 10bits, la cantidad de niveles serán:

$$2^n = Niveles \quad (3.22)$$

$$2^{10} = 1024 \text{ niveles} \quad (3.23)$$

Cada uno de estos valores digitalizados es almacenado en un buffer que debe ser configurado dependiendo de la aplicación con la cual se vaya a trabajar, el proceso de configuración del modulo de ADC se explicará más detenidamente en la etapa de configuración del microcontrolador.

Finalmente con el objetivo de poder obtener los valores de voltajes de entrada reales en el sistema, se utiliza una referencia de voltaje de 4.095V, que se asigna al microcontrolador, y se convierten cada uno de los valores a un valor cercano, que va a depender de la sensibilidad.

$$\text{Sensibilidad ADC} = \frac{4.093}{2^{10}} = 3.9mV \quad (3.24)$$

Luego el valor de entrada podrá ser representado como:

$$\text{Valor entrada} = \text{Buffer} * \text{Sensibilidad} \quad (3.25)$$

$$\text{Valor entrada} = \text{Buffer} * 3,9 \times 10^{-3} \quad (3.26)$$

En las consideraciones del diseño del circuito es muy importante que el sistema cuente con una referencia de voltaje muy estable, de tal forma que el valor de entrada no tenga variaciones permitiendo tener los valores indicados todo el tiempo.

3.2 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

Para el sistema de adquisición se determino el uso del protocolo NMEA debido a que cuenta con las siguientes características:

1. Cuenta con más de 7 tramas diferentes (GGA, GLL, GSA, GSV, RMC, VTG, ZDA) las cuales brindan información acerca de la posición, velocidad, tiempo, estado de la señal entre otras.
2. Cada una de las tramas contiene un máximo de 80 caracteres.
3. Contiene un Checksum el cual brinda información acerca del estado de la trama de envío.
4. El sistema cuenta con dos tramas que las envían por defecto las cuales son GPGGA, GPVTG.

El protocolo NMEA se encuentra configurado a una velocidad de transmisión de 4800 baudios, 8 bits de datos y un bit de parada sin paridad, brindando la información necesaria a 1 pulso por segundo [8]. Para el sistema de adquisición se utilizan dos tramas las cuales se encuentran descritas de la siguiente manera.

\$GPGGA,hhmmss.ss,lll.lll,a,nnnnn.nnn,b,t,uu,v.v,w.w,M,x.x,M,y.y,zzz*hh<CR><LF>

ESPACIO	INFORMACIÓN
hhmmss.ss	Tiempo UTC de la posición
lll.lll,a	Latitud de la Posición, Norte o Sur
nnnnnn.nnn, b	Longitud Este u Oeste
T	Indicador de la calidad de señal del GPS
Uu	Número de Satelites disponibles

v.v	Dilución horizontal de la posición
w.w, M	Altitud sobre el nivel del mar en metros
x.x, M	Separación Geoidal en metros.
y.y	Tiempo de los datos del GPS diferencial.
Zzzz	ID referencia de la Estación
Hh	Checksum

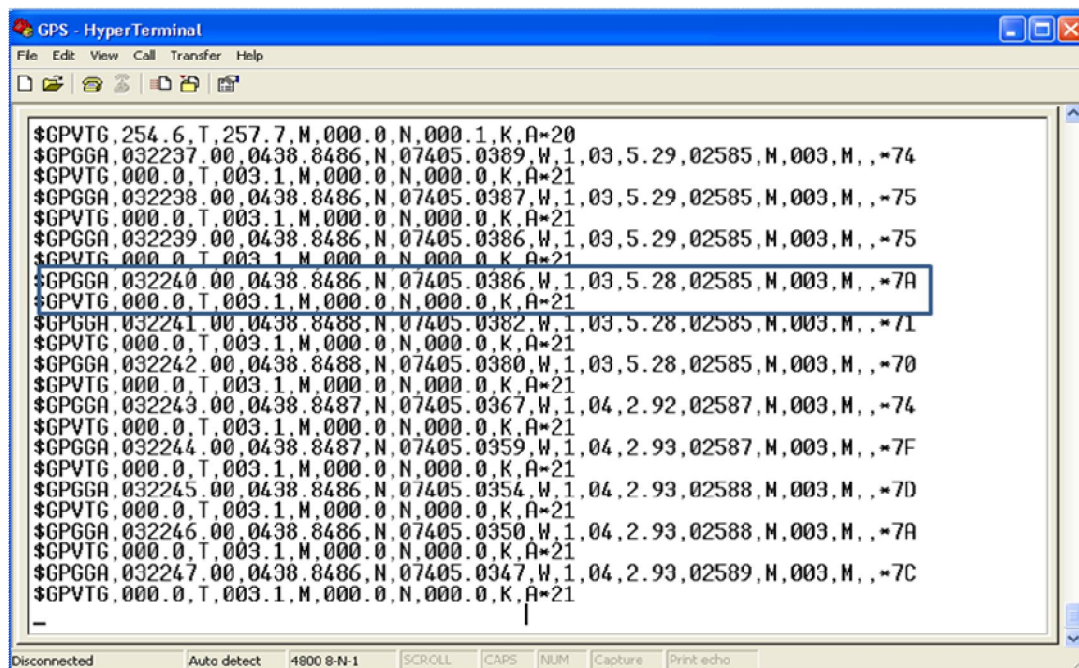
Tramas del GPS Tabla 3

\$GPVTG, x.x,T,x.x,M,x.x,N,x.x,K,i*hh<CR><LF>

ESPACIO	INFORMACIÓN
x.x,T	Camino real sobre el suelo
x.x,M	Camino real sobre el suelo (Magnético)
x.x,N	Velocidad sobre el suelo en Nodos
x.x,K	Velocidad sobre el suelo en Km
I	Indicador de Modo
Hh	Checksum

Tramas del GPS Tabla 4

Un ejemplo de las tramas se muestra en la figura 10:

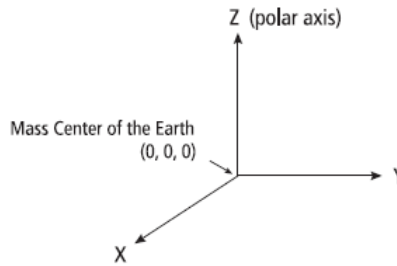


Información de tramas GPGGA y GPVTG del GPS. Figura 10

Transformación de Coordenadas

Existen diferentes formas de tener estudiar la información brindada por el GPS, comúnmente se utilizan las coordenadas de latitud altitud y longitud para describir un punto exacto sobre la superficie terrestre. A pesar de ser uno de los datos mas utilizados en el momento de determinar la ubicación es posible realizar ciertas transformaciones de coordenadas que permiten pasar estos datos a un sistema de referencia distinto, uno de estos sistema es llamado ECEF (Earth Centered, Earth Fixed), que como su nombre lo

indica, es un sistema de referencia con centro en la tierra y fijado en ese punto, y el cual da sus posiciones en los ejes x, y y z, como lo muestra en la figura 11.



Sistema de Coordenadas ECEF Figura 11

El sistema de coordenadas ECEF se encuentra representado en un sistema de referencia relacionado a una representación de mapeo, debido a que la tierra tiene una forma compleja es necesario plantear métodos de aproximación para lograr calcular la forma de la misma y así determinar de forma correcta las coordenadas.

En el momento de la implementación del sistema de adquisición se planteo el uso de coordenadas del tipo ECEF, a diferencia de las LLA, luego fue necesario realizar las operaciones que permitiera la transformación de los datos de forma correcta. Se utilizan entonces las siguientes ecuaciones:

$$X = (N + h) * \cos(\alpha) * \cos(\lambda) \quad (3.27)$$

$$Y = (N + h) * \cos(\alpha) * \sin(\lambda) \quad (3.28)$$

$$Z = \frac{b^2}{a^2} * (N + h) \sin(\alpha) \quad (3.29)$$

Donde N

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \alpha}} \quad (3.30)$$

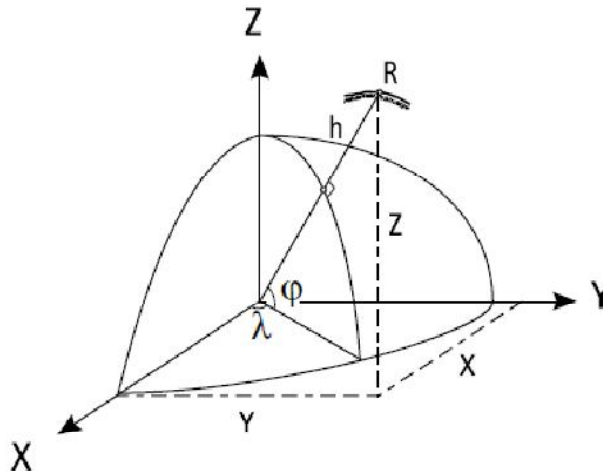
$\alpha = \textit{latitud}$
 $\lambda = \textit{longitud}$
 $h = \textit{altitud}$

Al desarrollar estas ecuaciones, es necesario tener varias consideraciones que son de importancia para conocer el error de aproximación de la posición establecida. Ya que la tierra no es totalmente redonda se determina una aproximación de elipsoide con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} &= 6378137 \\ &= (1 - \quad) = 6356752.3 \\ &= \frac{1}{298.257} \end{aligned}$$

$$= \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a}}$$

En donde a, b son los parámetros del elipsoide, e es la excentricidad y f corresponde al achatamiento [14].



Coorenadas ECEF y Elipsoide Referencia. Figura 12

Haciendo uso de estas ecuaciones fue posible implementar en el sistema de adquisición una rutina que permita el cálculo de las coordenadas de la estación base en el momento inicial de partida, y luego ir calculando la distancia de la aeronave a la estación base, realizando la diferencia de componentes y así determinando el vector equivalente.

3.3 RUTINAS MICROCONTROLADOR

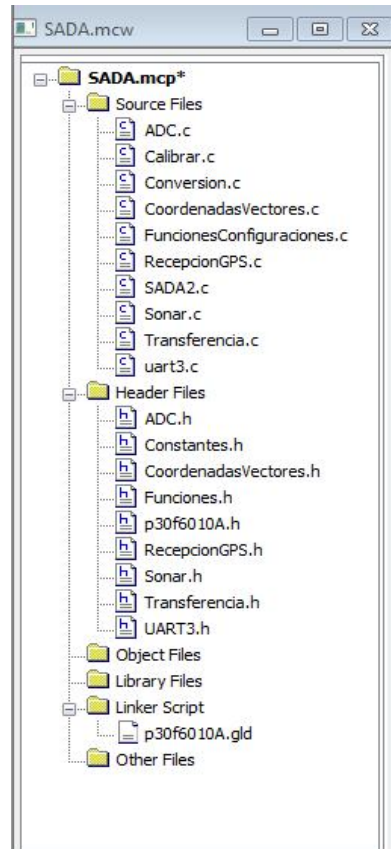
Utilizando un microcontrolador dsPIC30F6010A [15], fabricado por la empresa Microchip. Con el uso de este microcontrolador es posible realizar las comunicaciones entre las señales digitales tanto del GPS como del PC, y así mismo capturar cada una de las señales análogas brindada por los sensores.

El modo en que el microcontrolador realiza cada uno de los procedimientos se basa en el desarrollo de rutinas programadas en lenguaje C, y que a través de un ciclo continuo van cumpliendo cada uno de tareas que se requieran. La programación del microcontrolador se realiza bajo el software brindado por microchip Mplab, el cual cuenta con un compilador que permite bajar la información programada en lenguaje C a lenguaje de máquina.

El modulo de procesamiento se basa en el uso de 10 rutinas diferentes las cuales combinadas realizan todas las tareas necesarias en el microcontrolador.

- SADA2
- Funciones Configuraciones.
- Recepción GPS.
- Transferencia.
- Calibrar

- Conversión
- Uart3.
- Coordenadas Vectores
- Sonar
- ADC



Vista MPLAB Rutinas Sistema de Adquisición. Figura 13

Cada una de las rutinas del microcontrolador tiene su header (.h) asignado en donde se encuentran definidas cada una de las funciones y constantes necesarias.

Rutina Principal

- Archivo Fuente: SADA2
- Funciones: main, conversión análogo digital e interrupciones.

La rutina principal se realiza basada en un ciclo de polling o ciclo infinito en donde se van verificando cada uno de las tareas del proceso y se realizan de forma secuencial, en esta rutina es donde se llevan a cabo todas las operaciones necesarias para garantizar el buen funcionamiento del dispositivo y se encuentra dividida en diferentes tareas que dependen de las necesidades del usuario o si los tiempos se han cumplido.

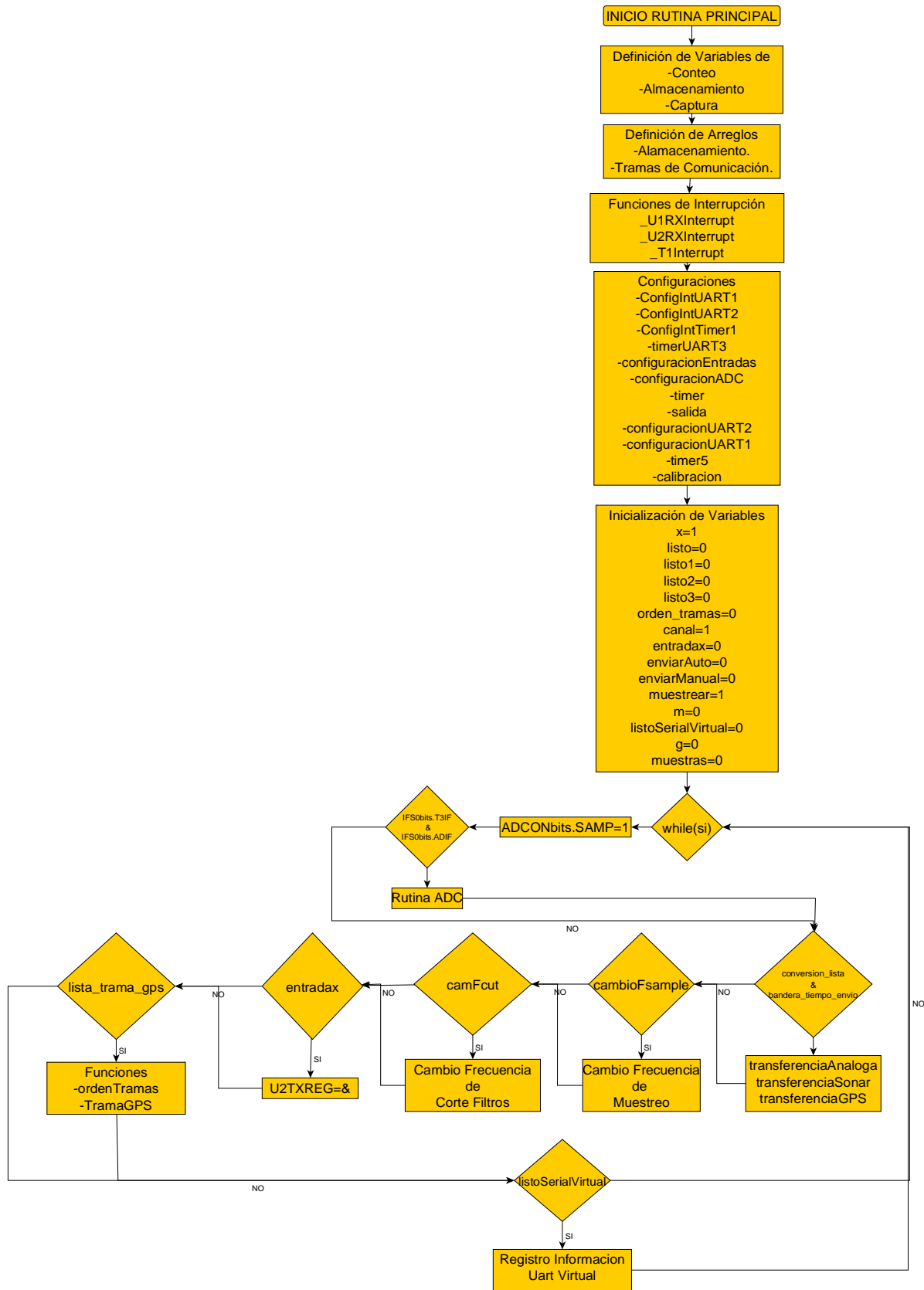


Diagrama de Flujo Rutina Principal Sistema de Adquisición. Figura 14

Conversión Análogo Digital

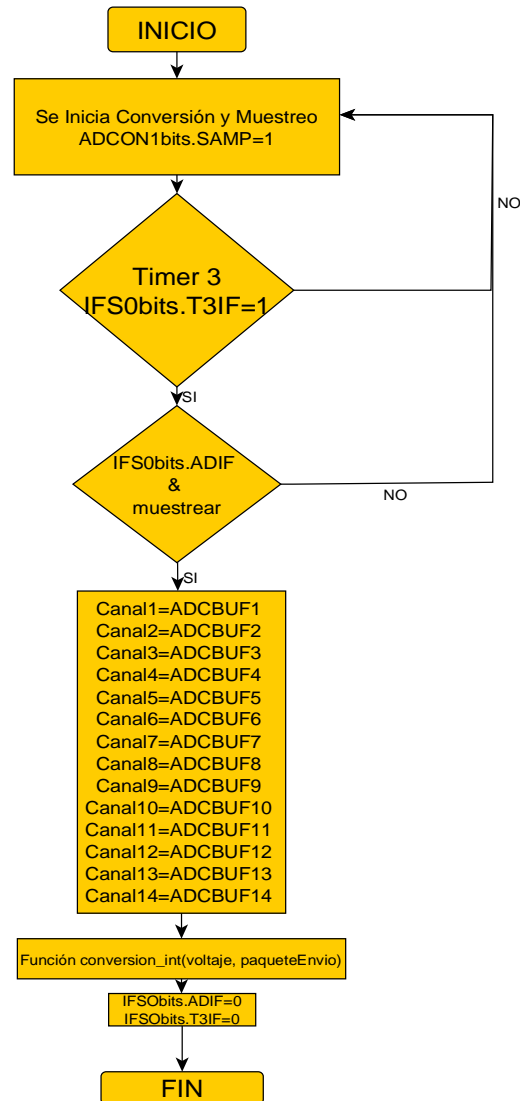


Diagrama de Flujo Conversión Análogo Digital. Figura 15

El proceso de conversión de las señales análogas a señales digitales cuenta con cuatro pasos principales como se muestra en la figura 15, que se describen a continuación:

- Se realiza la configuración del ADC de tal manera que cumpla con los requerimientos necesarios para la aplicación, esto se explicará más ampliamente en la función de configuración.
- Se inicia el proceso de muestreo habilitando el bit ADCON1bits.SAMP en 1, el circuito de sample and hold toma una muestra del dato para luego pasarlo al convertor.
- Verificación Timer: Con el fin de poder controlar los tiempos en los cuales se almacenan los datos del ADC, se utiliza el Timer 3, el cual tiene un conteo predeterminado, e indica con una bandera IFS0bits.T3IF en 1, que el conteo ha finalizado.
- Verificación Conversión: Si la conversión ha terminado la bandera de interrupción IFS0bits.ADIF en 1, indica que esta se ha culminado, luego se detiene el muestreo cambiando el bit ADCON1bits.SAMP a 0, y se inicia el almacenamiento de la información de cada uno de los buffers en un arreglo. Con el fin que los valores digitalizados sean el equivalente en voltaje, es necesario multiplicarlos por su valor de referencia $V_{ref} = V_{ref}/1024$.

Interrupción Captura Datos GPS

Una opción muy útil en el momento de trabajar de microcontroladores son las interrupciones, estas consisten en detener el procesamiento del sistema para poder ir atender una tarea previamente asignada. Es posible generar interrupciones en el sistema, debido a eventos de origen externo, pero también por tareas completadas que sea necesario atenderlas.

Para la captura de datos del modulo GPS, se implemento el uso de la interrupción del modulo de transmisión serial UART1, el cual activa la interrupción en el momento en que recibe un byte en su buffer.

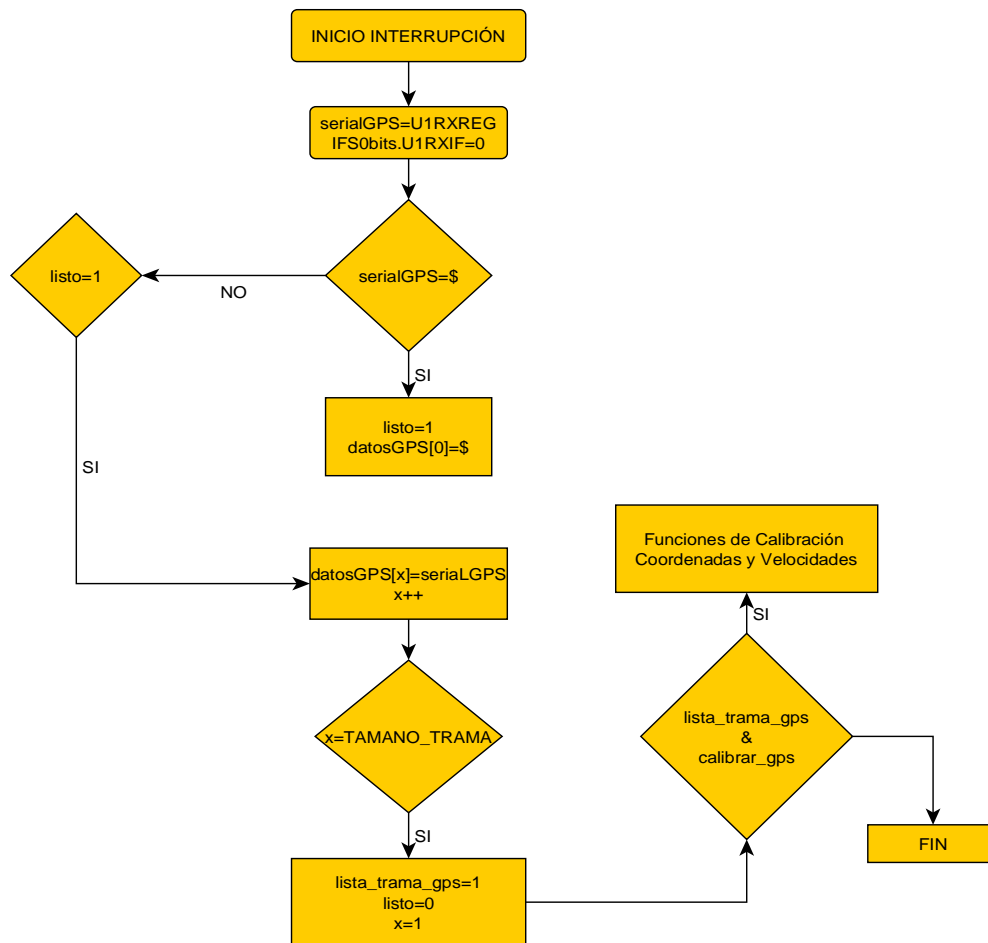


Diagrama de Flujo Interrupción Captura Datos GPS. Figura 16

El proceso que se realiza dentro de la interrupción se encuentra dividido en 2 pasos básicos:

- Una vez se ingresa a la interrupción se verifica si el carácter ingreso es un '\$', (Carácter de inicio trama GPS). Si esto es cierto se captura ese primer dato y se inicia el proceso de llenado del resto del arreglo datosGPS[]. Debido a que la interrupción se recorre una vez por cada carácter que ingresa en el buffer, es necesario siempre verificar cual carácter se está leyendo, por esta razón si el carácter recibido es diferente a '\$', es necesario determinar si ya se ha iniciado el proceso de llenado del buffer, luego se pregunta si la bandera listo se encuentra en 1, si esta condición se cumpla se continúa con la captura, pero si no se espera que ingrese de nuevo a la interrupción.
- Al verificar si la condición de listo se encuentra en 1 se continúan capturando cada uno de los datos provenientes del GPS hasta cumplir con la condición de llenado máximo del buffer el cual ocurrirá cuando el valor de 'x' llegue a TAMANO_TRAMA.

- Por últimos se verifica si las tramas capturadas fueron validas, de esta forma se habilita una bandera que permite capturar la posición inicial en donde se encuentra el GPS, de tal forma que sea posible realizar cálculos de velocidad y posición con respecto a un punto base fijo. Cada una de las funciones contenidas en el bloque de calibración se explicaran posteriormente en las funciones de coordenadas y vectores.

Interrupción Cambio Frecuencia de Corte y Frecuencia de Muestreo

Con el fin que el sistema pueda ser utilizado en distintas aplicaciones y con diferentes dispositivos, se implementaron filtros programables los cuales cambian su frecuencia de corte debido a una señal de reloj generada desde el microcontrolador, (Se explicara más detenidamente en la etapa de Circuito Impreso), de igual forma se implemento la opción de realizar cambios a la frecuencia con que cada uno de los datos iban a ser almacenados en el microcontrolador (frecuencia de muestreo).

Para lograr este objetivo se utilizo el modulo de comunicación UART2, y al igual que en el caso anterior se uso la interrupción de recepción de datos, la cual “para” el sistema en el momento en que recibe un dato.

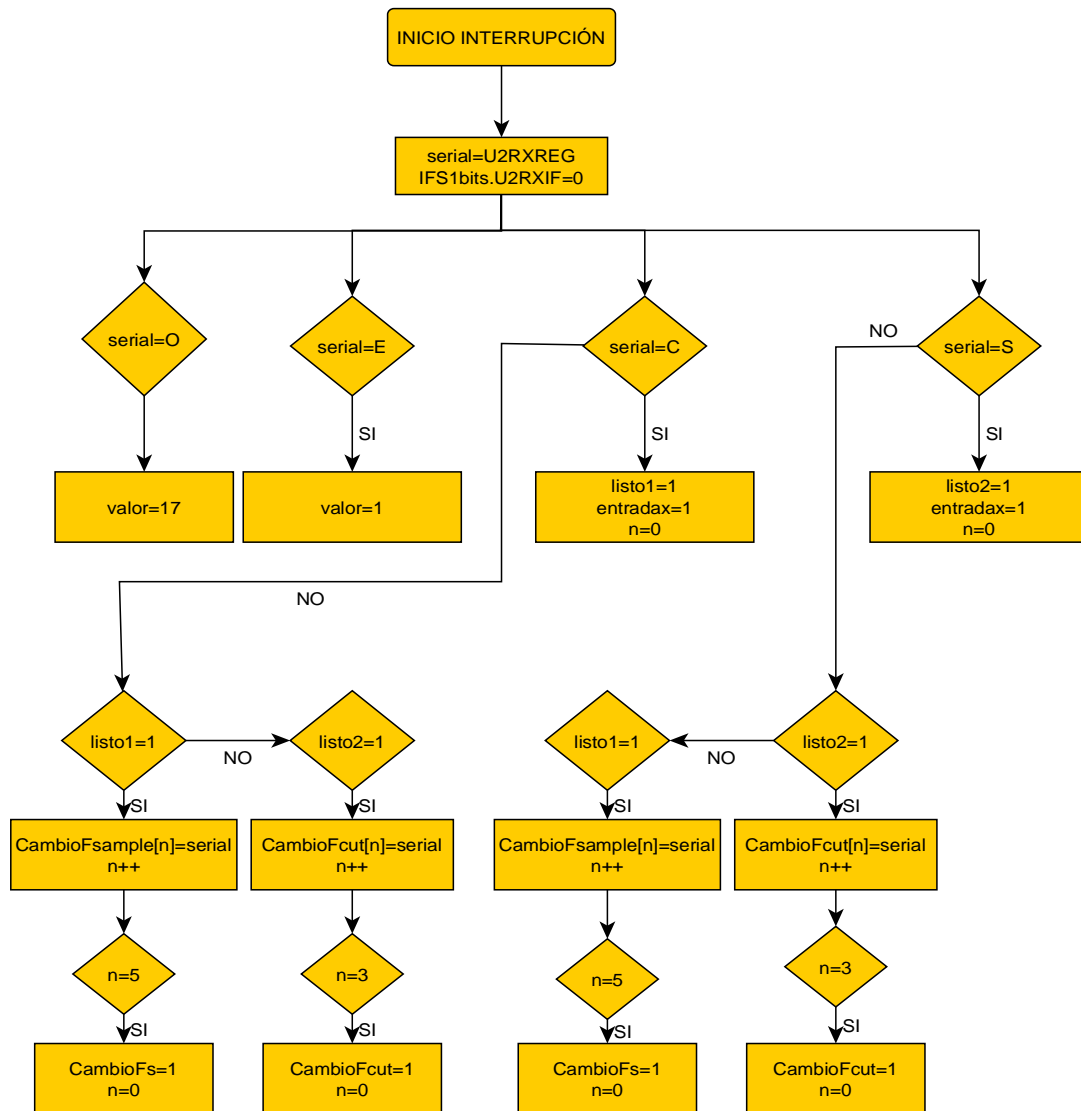


Diagrama de Flujo Interrupción Cambio Frecuencia de Corte y Cambio Frecuencia de Muestreo. Figura 17

Esta función es de gran importancia ya que le da el usuario la capacidad de manipular el sistema y cambiarle algunos de los parámetros. El funcionamiento de esta rutina se basa en el siguiente procedimiento:

- Se guarda en una variable el valor que se encuentra en el registro U2RXREG, de el modulo UART2, y se baja la bandera IFS1bits.U2RXIF que indica la interrupción.
- Se verifica el carácter que se encuentra en la variable serial.
 - serial = E: Debido a que las tramas se están enviando al computador constantemente, y a una velocidad predeterminada la cual fue calculada alrededor de los 10ms, en el momento que se realiza una simulación la variable *valor*, se define como 1, de tal forma que habilita que las tramas a ser enviadas sean transmitidas a la máxima velocidad, con el fin de poder bajar más muestras al PC. Este carácter se realiza cuando se desea realizar una captura del tipo offline.
 - serial = O: En este caso se desea mantener una comunicación online, luego el flujo de información debe ser limitado de tal forma que no se presenten errores. Para llegar a este fin la variable *valor*, se define como 17 de tal forma que llegue a transmitir cada una de las tramas cada 0,17s.
 - serial = C: Se solicita el cambio de frecuencia de corte. Se habilita la bandera listo1=1 y entradax=1 y el contador n=0.
 - serial = S: Se solicita el cambio en la frecuencia de muestreo. Se habilita la bandera listo2=1 y entradax=1 y el contador n=0.
- Si listo1=1 se registra en el arreglo CambioFsample los valores provenientes de la variables serial.
- Si listo2 =1 se registra en el arreglo CambioFcut los valores provenientes de la variables serial.
- Cuando los arreglos se encuentran llenos se habilita la bandera CambioFs o CambioFcut en 1, para cambiar la frecuencia de corte o la frecuencia de muestreo respectivamente.
- Finalmente se iguala el contador n=0.

Interrupción Timer 1

La rutina de interrupción del Timer 1 se implementa con el fin de emular un modulo de comunicación seria de 8 bits para capturar los datos de uno de los sensores. Se implemento esta rutina debido a que el microcontrolador no contaba con más módulos de comunicación serial UART, y el sonar tiene la posibilidad de comunicarse utilizando un protocolo serial. Según el fabricante del sensor, tiene establecida una comunicación serial de 5 caracteres en donde en forma de ASCII brinda la información de la altura en niveles, de igual forma la transmisión se encuentra configurada a 9600 baudios.

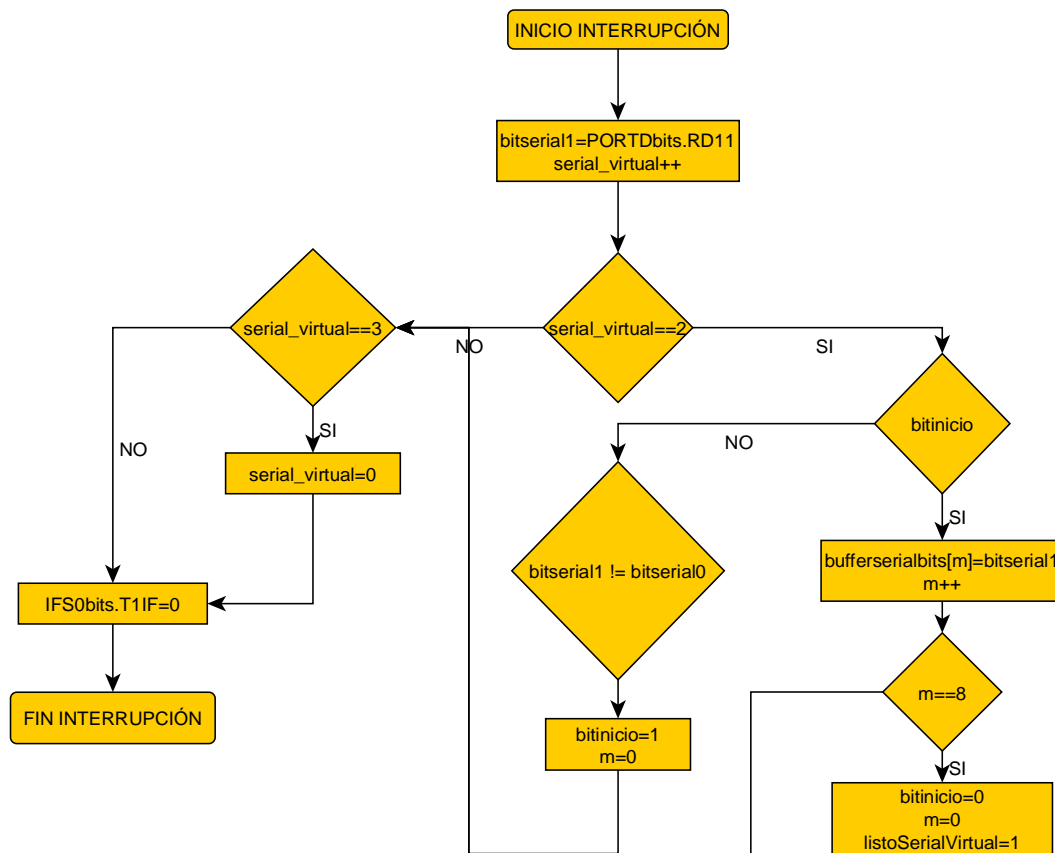


Diagrama de Flujo Captura de bits Modulo UART Emulado. Figura 18

El modulo emulado se basa en el funcionamiento del Timer 1, el cual da la velocidad a la cual se están recibiendo los datos. Debido a que la velocidad de transmisión se encuentra configurada a 9600 baudios en el sensor, el timer da el tiempo en que demora cada bit en transferirse al microcontrolador.

$$= \frac{1}{9600} = 104 \quad (3.31)$$

Con el fin de no presentar errores, en la lectura de los bits, se establece la velocidad del timer como 3 veces más rápido que la velocidad de transferencia establecida como 9600 baudios, luego la velocidad de recepción se establece como:

$$\frac{1}{(9600 * 3)} = \frac{1}{28800} = 34.7 \quad (3.31)$$

Se guarda el bit obtenido en la variable *bitserial1* y se suma un conteo a la variable *serial_virtual*, posteriormente se verifica el valor de *serial_virtual*, esto con el fin de garantizar que el bit leído se está leyendo en el centro y así disminuir los errores en la lectura. Posteriormente, *bitinicio* se verifica para saber si ya se están capturando datos, luego, si *bitinicio=1* el sistema esta capturando datos y los va guardando en el buffer *bufferseialbits* y luego aumenta el contador *m*, por cada bit que se captura se cuenta el bit de parada estableciendo una condición para el tamaño de conteo de *m*, de tal forma que si esta toma el valor de 8, significa que ya cumplió con los bits de datos, luego el buffer tiene un dato valido y se reinicia *m=0*, *listoseriavirtual=1*, con el fin de almacenar los bits ya en forma de ASCII sobre otras

funciones. Si por el contrario $bitinicio=0$, se verifica $bitserial0!=bitserial1$, de tal forma que se determine el cambio de bit de inicio y de esta forma si la verificación es verdadera, $bitinicio$ toma el valor de 1 y $m=0$.

Finalmente si el conteo de $serial_virtual=3$, se reinicia este contador a $serial_virtual=0$, con el fin de continuar contando el bit pero en el centro del mismo.

Funciones de Configuración Microcontrolador

- Archivo Fuente: FuncionesConfiguracion.c
- Funciones:
 - TimerUART3.
 - configuracionEntradas.
 - configuracionADC.
 - Timer.
 - Salida.
 - configuracionUART2.
 - configuracionUART1.
 - ConfigIntUART1.
 - ConfigIntUART2.
 - ConfigIntTimer1.
 - ConfiguracionPWM.

Configuración Timers.

Las funciones que configuran los timers cuentan con los mismo registros, pero difieren el uno del otro dependiendo de los conteos o en los divisores de frecuencia que se utilicen. La tabla 4, muestra la forma en la cual fueron configurados cada uno.

Función	PRx	Reloj Interno	Pre Escaler
timerUART3	1020	SI	1:1
timer	2940	SI	1:1
Timer5	1148	SI	1:256

Configuración Timers 1, 3, 5. Tabla 5

El registro PRx indica el valor máximo de conteo al que debe llegar cada uno de los timers para cumplir con el periodo deseado. La indicación de reloj interno se refiere al reloj con el cual el timer va a cumplir los tiempos ya que estos tienen la opción de sincronizarse con fuentes de reloj externas. Finalmente el valor de pre escaler indica el valor al cual se desea dividir la frecuencia. En el caso para las funciones *timerUART3* y *timer* el pre escaler se encuentra en el valor de 1 debido a que es necesario que el reloj con el que se trabaje sea de alta velocidad, por el contrario el *timer5* tiene un preescaler de alto valor ya que este no se desea que tenga cambios muy rápidos, tales como los tiempos de transferencia de la UART que se encuentra comunicándose hacia el computador.

Configuración I/O

Las funciones que configuran los puertos de I/O son *configuraciónEntradas* y *Salida*, utilizan los registros TRISx, los cuales habilitan cada puerto que se desea utilizar, asignando un 1 en el caso de entrada y un 0 si se desea tener como salida. Para el caso de las entradas del conversor análogo digital cada uno de los

puertos a usar, será asignado como entrada, y luego se hará una configuración dentro del modulo del conversor indicando que estas entradas son del tipo análogo.

Configuración ADC

El modo como se encuentre configurado el ADC es de vital importancia para tener una buena adquisición de los datos análogos.

El ADC del sistema de adquisición se encuentra configurado de la siguiente manera:

- ADPCFG Todas las entradas asignadas en la configuración de puertos de entrada salida son entradas análogas.
- ASAM: Se encuentra configurado para que el sistema funcione cuando el bit SAMP se encuentre en alto, de forma automática.
- FORM: El formato de salida de los datos del buffer se da de tipo entero (int) con signo.
- ALTS: Debido a que el modulo cuenta con 4 diferentes Mux de entrada, se elije trabajar con el Mux A para todos los canales.
- BUFM: La información dada por los buffer del ADC será en un formato de 16bits.
- SMPI: Se determina que la bandera de interrupción se activara cada vez que el conversor haya realizado 16 conversiones.
- VCFG: La configuración de los voltajes referencia utiliza una referencia de voltaje externa.
- ADCS: El reloj de conversión se escoge a 3 Tcy.

$$= \frac{1}{4} \quad (3.32)$$

$$= \frac{1}{4} = \frac{4}{100} = 33.3 \quad (3.33)$$

$$= 3 * \quad = 100 \quad (3.34)$$

- SAMC: El tiempo de muestreo se encuentra configurado como 31TAD.

$$= 31 * \quad = 3.1 \quad = 12 * \quad = 1.2 \quad (3.35)$$

$$+ \quad = 4,38 \quad \rightarrow \quad = \frac{1}{4.38} \quad (3.36)$$

$$= 227,9$$

Es necesario resaltar que la frecuencia de muestreo real es establecida por el Timer3 ya que es quien va a dar la bandera de entrada para almacenar cada una de las muestras.

Configuración Módulos UART

Al igual que en el caso de los timer los módulos UART cuentan con registros muy similares en su configuración. En la tabla 5 se muestran los principales registros de configuración.

Función	PDSEL	STSEL	URXISEL	UxBRG
configuracionUART1	8 bits de datos, sin paridad	1 bit de parada	Se interrumpe al recibir un carácter	4800

configuracionUART2	8 bits de datos, sin paridad	1 bit de parada	Se interrumpe al recibir un carácter	115200
--------------------	---------------------------------	-----------------	--	--------

Configuración módulos UART Tabla 6

PDSEL: Configura las características del dato de entrada y de envío.

STSEL: Asigna las características que indica la finalización del byte recibido o enviado.

URXISEL: Se configura para determinar cada cuanto se desea realizar la interrupción, que indica que un dato fue transferido o capturado.

UxBRG: Indica la velocidad con la cual se realizara la comunicación de cada uno de los módulos tanto con el PC como con el GPS.

Configuración de las Interrupciones

Debido a que se están utilizando 3 interrupciones para realizar la captura de los datos de forma serial, tanto en los dos módulos UART del microcontrolador como en el modulo emulado, es necesario habilitar cada una de las interrupciones y darles una prioridad especifica.

Cuando a un modulo se le habilita una interrupción es necesario determinar un nivel de prioridad en el cual se desea que el sistema atienda esta interrupción. Los niveles de prioridad se encuentra divididos del 1 al 7, donde 7 indica la mayor prioridad en el proceso; estas prioridades se dan con el fin de generar un orden en el que se deben atender cada una de las interrupciones, en el caso en que se den dos simultáneamente.

Los microcontroladores cuentan con su propio registro de interrupciones predeterminado dado por el fabricante que indica la prioridad de cada una de ellas, este registro es modificado en el momento en que el usuario configura una prioridad diferente a un determinado modulo.

Las funciones de configuración de las interrupciones utilizadas son:

- ConfigIntUART1.
- ConfigIntUART2.
- ConfigIntTimer1.

Se encuentran configuradas con un nivel de prioridad 3, 4, 2 respectivamente dado a la importancia de las señales que cada una obtiene.

Configuración PWM

El modulo de PWM del microcontrolador permite generar señales de periodo y ciclo útil variables, este modulo se implemento con el fin de generar las señales de reloj de los filtro de antialiasing para poder generar la frecuencia de corte necesaria.

Este modulo cuenta con varios registros de configuración:

- PMOD1: Se habilita el modulo 1 de PWM.
- PEN1L y PEN1H: Se habilitan las dos salidas del modulo 1 de PWM para trabajar de forma independiente.
- UDIS: Se deshabilita este registro con el fin de poder realizar variaciones tanto al ciclo útil como al periodo de la señal de salida del PWM.

Con el fin de no capturar información errónea fueron creadas dos funciones que determinan si las tramas que fueron recibidas contienen datos validos. Los siguientes diagramas de flujo muestra el procedimiento para cumplir con este propósito.

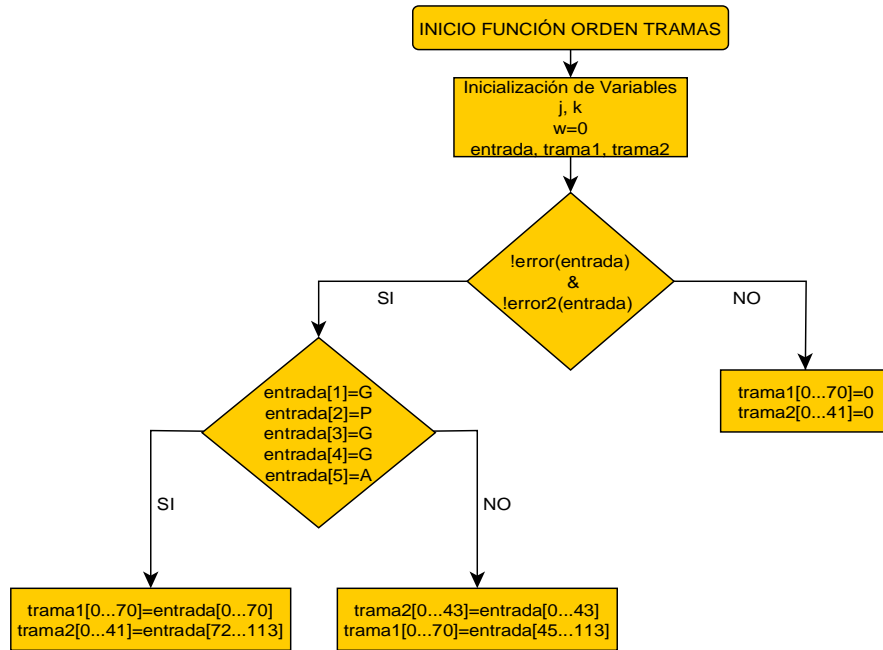
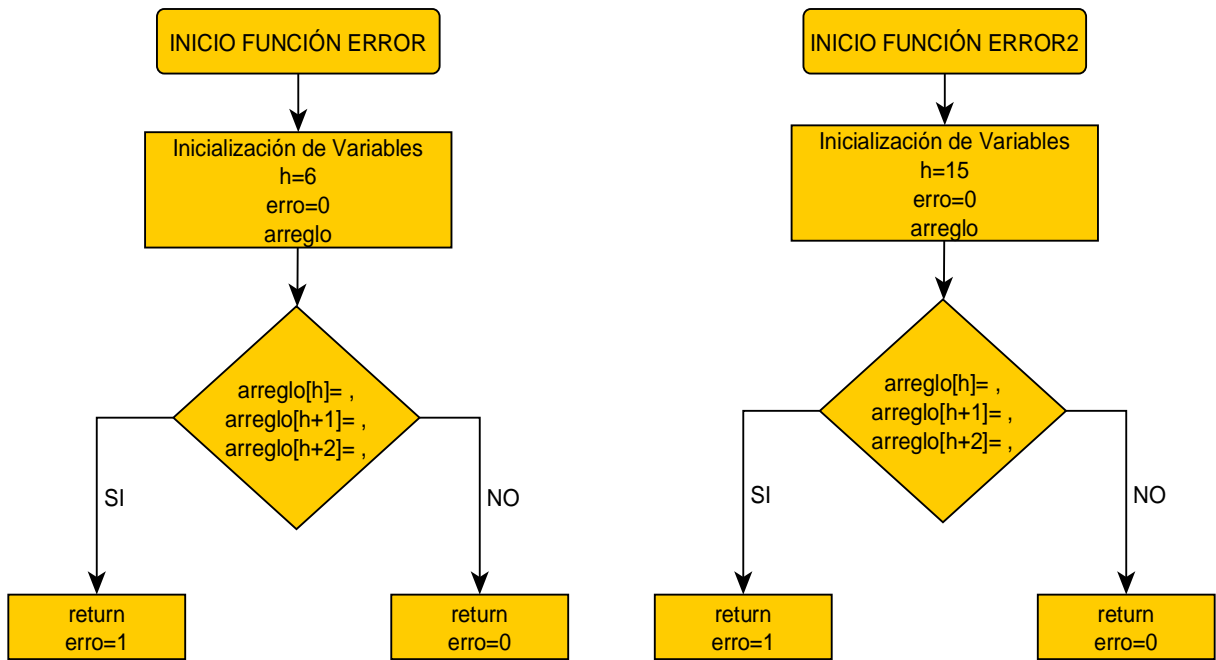


Diagrama de Flujo Función que Organiza las tramas del GPS. Figura 20



Funciones de Error para determinar si las Tramas Capturadas del GPS contienen datos validos. Figura 21

Las dos funciones de error fundamentan su funcionamiento en la manera en que el GPS, envía cada uno de sus datos. Dado que cada una de las tramas contiene 5 caracteres de inicio, (figura 19), se cuentan si hay 5 comas seguidas, si esto se cumple quiere decir que el GPS no está enviando datos validos, luego la matrices en las cuales se organizan las tramas se llenan de ceros tal como lo muestra el diagrama de organización de tramas.

Modulo UART virtual

El modulo de UART virtual se encuentra dividido en dos partes, el primero se realiza dentro de la interrupción del Timer 1 en donde cada uno de los bits son capturados y guardados en un arreglo, el segundo paso para completar el modulo de la UART virtual consiste en decodificar cada uno de los bits obtenidos, para concatenarlos en un byte total, el cual será el caracteres obtenido.

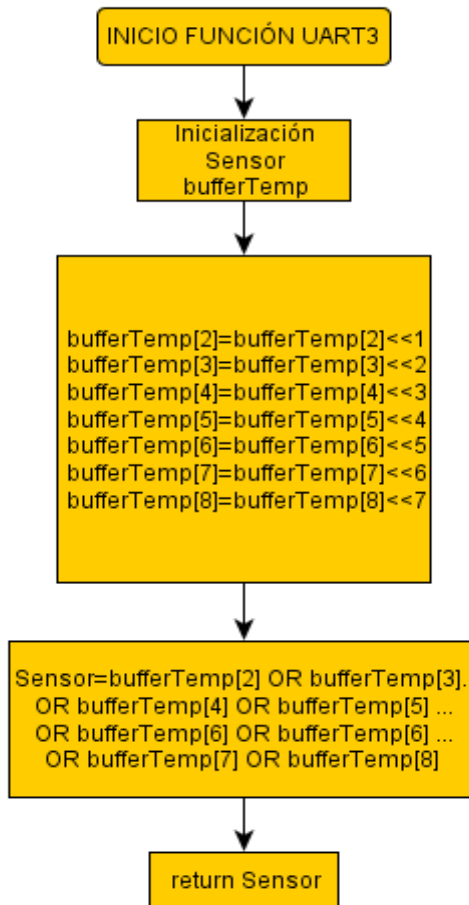


Diagrama de Flujo Modulo UART3. Figura 22

Como se describe en el diagrama la manera de decodificar cada uno de los bits es realizar un corrimiento de cada uno de los mismos a la posición correspondiente de llegada desde el más significativo hasta el menos significativo, luego se realiza una OR comparando bit a bit el registro y como resultado se obtiene el carácter correspondiente de recepción. Es importante resaltar que el proceso de la interrupción fue desarrollado bajo la rutina principal en el archivo fuente SADA2.

Función de Calibración

Esta función fue creada con el fin de ser implementada posteriormente, con el fin de determinar la posición inicial del aeronave. Cada uno de las señales de los sensores se encuentran estandarizadas en un valor fijo, este valor se ve reflejado en un voltaje, el cual dará información acerca del rango de trabajo y establecerá la posición cero desde la cual se tiene el sensor.

Con el propósito de obtener este estado cero de cada uno de los sensores, se establece una rutina de calibración la cual se encargara en el momento de encendido del sistema de garantizar obtener el valor inicial adecuado para posteriormente poder determinar las dimensiones necesarias en los datos de salida.

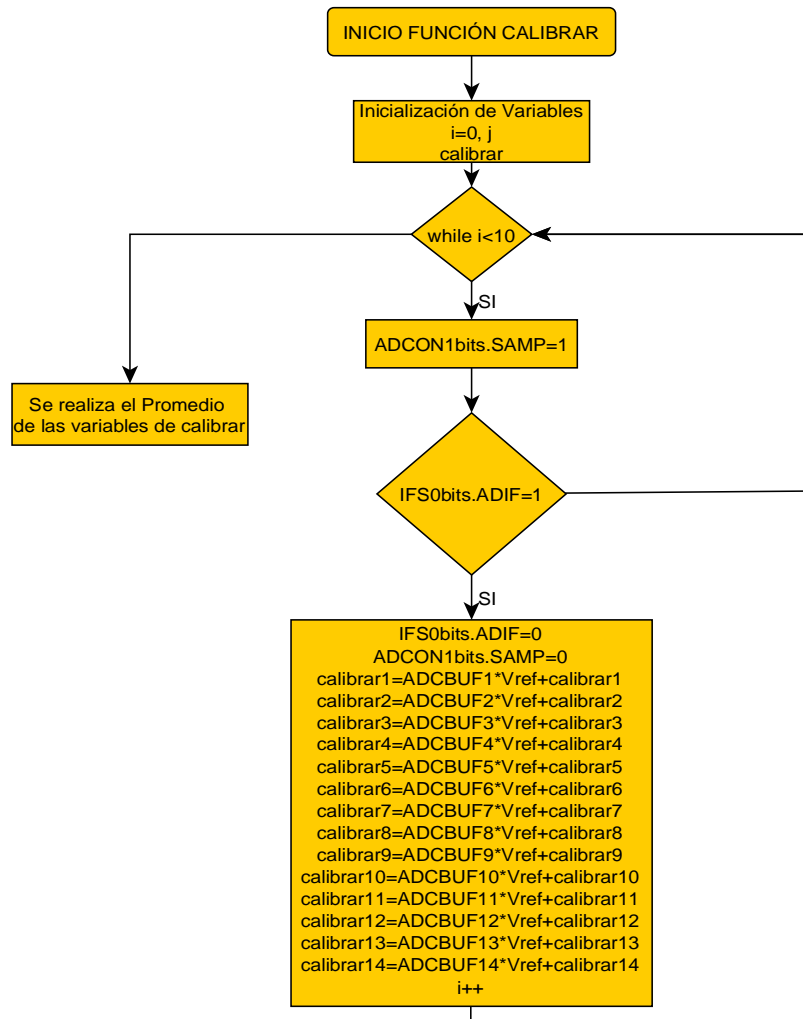


Diagrama de Flujo Función Calibrar. Figura 23

El procedimiento de calibración consiste en tomar 10 muestras diferentes de las señales de entrada mientras en el sistema se encuentra quieto, luego se divide el valor total por la cantidad de muestras tomadas de tal forma que se obtiene el promedio de cada uno de esos valores teniendo como resultado un valor de referencia estable para poder realizar luego las conversiones a las unidades correspondientes.

Esta función fue diseñada con el fin de realizar un futuro control del sistema utilizando el microcontrolador, toda vez que permite determinar la posición inicial del aeronave y de esta forma, logra realizar sus operaciones desde este punto inicial. Para el funcionamiento de la transferencia de datos tanto offline como online no fue implementada.

Transferencia

- Archivo fuente: Transferencia.c
- Funciones: llenado, transmisionAnalog, transmisiónSonar, transmisionGPS, tramaGPS, conversión_GPS, conversión_GPS_V, conversión_int.

La transferencia de los datos hacia el PC, se realiza siguiendo un procedimiento que garantice un orden en cada una de las tareas a realizar. Como primera medida una vez las señales análogas fueron muestreadas y cargadas en un arreglo, luego se dado que este arreglo es del tipo int debido a que la señal muestreada es

de 10bits, pero es almacenada en un buffer de 16bits, se divide en dos paquetes de 8 bits para ser transmitidos, cada uno de los canales debe estar en una posición pre-establecida con el fin de que en el momento que el computador los procese este sepa en qué orden va llegando la información.

La información adquirida del GPS debe ser también pre-procesada por que mucha de la información contenida en las tramas de captura no es necesaria, luego se filtra la información deseada organizando cada una de las tramas y se almacena en un arreglo, el cual posteriormente será enviado al PC. Finalmente en el sonar, después de capturar cada uno de los caracteres se realiza un procesamiento de los datos y se determina su equivalente en distancia, para luego ser enviado al PC.

La manera en cómo trabajan estas funciones se explicara más detalladamente en los diagramas de flujo.

Función Conversión_int, Conversion_GPS, Conversion_GPS_V

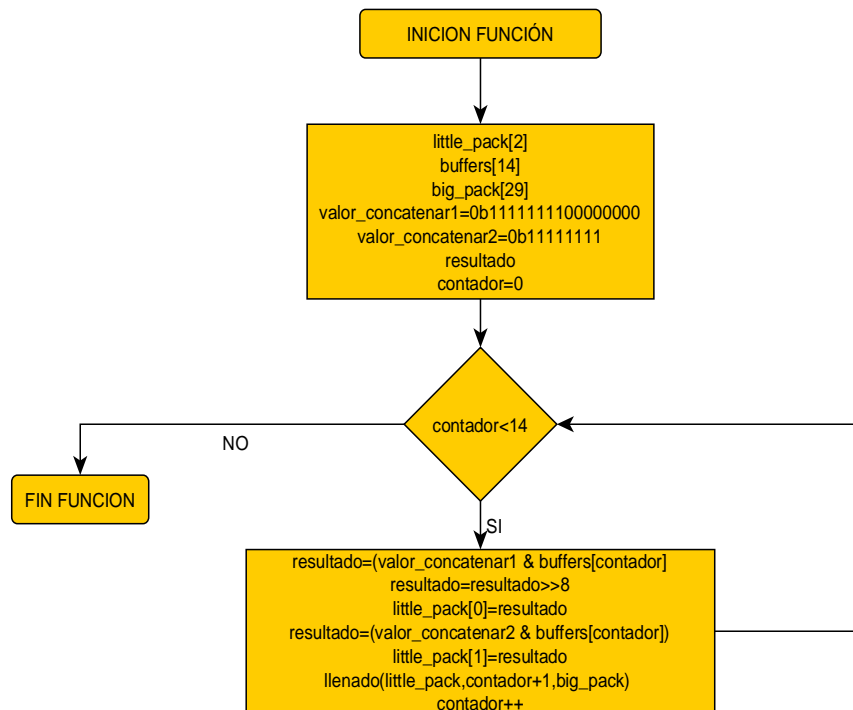


Diagrama de Flujo proceso de conversión de Buffers ADC. Figura 24

Las funciones de *conversión*, se diseñaron empleando dos métodos diferentes dependiendo de las variables a muestrear. La conversión se dividió entre analógica y digitales. Para el caso de las variables analógicas con el fin de obtener una mayor velocidad de procesamiento y poder tener cada una de las variables actualizadas en menor tiempo, se toma el valor contenido en los buffers directamente, sin realizar ningún procesamiento sobre la variable, dado que este buffer se encuentra conformado por 16 bits, se divide en dos paquetes de 10bits y se almacena en una variable de tal forma que sea posible transferirlo a la función de llenado, para ser empaquetada en un arreglo en el orden da cada canal de entrada. Este proceso fue realizado de esta manera debido a que la función *sprintf()*, para este caso podía generar retardos en el muestreo, y por lo tanto una transmisión de datos lenta, lo que iba a generar una errónea captura de información por parte del PC cuando se quisieran muestrear señales de frecuencias relativamente altas. La función de conversión analógica fue llamada *conversión_int*.

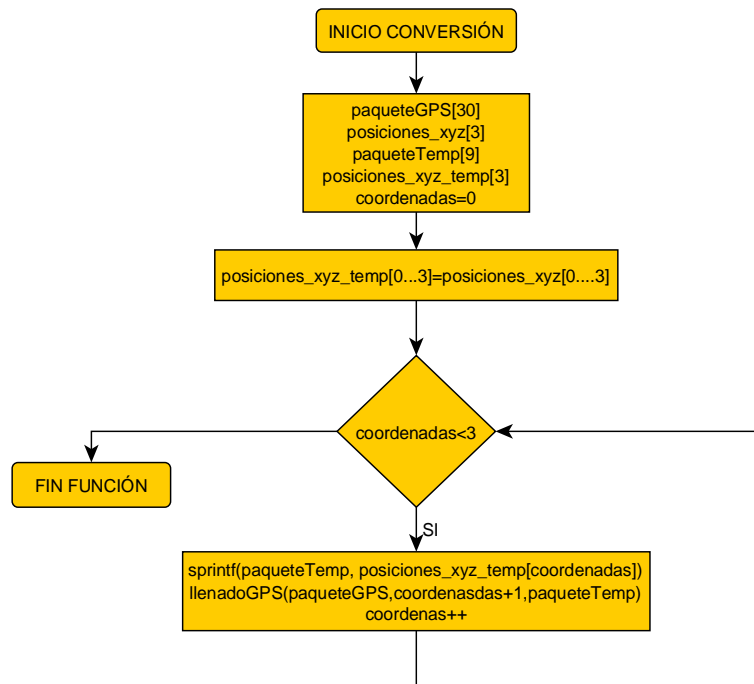


Diagrama Función Conversión_GPS. Figura 25

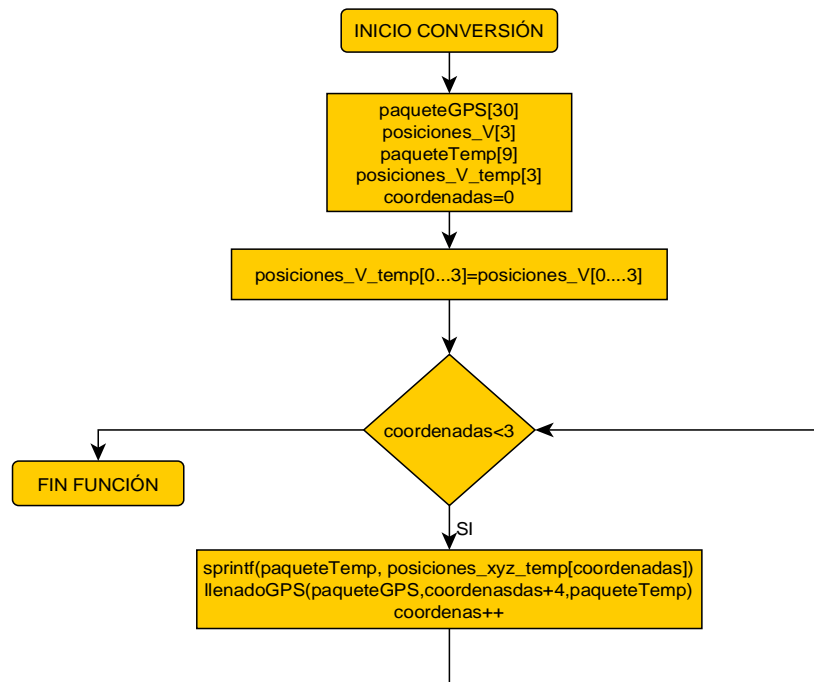


Diagrama Función Conversión_GPS_V. Figura 26

Para el caso de las señales del GPS, estas señales fueron procesadas con el fin de realizar un cambio de coordenadas que se realiza en la función LLA_ECEF, la cual es explicada posteriormente, luego cada una de estas señales es transformada a carácter utilizando la función *sprintf()*, y es enviada es empaquetada en una trama para ser enviada al PC. Para este caso fueron utilizados las funciones *conversión_GPS*, *conversión_GPS_V*. En los diagramas anteriores se muestra más detenidamente este procedimiento.

Función Llenado, llenado_GPS

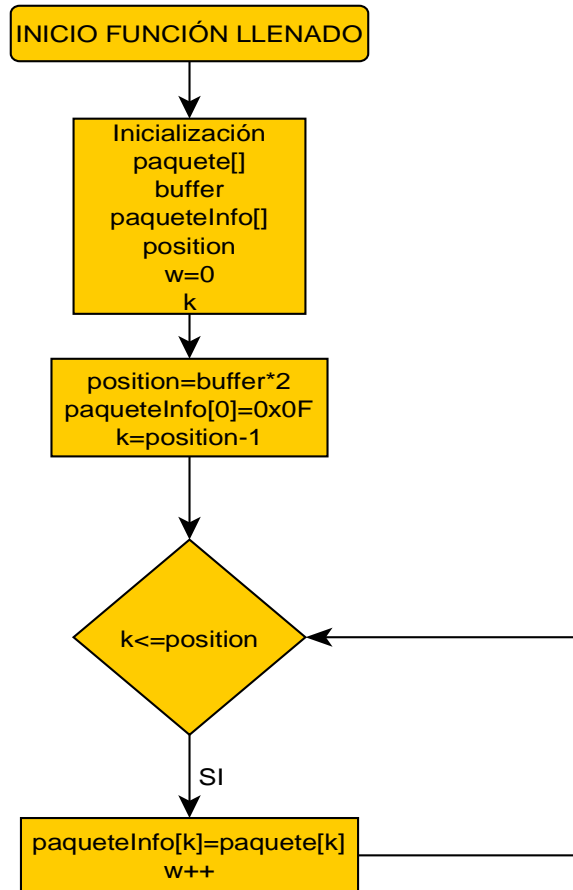


Diagrama de Flujo Función Llenado. Figura 27

La función *llenado* se basa en tomar cada una de las variables transformadas y guardarlas en el arreglo de envío llamado *paqueteInfo*. La manera en que esta función trabaja es tomar el canal que se está evaluando, el cual se ingresa a la función, luego se determina la posición que debe tener este el arreglo de *paqueteInfo*, multiplicando el *buffer* por el valor de 2, esto se realiza debido a que cada canal dará su información en 2 caracteres diferentes.

Para el caso de la función GPS, se utiliza un procedimiento similar, pero con la diferencia que los caracteres enviados son 6, esto se realiza debido a que el muestreo del GPS es cada segundo, luego la transformación de las variables es posible tener más tiempo para realizarla.

Funciones Transferencia

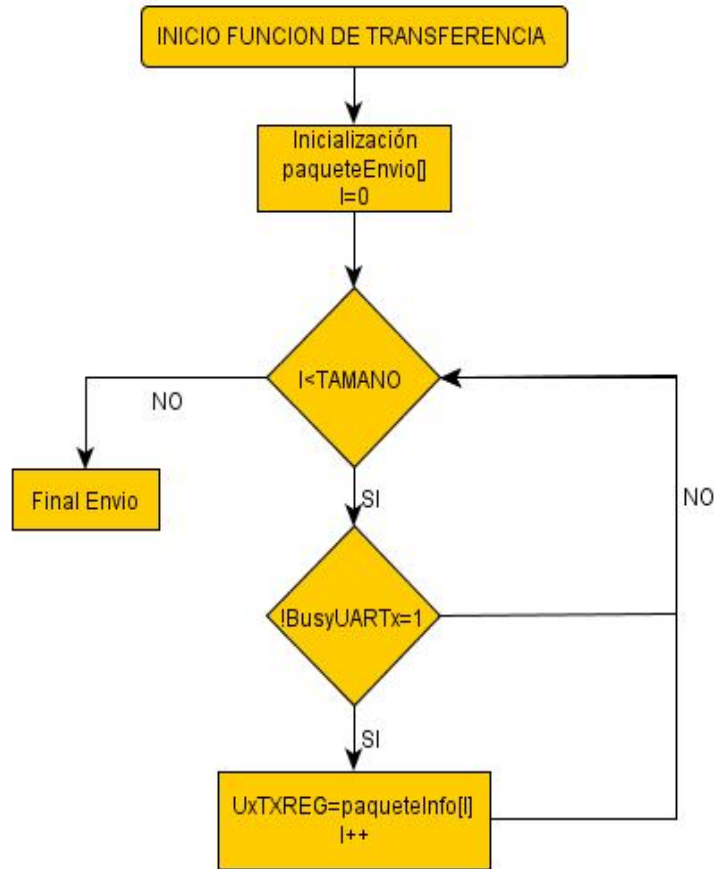


Diagrama de Flujo Función Transferencia. Figura 28

Las tres funciones de transferencia se basan en el mismo procedimiento, donde cada uno de los datos contenidos en el arreglo `paqueteEnvio[]`, dado que se encuentran en formato ASCII, (1 byte), son cargados uno a uno al arreglo `UxTXREG`, de tal forma que pueda ser enviado. La diferencia que existe entre las funciones se da en la cantidad de datos que se envían al PC. La función *transferenciaAnaloga* envía 29 datos, la función *transferenciaGPS* envía 30 datos y la función de *transferenciaSonar* envía 4 datos.

Rutina Sonar

- Archivo Fuente: `Sonar.c`
- Función: `ordenConversión`

La rutina Sonar convierte los valores obtenidos a través del modulo serial virtual UART3 y determina su equivalente en metros, este procedimiento lo realiza tomando el vector que contiene los datos seriales y utilizando la función `atof()` contenida en la librería `stdlib.h` del estándar ANSI C, la cual convierte los valores del vector en el número equivalente en formato double, luego este valor es multiplicado por un factor de escala el cual se muestra en el diagrama y finalmente se retorna el valor de la altura equivalente.

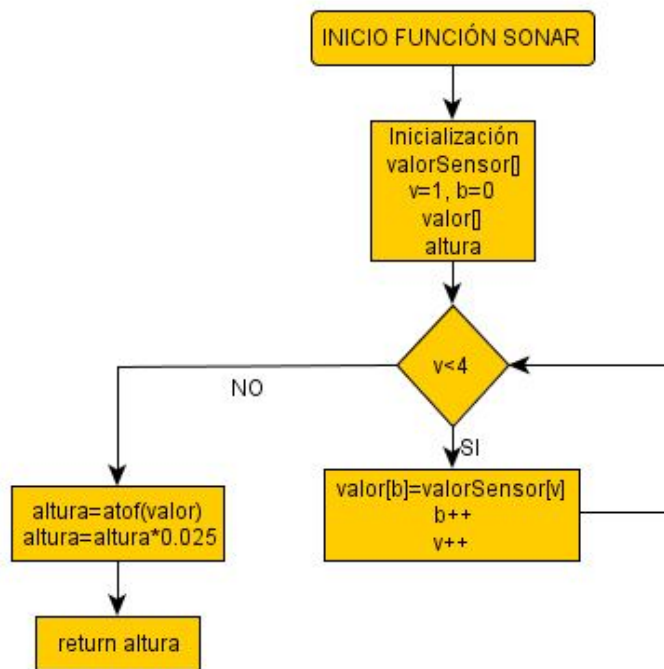


Diagrama Función Sonar. Figura 29

Coordenadas Vectores

- Archivo fuente: CoordenadasVectores.c
- Funciones: radianes_latitud, radianes_longitud, latitud_calc, longitud_calc, altitud_calc, coordenadasBase, X_coor, Y_coor, X_coor, LLA_ECEF, posicionQuad, velocidad_Vx_Vy_Vz.

Las diferentes funciones contenidas en el archivo fuente, fueron creadas con el fin de brindar datos que son de vital importancia para desarrollar un controlador que permita determinar la posición del aeronave en la tierra. Dado que el GPS brinda datos sobre la latitud, altitud y longitud, estos datos dan información sobre un punto en el superficie de la tierra, pero con el fin de realizar un futuro control se realiza una transformación de tal forma que sea posible determinar las coordenadas en X, Y, Z, referenciadas al centro de la tierra, de tal forma que se establece un eje de coordenadas en el cual es posible ubicar el aeronave [14].

radianes_latitud y radianes_longitud

Dado que los datos suministrados por el GPS se encuentran en grados, minutos y segundos, es necesario realizar algunas conversiones, con el fin de tener estos valores en radianes para poderlos aplicar a funciones trigonométricas contenidas en las transformaciones de coordenadas. El procedimiento es el siguiente:

1. Se toman los grados contenidos en el vector que brinda el GPS, y se transforman a una variable del tipo float que me permita realizar operaciones.
2. Se clasifican los minutos, y son divididos entre 60 (1 minuto son 60 segundos), luego se suman los grados obtenidos anteriormente con los segundos ya divididos y se multiplican por $\pi/180$.

latitud_calc, longitud_calc, altitud_calc.

Cada uno de los datos suministrados por el GPS, se encuentran en formato ASCII, es necesario realizar una transformación de cada uno de estos datos a variables con las cuales sea posible realizar operaciones matemáticas. El procedimiento para obtener cada una de estas variables se repite de igual forma de la siguiente manera.

1. Se toma la trama GPGGA en donde se encuentran contenidos los datos de latitud, longitud y altitud, y se clasifica dependiendo de la función como cada uno de los nombres lo indica en el títulos, luego dado que esta trama viene conformada por 70 caracteres, se cuentan cada una de las posiciones y se almacenan en un vector de caracteres nuevo.
2. Dado que los valores de latitud y longitud contienen caracteres como N o S (Norte o Sur), E o W (Este u Oeste), es necesario realizar una clasificación del vector anteriormente creado con el fin de no convertir caracteres con letras a números.
3. Finalmente se toma el carácter de números, se convierte a radianes utilizando las funciones explicadas en el numeral anterior, y se verifica la letra con el fin de determinar si es positivo o negativo el valor final de las coordenadas. Para el caso de S y W las coordenadas tendrán valores negativos.

Este procedimiento de conteo y clasificación es realizado en las tres funciones, la única función que presenta alguna diferencia será la dada por la altitud dado que esta no contiene ningún carácter con alguna letra, luego no es necesario realizar ninguna operación [14]

X_coor, Y_coor, Z_coor

En estas funciones se realizará el procedimiento de transformación de cada una de las variables de latitud, longitud y altitud a X, Y y Z. Cada una de estas nuevas coordenadas estarán referenciadas al centro de la tierra.

Para realizar las transformaciones, es necesario utilizar las ecuaciones planteadas en el capítulo 3.2.1 del GPS, y así poder calcular el nuevo sistema de coordenadas. [14]

LLA_ECEF

Se realiza esta función con el fin de dar mayor facilidad a la lectura del código principal. En esta función ingresan dos vectores, el primero va a contener los valores de salida en donde serán almacenados los valores de las coordenadas transformadas a X, Y y Z, y el segunda será la trama total GPGGA con sus 70 caracteres. Dentro de esta función estarán contenidas las seis funciones anteriores, latitud_calc, longitud_calc, altitud_calc, X_coor, Y_coor, Z_coor. [14]

posicionQuad

En el código principal, se realiza un proceso de calibración tanto de las variables análogas como de las digitales, con el fin de lograr determinar la posición inicial en la cual se encuentra. Una vez se calcula

estas coordenadas, es posible operar con ellas, con el fin de determinar la posición de la aeronave. A la función posiciónQuad ingresan 3 vectores, el primero cuenta con la posición de la base, la cual fue obtenida en el proceso de calibración y será fijo durante todo el proceso, el segundo es la posición del aeronave el cual irá cambiando a medida que esta se vaya moviendo, y finalmente un vector de salida el cual guardara cada una de las tres posiciones con respecto a la base.

Con el fin de obtener el vector de salida se realiza continuamente la diferencia entre el vector base, y el vector de la posición del aeronave con el fin de determinar la distancia en metros a la cual se encuentra la aeronave en cada una de las coordenadas X, Y y Z.

velocidad_Vx_Vy_Vz

Con el fin de conocer la velocidad de desplazamiento en cada una de las coordenadas se calcula la velocidad realizando la diferencia entre la posición actual y la posición anterior calculadas anteriormente, y dividiéndola por el tiempo de muestreo, debido a que el tiempo de muestreo es de 1s dado por el GPS, se divide por 1, obteniendo así la velocidad en metros/segundo. Finalmente la posición actual es reemplazada como posición anterior para realizar la siguiente operación.

3.4 COMUNICACIONES

Transmisión de datos Variables Análogas

El objetivo fundamental de un sistema de adquisición, se basa en la obtención de los datos de cada una de las variables con las cuales se encuentran trabajando y la visualización en tiempo real de las mismas a modo de graficas o de forma numérica a través de una interfaz. Con el fin de cumplir con este objetivo, el sistema de adquisición para la aeronave cuenta con un mecanismo que permita la verificación y visualización de las variables de la aeronave el cual se basa en la utilización del modulo UART del micro controlador el cual brinda una conexión serial y utiliza el estándar de comunicación RS-232, a través de este modulo es posible descargar la información del sistema a un computador que cuente con la capacidad suficiente para poder almacenar la información.

A medida que se va realizando la digitalización de las señales, cada una de las variables son almacenadas en un arreglo dependiendo del canal a través del cual fueron adquiridas, dado que cada una de estas variables se encuentran en un formato binario de datos del tipo entero almacenados en un vector de 16bits, dado que el protocolo serial se encuentra diseñado para transmitir un dato representado por 8 bits, es necesario dividir en dos de tal forma que sea posible realizar el envío. Realizando operaciones lógicas como ANDs y ORs se separa el byte más significativo y el menos significativo en dos vectores, de 8 bits, estos valores son los niveles equivalentes dados por el ADC, en cada uno de los buffers. Al no realizar ninguna operación de conversión es posible mantener una comunicación más rápida entre el microcontrolador y el PC, toda vez que se están enviando los bytes equivalentes y no una transformación del mismo a un formato diferente.

Para el envío de los datos contenidos en la trama es necesario configurar ciertas características tanto del micro controlador como del computador de tal forma que exista un sincronismo entre los mismos, es por esto que se determina que el envío debe contar con 8 bits de datos, un bit de parada, y sin chequeo de paridad, por otro lado, dado que la respuesta del sistema debe ser lo suficientemente rápida para que sea

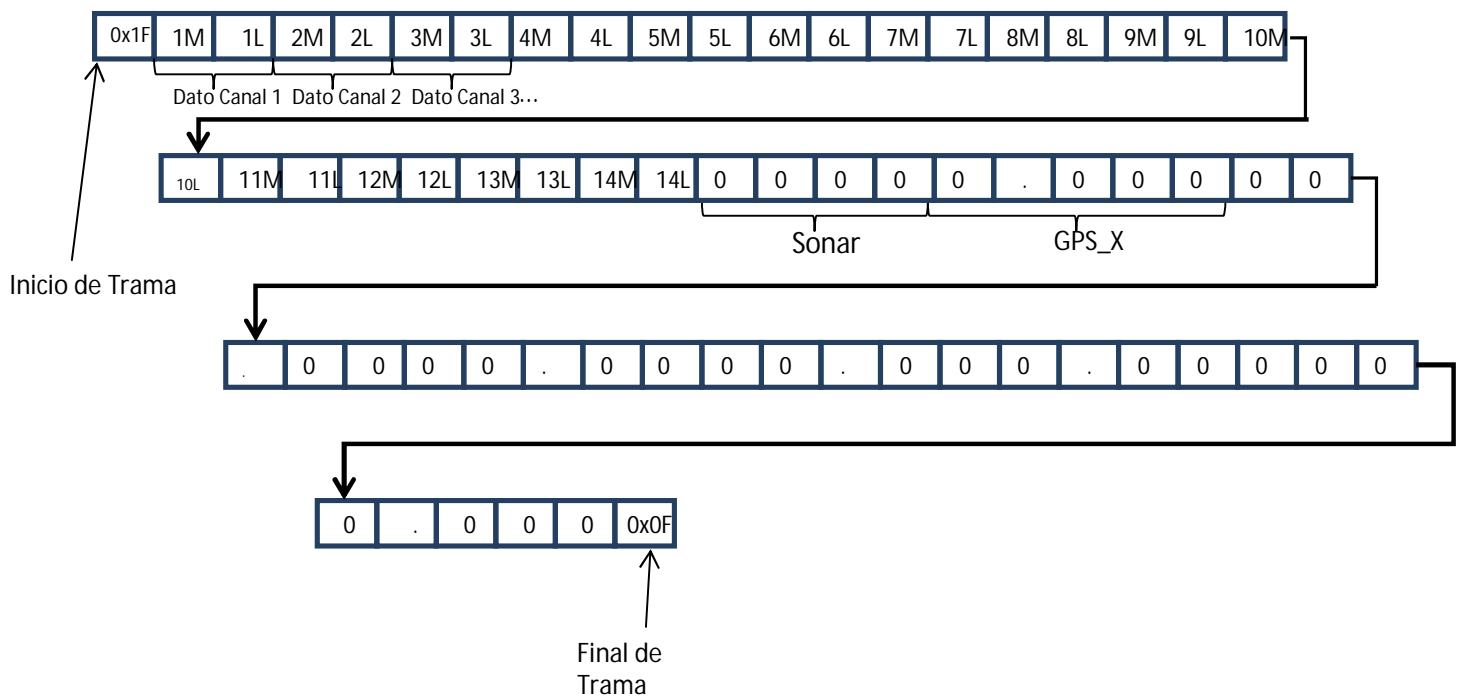
posible actualizar los datos más rápidamente se configura la velocidad de transmisión a 115200 Baudios por segundo.

Con el fin de mantener una transmisión lo más rápida posible se procura enviar la menor cantidad de datos, luego por cada variable análoga únicamente son enviados 2 bytes, luego serán 28 caracteres, por cada variable digital se determinan 5 caracteres por variable, por lo tanto, se transmiten 30 caracteres, luego se envían 4 caracteres del sonar. Para que el envío se realice de una forma correcta se envían, un carácter de inicio 0x0F y carácter de parada 0x1F, los cuales indicaran si la trama es válida o no en el momento de la captura.

La forma del paquete de uno de los canales se muestra en la tabla 7 para cuatro canales:

CANAL	NIVELES	SALIDA	BMS	BLS
1	840	1101001000	00000011	01001000
2	1019	1111111011	00000011	11111011
3	822	1100110110	00000011	00110110
4	989	1111011101	00000011	11011101

Forma del paquete de cada canal. Tabla 7



Muestras trama de envío de los datos de cada uno de los canales. Figura 30

En la figura 30 se muestra el orden en el cual van a ser enviados los datos desde el microcontrolador hacia el computador. Como se nombro anteriormente se tienen dos caracteres de control, los cuales indican el inicio y el final de la trama que se envía. Luego se comienzan enviando primero las variables análogas, las cuales se encuentran numeradas de 1 hasta el 14 y el literal M o L corresponde al byte más significativo y al menos significativo respectivamente. Estos caracteres son transmitidos de forma binaria con el valor discretizado por el buffer como se nombra en la fase de digitalización; este proceso se realizo de esta manera con el fin de aumentar la velocidad de actualización de los datos que iban a ser transmitidos y de esta forma lograr muestrear señales de mayor frecuencia.

Luego de enviar los 14 canales, se envían 4 caracteres en los cuales va a estar contenido el valor de el sonar, estos a lo contrario del anterior son enviados en el formato ASCII con el número equivalente a la altura medida, los últimos 36 caracteres corresponden a las coordenadas del GPS, cada coordenada se representara en un canal por 5 caracteres con su número equivalente en formato ASCII. Finalmente se envía el carácter de final de trama con el fin de certificar que los datos leídos sean validos.

Recepción de Datos GPS

El sistema de adquisición se ha diseñado para ser implementado en una aeronave, luego es necesario el uso de un GPS que continuamente se encuentra brindando información acerca de la posición, altitud, velocidad y tiempo.

El GPS se comunica con el sistema de adquisición a través de un protocolo serial, a una tasa de transmisión de 4800 baudios por segundo. El sistema de adquisición cuenta con un GPS fabricado por Trimble, este GPS tiene la capacidad de soportar información sobre la latitud, longitud, velocidad y tiempo, a través de diferentes tramas, tal como se muestra en la figura 31. Cada una de las tramas se encuentra separa por un carácter "\$", y se identifica cada una de las tramas por el nombre que puede ser GPGGA o GPVTG.

```

$GPVTG,214.9,T,218.0,M,000.7,N,001.3,K,A*23
$GPGGA,012236.00,0438.1345,N,07404.6939,W,1.03,3.03,-00003,M,003,M,,*5A
$GPVTG,218.0,T,221.1,M,000.7,N,001.3,K,A*2D
$GPGGA,012237.00,0438.1344,N,07404.6940,W,1.03,3.03,-00003,M,003,M,,*54
$GPVTG,215.6,T,218.7,M,000.7,N,001.3,K,A*2A
$GPGGA,012238.00,0438.1342,N,07404.6941,W,1.03,3.03,-00003,M,003,M,,*5C
$GPVTG,216.0,T,219.1,M,000.7,N,001.4,K,A*2F
$GPGGA,012239.00,0438.1340,N,07404.6942,W,1.03,3.03,-00003,M,003,M,,*5C
$GPVTG,217.1,T,220.2,M,000.7,N,001.3,K,A*21
$GPGGA,012240.00,0438.1338,N,07404.6943,W,1.03,3.03,-00003,M,003,M,,*5C
$GPVTG,214.3,T,217.4,M,000.7,N,001.4,K,A*25
$GPGGA,012241.00,0438.1336,N,07404.6945,W,1.03,3.03,-00003,M,003,M,,*55
$GPVTG,219.3,T,222.4,M,000.7,N,001.3,K,A*29
$GPGGA,012242.00,0438.1334,N,07404.6946,W,1.03,3.04,-00003,M,003,M,,*50
$GPVTG,216.4,T,219.4,M,000.7,N,001.2,K,A*28
$GPGGA,012243.00,0438.1332,N,07404.6947,W,1.03,3.04,-00003,M,003,M,,*56
$GPVTG,216.1,T,219.1,M,000.7,N,001.3,K,A*29
$GPGGA,012244.00,0438.1330,N,07404.6949,W,1.03,3.04,-00003,M,003,M,,*5D
$GPVTG,216.0,T,219.1,M,000.8,N,001.4,K,A*20
$GPGGA,012245.00,0438.1328,N,07404.6950,W,1.03,3.04,-00003,M,003,M,,*5D
$GPVTG,214.8,T,217.9,M,000.7,N,001.3,K,A*24
$GPGGA,012246.00,0438.1326,N,07404.6951,W,1.03,3.04,-00003,M,003,M,,*51
$GPVTG,218.4,T,221.5,M,000.7,N,001.3,K,A*2D

```

Tramas de Información del GPS. Figura 31

Debido a que la información que brinda cada una de las tramas no es necesaria en su totalidad se realiza un procedimiento de selección de cada uno de los datos de tal forma que sea posible clasificar la información necesaria y poder incluirla en una nueva trama la cual va a ser enviada al PC.

Se toma la primera trama GPGGA y se filtran los datos de la misma obteniendo así, la información sobre la hora, altitud, longitud, latitud e información acerca de la cantidad de satélites con el cual se encuentra enlazado; por otro lado de la trama GPVTG únicamente es almacenada la información sobre la velocidad de desplazamiento sobre el suelo el cual viene dado en kilómetros.

Debido a que el sistema de adquisición se encuentra equipado con dos módulos UART lo que permite que por uno de estos se encontrara totalmente disponible para obtener los datos del GPS, y por el segundo modulo poder establecer la comunicación con el PC.

Tiempos de Comunicación

El sistema de adquisición fue diseñado con el fin principal de enviar la información adquirida utilizando una comunicación alámbrica serial del tipo RS 232, luego el tiempo en que información es transmitida hacia el PC es de gran importancia para obtener datos validos del sistema. Con el fin de mantener una comunicación continua que permita muestrear señales de una forma más rápida, el microcontrolador se encuentra enviando información continuamente, a una velocidad máxima de 0,01s, es importante destacar que este tiempo va a depender del modo en el cual se estén capturado si es offline u online, este procedimiento se explicará más detenidamente en el modulo de interfaz

Dado que se están muestreando 14 canales análogos, y se obtienen las señales del GPS, de altitud, longitud, latitud, velocidad, satélites, la cantidad de caracteres que se van a transmitir serán:

- 29 caracteres para le información de los canales análogos.
- 30 caracteres donde se encuentra la información del GPS.
- 4 caracteres de información del Sonar.

Según la información anterior en total se deben transmitir 64 caracteres al computador. Debido a que cada uno de los caracteres se encuentra codificado en su equivalente en ASCII, es necesario evaluar la cantidad de bits totales presentes en la trama de envío. Dado que cada ASCII se encuentra representado por 8bits, multiplicando este valor por la cantidad total de caracteres es posible obtener el siguiente valor:

$$64 * 8 = 512 \quad (3.37)$$

La cantidad de bits en la trama será de 1008, luego teniendo una transmisión a una velocidad de 115200 baudios, es posible enviar una trama en un tiempo de 10ms

$$\frac{512}{115200} = 4,44 \quad (3.38)$$

Dado que la transferencia se encuentra limitada por un Timer quien me dice en qué momento se deben enviar los datos, y al establecer un tiempo de transmisión cada 10ms, con el fin de garantizar que no hallan datos erróneos, se puede considerar que se tiene una frecuencia de transmisión de 100Hz, y utilizando la ecuación 2.21 se establece que la frecuencia de la señal que mejor se puede muestrear será de

$$\frac{100}{11} = \frac{100}{11} = 9,09 \quad (3.39)$$

3.5 ULTRASONIDO

El sensor de ultrasonido cuenta con un modulo de salida en donde da su información de altura, este modulo de salida transfiere los datos utilizando una UART, a 9600 baudios, luego se utiliza la `uartVirtual` para poder capturar cada uno de los caracteres y de esta forma poderlos transformar y almacenar en el PC posteriormente.

3.6 MATLAB – INTERFAZ DE USUARIO

Descripción

Con el fin de poder visualizar las variables adquiridas en tiempo real se realizó una interfaz gráfica que brinda comodidad y facilidad al usuario, es decir le permite visualizar fácil e intuitivamente las variables que sean requeridas, así como también almacenar los datos provenientes del Sistema de Adquisición en archivos de texto independientes para estudios posteriores.

La idea de crear IAD “Interfaz de Adquisición de Datos” surge ante la necesidad que el usuario tenga la posibilidad de tener control sobre el Sistema de Adquisición; de tal manera pueda decidir cuando los datos sean capturados por el computador, el tiempo que dure la captura, visualización y almacenamiento de datos, la frecuencia de corte de los filtros variables que posee el Sistema de Adquisición, la frecuencia de muestreo del sistema y las variables a las que desee hacerle seguimiento visual en tiempo real.

IAD tiene básicamente dos modos de trabajo diferentes: Online y Offline; la diferencia entre estos dos modos es la fuente de la cual se extrae la información. En el modo Online se crea una comunicación serial y de este puerto se extraen los datos; mientras que en el Offline se extrae la información de un vector almacenado en un archivo .txt localizado en la memoria del computador. Cada uno de estos modos posee tres etapas fundamentales: la etapa de adquisición, la etapa de almacenamiento y la etapa de visualización; estas se encuentran estructuradas y entrelazadas para el correcto funcionamiento de la interfaz, más adelante se explicarán a profundidad.

Esta interfaz se desarrolló en MATLAB debido a las facilidades de comunicación a través del puerto serial que brinda este software; teniendo en cuenta que el computador necesita adquirir digitalmente todas las variables provenientes del microcontrolador, la ventaja que MATLAB tenga funciones pre-definidas es un factor decisivo en la elección de la plataforma de desarrollo ya que facilitará el proceso de comunicación continua con un dispositivo externo que en este caso es el dsPIC.

Matlab facilita la creación de una interfaz de usuario de fácil uso, con su herramienta GUI (Graphical User Interface) en la cual se crea una estructura visual con botones de ejecución, cuadros de texto, cuadros de graficas, cuadros de selección donde cada uno de estos tiene funciones asociadas modificables según el propósito de la interfaz a realizar.

Para seleccionar el modo en el que se desea utilizar la interfaz basta con seleccionar la opción que dice modo Offline en la pantalla de la interfaz; de no hacerlo se entenderá que la captura de datos se desea realizar Online. En la Figura 38 se muestra la pantalla principal de la interfaz incluyendo la selección del modo de uso.

3.6.1 Modo Online

Este modo genera una ventaja considerable y es que obtiene, grafica y almacena datos provenientes del puerto serial en tiempo real; lo que genera una ventaja si lo que desea el usuario es evidenciar los cambios de las variables en el transcurso del tiempo. Así como tiene un aspecto positivos a resaltar también tiene una desventaja referente al tiempo de adquisición; y es que la comunicación se ve limitada en tiempo por el puerto serial, por los cálculos realizados y por el software utilizado; el hecho de trabajar en tiempo real obliga a la interfaz a realizar tres procesos consecutivos: adquisición, almacenamiento y visualización; y el problema radica que los procesos de almacenamiento y visualización deben ser realizados antes de una nueva adquisición lo que genera un retraso en tiempo para dicho proceso. Este retraso hace que el sistema tenga un tiempo de respuesta lento ante cambios bruscos en los valores de las entradas; y se debe a que IAD no puede adquirir los valores tan rápidamente como se quisiera; lo que significa se deja de adquirir información en el lapso de tiempo del procesamiento.

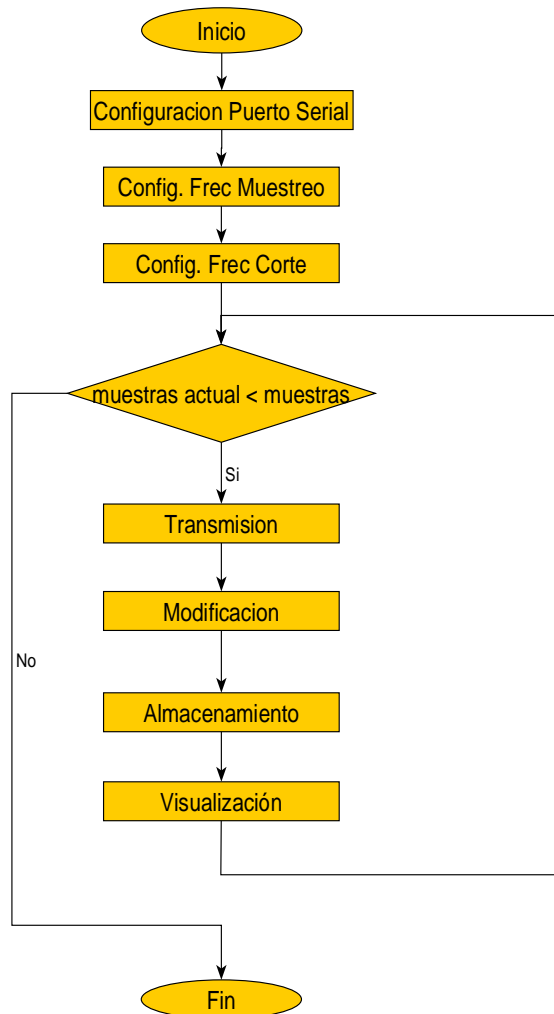


Diagrama de Flujo de IAD en el modo Online. Figura 32

Etapa de adquisición

La etapa de adquisición corresponde al proceso comprendido desde la configuración de la transmisión hasta el momento que los datos enviados por el microcontrolador sean recibidos por el PC, ésta etapa se subdivide en 3 Pasos fundamentales: configuración del puerto serial, configuración de parámetros de adquisición y transmisión de datos.

Configuración del puerto serial

En MATLAB los puertos seriales son definidos y trabajados como objetos, para esto se utiliza una función predeterminada en la que se crea un objeto correspondiente al puerto serial que se desea trabajar (COM1, COM2, etc); una vez definido el objeto hay que establecer sus parámetros de configuración que son los siguientes:

- **BaudRate:** Es la tasa a la cual la información es transferida en el canal de comunicación, en MATLAB siempre se configura como bits por segundo. Por ejemplo en nuestro sistema de adquisición una tasa de 115200 Baudios significa que el puerto serial es capaz de transferir un máximo de 115200 bits por segundo.
- **DataBits:** Define el número de bits que se van a transferir en cada dato, estos pueden ser transmitidos en series de 5, 6, 7 o 8 bits; cuando son 7 bits se requiere transmitir en caracteres ASCII, si son 8 bits se requiere transmitir en datos binarios; 5 o 6 bits son usados para tipos especiales de comunicación.
- **Parity:** Especifica el tipo de paridad a utilizar, ésta puede ser par (si el carácter lleva cantidad par de unos), impar (si tiene cantidad impar de unos), espacio (el bit de parada siempre es uno) o marca (el bit de parada siempre es cero), o sin paridad. La paridad es un método de detectar errores en la transmisión de datos.
- **StopBits:** Se refiere al número de bits usados para indicar el fin del byte (8 bits en este caso), ésta opción es posible configurarla con valores de 1 para un bit, 2 para dos bits y 1.5 para indicar que el bit de parada sea transferido al 150% del tiempo normal usado para transferir un bit.
- **FlowControl:** Se configura para especificar si existe un control de flujo y de qué tipo es, éste puede ser por software o por hardware.

A continuación se muestra el código correspondiente a la configuración del puerto en MATLAB, hay que tener en cuenta que para lograr la comunicación entre el dsPIC y el PC se necesita establecer los mismos parámetros en ambos sistemas.

```
PS = serial('COM3');           %declaración del puerto serial como un objeto
set(PS,'BaudRate',115200);     %declaración del baudrate utilizado para
                               comunicarse con el dsPIC = 115200
set(PS,'DataBits',8);         %declaración de la cantidad de bits por
                               byte, se trabaja un paquete de 8 bits
set(PS,'Parity','none');      %declaración de paridad nula; no se
                               Utiliza este parámetro
set(PS,'StopBits',1);
set(PS,'FlowControl','none'); % declaración de el no uso del control de
                               flujo
```


fopen(PS);

Configuración de parámetros de adquisición

IAD permite al usuario establecer dos parámetros en la configuración directa del sistema de Adquisición de Datos: *Frecuencia de Muestreo* y *Frecuencia de Corte*, estos dos parámetros son enviados a través del puerto serial del PC al Sistema de Adquisición donde se realizan las modificaciones pertinentes. Otro parámetro adicional que puede ser cambiado es el *Tiempo de Simulación*, el cual interviene directamente en el funcionamiento de la interfaz y no en el sistema de adquisición.

Los tres parámetros son ingresados manualmente por el usuario en la interfaz, en la Figura 33 se muestra la localización de estos en la interfaz de usuario.



Visualización ingreso de parámetros. Figura 33

Frecuencia de Muestreo: Como su nombre lo indica este parámetro modifica la frecuencia de muestreo del Sistema de Adquisición de Datos, esta frecuencia debe estar entre el rango (1-99999 Hz). En IAD el usuario tiene la opción de modificar la frecuencia o dejarla configurada como estaba anteriormente (default), en caso que no quiera modificarla debe ingresar un cero “0” o ingresar el valor de la frecuencia a trabajar.

Frecuencia de Corte: Este parámetro modifica la frecuencia de corte de los filtros variables que posee el Sistema de Adquisición, ésta debe estar en el rango (5-999 Hz). También existe la opción de no modificarlos, para esto el usuario debe ingresar el numero “0” o el valor de la frecuencia en caso de querer modificarlo.

Como las dos frecuencias son parámetros que se tienen que modificar dentro del microcontrolador, es necesario establecer un protocolo de envío desde el mismo:

1. IAD envía al Sistema de adquisición una ‘S’ (Sample Frequency) si es la frecuencia de Muestreo ó ‘C’ (Cutoff Frequency) si es la frecuencia de corte.
2. El sistema de Adquisición de Datos envía un ‘&’ confirmando que está listo para realizar el cambio.
3. IAD envía de manera serial (caracter a caracter) el valor de la frecuencia.

En caso que el Sistema de Adquisición no envíe el ‘&’, IAD seguirá enviando el carácter correspondiente (‘S’ ó ‘C’) hasta que el carácter de respuesta sea recibido correctamente.

Las Figuras 34 y 35 muestran el diagrama de flujo de los procesos correspondientes a la configuración de la frecuencia de muestreo y frecuencia de corte respectivamente.

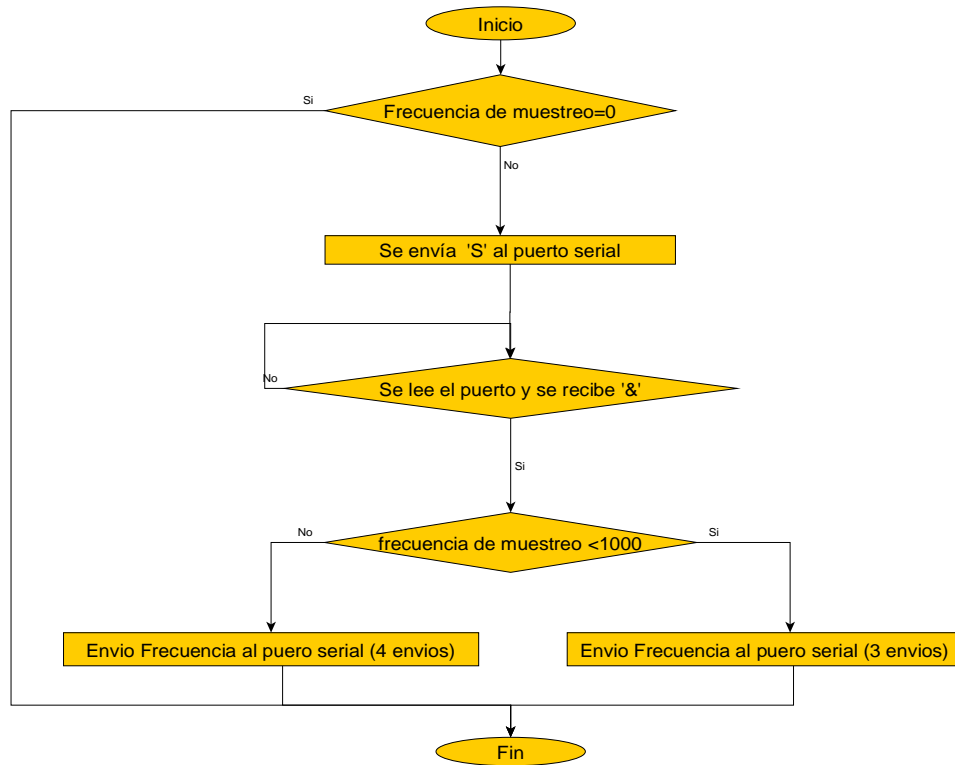


Diagrama de Flujo de Configuración de la Frecuencia de Muestreo Figura 34

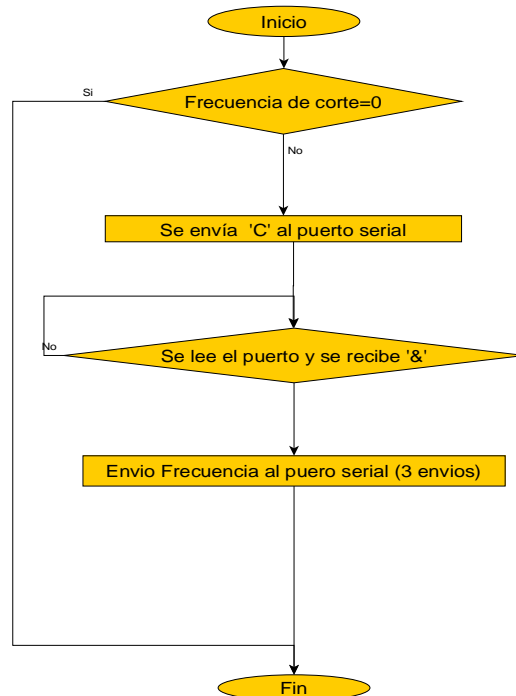


Diagrama de Flujo de Configuración de la Frecuencia de Corte. Figura 35

Tiempo de Simulación: El tiempo de simulación es un parámetro que indica la duración aproximada de la captura de datos, es decir indica el tiempo que durará la comunicación entre el Sistema de Adquisición y IAD.

Como IAD se encuentra controlada cíclicamente por el número de muestras a tomar (número de tramas) y no por el tiempo de simulación, es necesario realizar una conversión; dicha conversión se realiza conociendo el tiempo que se demora el microprocesador en enviar cada trama, dado que en el modo online este tiempo se encuentra definido en 0.170 segundos para garantizar una escala de tiempo constante, la relación es la siguiente

$$= \frac{\text{Tiempo de simulación}}{\text{Número de tramas}} = \frac{\text{Número de tramas}}{0.170} \quad (3.40)$$

Este número de muestras es aproximado al entero más cercano para garantizar que IAD tome las tramas completas sin perder algún tipo de información.

Tiempo de Envío

El tiempo de envío corresponde al tiempo de separación entre los envíos de las respectivas tramas, este es un parámetro muy importante ya que de estos tiempos de envío depende la linealidad de la escala de tiempo. Para poder establecer dicho tiempo se tiene que evaluar la velocidad de procesamiento de matlab, de tal manera que el microcontrolador le dé el tiempo suficiente al computador para realizar los cálculos necesarios antes de enviarle una nueva trama, evitando así la pérdida de datos. El Tiempo de envío en el modo Online es 0.170 s; este valor se encuentra predefinido en el microcontrolador, de tal manera que IAD sólo envía el carácter 'O' indicándole que se va a realizar la transmisión de datos en modo online y el microcontrolador define automáticamente el tiempo de envío.

Transmisión de datos

La etapa de transmisión de datos se inicia cuando ya se encuentran configurados tanto los parámetros del puerto serial como los parámetros del microcontrolador, así se empiezan a recibir los datos carácter por carácter. La función que se utiliza para leer los datos provenientes del puerto es `fread(PS,1,'uchar')`, la cual retorna el código ASCII correspondiente al símbolo que es enviado por el Sistema de Adquisición, en esta función se especifica el nombre del puerto y el tipo de datos que en este caso es carácter sin signo (unsigned character).

Existen 21 variables a almacenar; entre ellas 14 corresponden a las variables análogas que pasaron a través de conversores A/D, otras 6 correspondientes a variables obtenidas desde el GPS y una proveniente del ultrasonido, cada una de estas tiene una cantidad de bytes establecida y una posición predeterminada dentro de la trama que recibe IAD, esta posición y la cantidad de bytes son los que hacen posible almacenar los caracteres provenientes del puerto serial y clasificarlos en variables separadas para su manejo individual.

En la Figura 36 se muestra un diagrama que evidencia la forma en la que se lee el puerto y se clasifican los datos, siempre se espera a recibir el carácter equivalente a 0F en el sistema Hexadecimal, que indica que inicia una trama, luego se procede a adquirir las 14 variables análogas;

cada una de estas variables poseen dos caracteres que corresponden al valor que almacena el conversor Análogo- Digital, estos valores van de 0 a 1023 debido a que es una conversión de 10 bits; por lo tanto la IAD lee los dos caracteres los convierte a binario y posteriormente los concatena en la variable correspondiente realizando simultáneamente una conversión al sistema decimal; para las variables digitales se recibe el código ASCII correspondiente a cada caracter, por lo tanto se lee el puerto tantas veces como numero de bytes tenga la variable a almacenar y se concatenan en un solo vector. El procedimiento se repite hasta haber adquirido las 21 variables en 21 vectores diferentes; estos vectores almacenan el valor en decimal que estaba almacenado en el buffer para las variables análogas y el código ASCII correspondiente a cada variable para las digitales, es decir si el Sistema de Datos adquirió un valor de 0.456 en una variable digital, en IAD la variable correspondiente almacenará el siguiente valor [48,46,52,53,54]; del mismo modo si adquirió un valor análogo que hace que se almacene en el buffer del ADC un 1023, en IAD la variable correspondiente almacenará el siguiente valor “11111111” ó 1023 en decimal.

La transmisión de datos es un proceso cíclico que solo finaliza cuando IAD haya adquirido, almacenado y graficado el número de muestras correspondientes al tiempo de simulación ingresado por el usuario; se debe tener en cuenta que para volver a adquirir la siguiente muestra, es decir para volver a comenzar un ciclo, primero se ejecutan los comandos correspondientes a las etapas de almacenamiento y visualización.

Etapa de almacenamiento

La etapa de Almacenamiento inicia una vez finalizada la etapa de adquisición, es decir cuando todas las variables correspondientes a la muestra actual se encuentren en la memoria del computador.

Esta etapa posee a su vez dos pequeñas etapas: modificación y almacenamiento.

Modificación

Corresponde a todos los cálculos internos realizados por la interfaz con el fin de preparar los datos para su posterior almacenamiento y visualización. El punto de partida son los vectores en los cuales se tiene almacenado tanto el código ASCII correspondiente a la cadena de caracteres recibida por el puerto serial, como al valor en decimal correspondiente al valor recibido en dos caracteres ASCII.

Por lo tanto para las variables digitales lo primero que se realiza es una conversión de formatos de ASCII a carácter y luego de carácter a número con el fin de poder realizar las graficas posteriores; y para las variables análogas se multiplica el valor almacenado por la sensibilidad del conversor. Dado que la señal análoga que entra al ADC que tiene una conversión lineal, es necesario que la interfaz reverse dicha conversión para saber el valor real de la entrada del sistema en general, por lo tanto para todas las variables análogas es necesario realizar la siguiente operación $(-3.99 * \text{valor_ASCII} + 3.9755) / 0.7949$ donde 3.99mV corresponde a la sensibilidad y el resto de términos se deben a la ecuación lineal de los operacionales: $X = -0.749 * \text{valor_ASCII} + 3.9577$ donde X es el valor que se desea encontrar.

Es importante resaltar que la conversión de ASCII a carácter se realiza de manera instantánea sin realizar ningún otro tipo de cálculo, mientras que en la conversión de carácter a número, y la operación antes mencionada para las variables análogas se realizan adicionalmente un concatenamiento del valor numérico con el fin de almacenar en el nuevo vector no solo el valor numérico correspondiente a la muestra actual sino también el de las siguientes muestras, es decir estos vectores crecen a medida que aumenta el número de muestras; esto significa que en la última muestra existen 21 vectores que contienen el valor numérico de todas las muestras que se tomaron para cada variable.

En IAD las variables digitales son enviadas a la pantalla principal con el fin de permitir un monitoreo de las coordenadas y velocidades ECEF para cada uno de los tres ejes (x y z); en la Figura 37 se muestra un segmento de la pantalla principal de la interfaz indicando el lugar en que se encuentran las 6 variables mencionadas anteriormente, adicionalmente se muestran el Ultrasonido.

COORDENADAS ECEF			VELOCIDADES ECEF			Ultrasonido (m)
X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m/s)	Y (m/s)	Z (m/s)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0000

Visualización de Parámetros del GPS Figura 37

Para poder enviar las variables a la pantalla principal de la interfaz se utiliza la siguiente función: `set(handles.text2,'String',ecef_x1)`, en la cual se envía una cadena de caracteres a un cuadro de texto

determinado dentro de la interfaz; para que esto se cumpla, es necesario especificar la ruta o nombre del cuadro de texto (tex2 en este caso).

Almacenamiento

Con el fin de poder tener acceso a la información adquirida por la interfaz cuando esta haya finalizado, es necesario almacenar la información en un determinado tipo de archivo que no se borre cuando se cierre MATLAB; se escogió crear archivos .txt debido a su versatilidad y facilidad de uso en cualquier software.

Para evitar la pérdida de información la interfaz almacena cada variable (vectores acumulados) en un respectivo archivo de texto cada vez que se toma una muestra, de tal manera que en la primera muestra se almacenan en el archivo txt los valores correspondientes a la primera muestra, en la segunda muestra se sobrescriben los archivos txt y esta vez se guardan los valores de la primera y segunda muestra, y así sucesivamente hasta que al final del algoritmo se guarden todos los valores adquiridos; esto garantiza que de haber un problema y se detenga el proceso normal de la interfaz ya se tengan almacenados los valores hasta el momento de la interrupción; lo contrario sucedería si se crean los archivos al final de proceso, ya que en el momento de una interrupción se pierde toda la información.

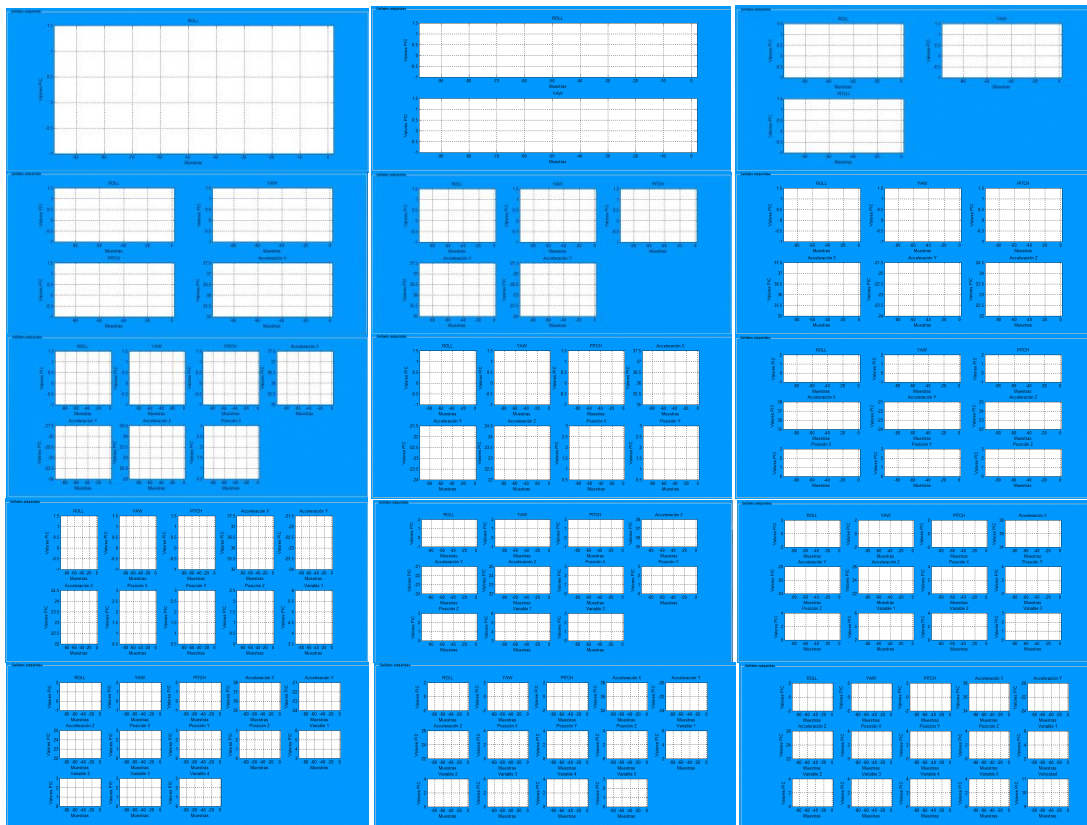
Etapa de visualización

La etapa de visualización enmarca todos los procesos enfocados a generar las graficas en tiempo real de las variables. Se creó una interfaz visual en MATLAB utilizando un GUI (Graphical User Interface) que genera un ejecutable en el cual el usuario puede interactuar dentro del código de manera indirecta. En esta etapa se definen ciertas opciones para generar de las gráficas, una de ellas es dar la opción de seleccionar cuales gráficas se desean visualizar, esto se realiza con el fin de optimizar el espacio ocupado por cada gráfica y su resolución; teniendo en cuenta que son 15 variables las que se desea visualizar en un mismo espacio, es evidente que la resolución de cada gráfica disminuye notablemente al mostrarlas simultáneamente, mientras que si el usuario solo desea ver una gráfica y la interfaz le da la opción de mostrarla ocupando todo el espacio disponible la resolución seria la máxima posible teniendo en cuenta las limitaciones de espacio. La Figura 38 muestra una imagen de la pantalla principal de la interfaz.



Imagen de la Interfaz Figura 38

Según la cantidad de gráficas que seleccione el usuario, IAD crea la mejor distribución de las gráficas en el espacio dispuesto para las mismas. La Figura 39 muestra la distribución para cada una de las posibles selecciones del usuario; la imagen de la esquina superior izquierda corresponde a una sola gráfica y la última corresponde a las quince gráficas en simultáneo.



Distribución de gráficas. Figura 39

Cada una de las variables es graficada contra el tiempo; teniendo en cuenta que la adquisición y visualización de datos es un proceso continuo se decide implementar el eje Y variable, es decir se va a presentar un desplazamiento con el fin que siempre se tenga el mismo rango de visibilidad y así no se acumulen los datos sobre el eje a tal punto que pierda la gráfica, lo que significa que la interfaz siempre va a mostrar las ultimas 100 muestras en vez de mostrar todas las muestras.

3.6.2 Modo Offline

En este modo la ventaja es la rapidez de adquisición de datos, aunque el proceso es muy similar al modo online presenta algunas diferencias circunstanciales debido a que la etapa de adquisición no se ve limitada por las otras dos etapas sino que al contrario primero se adquiere todas las muestras necesarias y posteriormente se realizan las etapas de almacenamiento y visualización. La Figura 40 muestra el diagrama de flujo correspondiente al modo Offline.

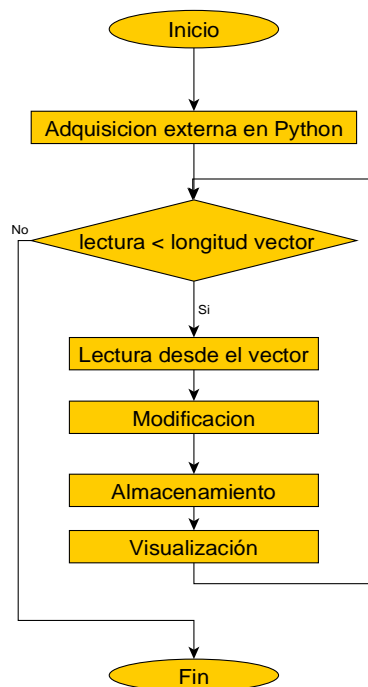


Diagrama de flujo de IAD en modo Offline Figura 40

Etapa de adquisición

El proceso de adquisición ya no se ve afectado por las otras dos etapas, pero aun es un factor limitante la velocidad con la que MATLAB lee y escribe en el puerto serial. Con el fin de agilizar dicho proceso se recurre a evaluar la velocidad de adquisición de MATLAB, obteniendo como conclusión que no es la velocidad óptima ya que el tiempo que tarda en leer el puerto es: 45ms; por esto se decidió utilizar un lenguaje diferente para la etapa de adquisición con el fin de eliminar dicha limitación.

Python es el lenguaje escogido para la implementación ya que es funcional con una sintaxis clara, tiene un manejo automático de memoria dinámica y tiene los tiempos de lectura y escritura del puerto serial del orden de 17µs, comparados con los 45ms de MATLAB.

Por lo tanto la etapa de adquisición consta de dos partes fundamentales: Adquisición en Python y Lectura desde el Vector

Adquisición en Python

Para realizar la transmisión de datos en Python se realizan los mismos pasos que en el modo Online pero se utiliza un lenguaje distinto. La Figura 41 muestra el diagrama de flujo del proceso de adquisición de datos desde Python.

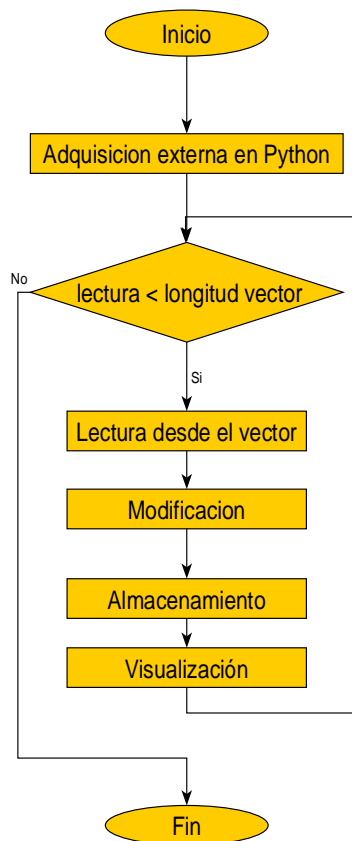


Diagrama de Flujo de Adquisición en Python. Figura 41

La configuración del puerto se realiza mediante los siguientes comandos: `ser = serial.Serial('COM2')` que define el puerto a trabajar, `ser.baudrate` que define la tasa de baudios en la comunicación y `ser.isOpen()` que se utiliza para abrir el puerto.

Posteriormente se le solicita al usuario el número de muestras que desea adquirir para así poder controlar el ciclo de transmisión de datos.

También es necesario realizar la configuración de parámetros en el Sistema de Adquisición de Datos, es decir configurar la frecuencia de muestreo y la frecuencia de corte. Para esto se le solicita al usuario el valor de las dos frecuencias y posteriormente se envía al Sistema de Adquisición a través del puerto serial; el protocolo es el mismo que en el caso anterior, IAD envía una 'S' en el caso de la frecuencia de muestreo, o 'C' en el caso de la frecuencia de corte, posteriormente el Sistema responde un '&' y así IAD sabe en qué momento puede transmitir el valor de las

frecuencias. También se envía al microcontrolador la letra 'E' para indicar que se desea adquirir datos en modo offline; de tal manera el sistema puede definir automáticamente el tiempo de envío en 10 ms, lo que significa que en el modo offline se transmite una trama al computador.

Por último se realiza un proceso cíclico en el cual se lee una trama completa y luego se guarda en un archivo .txt; el numero de muestras solicitado al comienzo de la interfaz en Python es el que controla el número de repeticiones de este ciclo. De tal manera que cuando finaliza la interfaz en Python se encuentra almacenado en un archivo .txt todos los datos que fueron adquiridos a través del puerto.

Lectura desde el vector

Ésta etapa inicia una vez ha finalizado el script en Python y ya se encuentre en el PC un archivo de texto con un vector que contiene las todas tramas adquiridas.

Lo que se hace es abrir el archivo de texto que contiene la información y generar una copia en un vector dentro de la memoria dinámica de MATLAB para así poderle hacer las modificaciones correspondientes; la función utilizada para realizar esta lectura es `fopen('trama_in.txt')` la cual direcciona y abre el archivo de texto de interés, adicionalmente se usa `fscanf(fid,'%c')` que realiza una lectura de todos los caracteres almacenados en el archivo; de esta manera se asigna a un nuevo vector para poder manipular los datos de forma sencilla, este vector va a ser trabajado posteriormente de la manera análoga que se trabaja el puerto serial, se lee posición por posición y se lleva un apuntador a la dirección que se está trabajando; de esta manera conociendo previamente la posición que tiene cada variable dentro de la trama (la misma trama que envía el dsPIC) es posible almacenarlos en variables separadas para su posterior manejo individual. Para lograrlo al igual que en el modo online se verifica que se lea el carácter que indica el inicio de la trama y se lee carácter por carácter concatenándolos en la variable correspondiente para así obtener los 21 vectores diferentes con la información cada muestra realizada.

Etapas de almacenamiento y visualización

Las etapas de almacenamiento y visualización son exactamente iguales que en el modo online, para las variables digitales se realiza la conversión de ASCII a caracter, luego de caracter a número y para las variables análogas se concatena el valor de dos caracteres en binario para así convertir los 16 bits al decimal correspondiente y poder multiplicarlo por la sensibilidad de conversión, y por la escala de linealización correspondiente a la conversión lineal en los operacionales presentes en el sistema de adquisición.. Posteriormente se crean vectores que incrementan su tamaño con el número de muestras logrando que en cada uno se almacene todas las muestras que se lleven hasta el momento, luego se guardan en archivos de texto individuales y se procede a la etapa de visualización, en la cual se usan los mismos parámetros descritos anteriormente. La única diferencia en la visualización es que en el modo online las graficas desplazan el eje de muestras para visualizar siempre 100 Muestras, mientras que en el modo Offline se visualizan siempre 400 muestras; esta diferencia se debe a que en el modo offline la toma de datos es más rápida lo que implica que habrá un mayor número de tramas a graficar en un mismo tiempo, entonces es de gran utilidad visualizar mas de muestras.

4. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA Y RESULTADOS

4.1 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO

En esta sección se va a describir detalladamente el proceso de elaboración del circuito impreso así como la selección e implementación de cada uno de los componentes que componen todo el sistema de adquisición de datos.

Para observar la implementación física de SADA en el circuito impreso, se debe hacer referencia al Anexo E que se encuentra en el capítulo *ANEXOS*.

SOFTWARE

Todo el proceso de elaboración del esquemático y del circuito impreso del Sistema de Adquisición de Datos se realizó en un software libre (GPL) llamado Kicad, el cual está compuesto por un conjunto de cuatro *softwares* y un gestor de proyectos como se puede observar a continuación:

- **Eeschema:** Es el editor de esquemas
- **PcbNew:** Es el editor de circuitos impresos.
- **Gerbview:** Visualización de documentos generados en formato GERBER.
- **Cvpcb:** Selección de *footprints* de cada uno de los componentes.
- **Kicad:** Gestor de proyectos. Permite seleccionar un proyecto y abrir cualquier herramienta deseada (Eeschema, PcbNew, entre otros).

Ésta herramienta permitió la creación de cada una de las siguientes capas utilizadas en la elaboración del circuito impreso:

- **TOP:** Es la capa superior del circuito impreso, contiene contactos para componentes de montaje superficial, de *through hole* y las rutas de esta capa.
- **BACK:** Es la capa inferior del circuito impreso, contiene contactos solo de componentes *through hole* y las rutas que van por esta capa.
- **SMT:** Mascara de Anti-soldadura en la capa superior. Es muy importante para prevenir corto circuitos durante el proceso de soldado de los componentes.
- **SMB:** Mascara de Anti-soldadura en la capa inferior.
- **SST:** Silk sreen de la capa superior. Esta capa contiene los bordes y nombres de cada uno de los componentes presentes en esta capa.
- **DW:** Drill size. Contiene el tamaño de las perforaciones que posee el circuito, cada una de estas es de tipo *through hole* es decir cada perforación tiene por dentro soldadura que une la capa inferior con la capa superior. Las cuatro perforaciones que se encuentran en las esquinas son las únicas que no son de este tipo ya que se utilizan únicamente para sujetar el circuito impreso.

4.1.1 CONSIDERACIONES PARA ELABORACIÓN DEL IMPRESO

En la elaboración de circuitos impresos se deben tener en cuenta distintos tipos de consideraciones dependiendo de su aplicación final. En esta parte del documento se explicarán las características y consideraciones más relevantes en la elaboración del circuito impreso de SADA.

- Distribución de los componentes:

En un circuito impreso que tiene elementos análogos y digitales es muy importante tener en cuenta la separación de estos a la hora de distribuirlos en el circuito con el fin de evitar el acoplamiento de las señales digitales en los circuitos análogos. Otro aspecto importante es la separación de componentes teniendo en cuenta la potencia de operación, pues los componentes que disipen mayor potencia al estar cercanos a otros componentes pueden afectar el funcionamiento de estos. La ubicación de las fuentes de voltaje también es importante pues se deben colocar cerca de los componentes que van a alimentar para evitar caídas de voltaje y ruido inducido por medio de los caminos de cobre del impreso.^[16]

En la realización del circuito impreso para *El Sistema de Adquisición de Datos de Una Aeronave No Tripulada* se tuvieron en cuenta todos estos aspectos. Los elementos análogos fueron separados de los elementos digitales para evitar acoplamiento de ruido digital en las señales análogas, las fuentes de alimentación se pusieron cerca de los dispositivos que alimentaban, por ejemplo el regulador de 3.3 VDC se puso adyacente al GPS y el regulador de 5 VDC se puso en la parte central de todos los dispositivos que se polarizan a partir de este.

- Planos de tierra:

Los planos de tierra no solo sirven en los circuitos impresos como un camino de retorno de corriente con baja impedancia para desacoplar corrientes de alta frecuencia (causadas por circuitos digitales) si no que también ayudan a minimizar el ruido de altas frecuencias que puede ser inducido en los caminos del circuito impreso.

En los circuitos impresos que tienen componentes análogos y digitales se deben tener planos de tierras separados para los elementos análogos y para los elementos digitales para así evitar el acoplamiento de señales digitales en los circuitos análogos por los planos donde retorna la corriente. Estos planos de tierra no se deben sobrelapar en ningún punto para así evitar al máximo el acoplamiento capacitivo entre los dos, de igual forma, deben permanecer separados hasta llegar a un punto común que es lo que se conoce como la conexión de tierra en estrella (sistemas de tierras en un único punto) generalmente localizada en las fuentes de alimentación de componentes que poseen tierras digitales y tierras análogas. En la práctica es bueno tener en cuenta que a la hora de realizar un plano de tierra, pueden haber algunos pines que no queden conectados a la tierra general del circuito y por lo tanto será necesario cablearlos manualmente.^[16]

En nuestro circuito impreso se realizaron planos de tierra digital y análoga en las dos capas de trabajo (Top y Bottom) teniendo presente que no se podían sobrelapar planos de tierras distintos para precisamente evitar al máximo el acoplamiento capacitivo entre los dos. Los planos de tierra digital en las dos capas cubren el área delimitada por el DSPIC 30F6010A y los MAX 232 (sin integrar ninguna de las tierras análogas de los demás componentes), y se unen con los planos de tierras análogos en un único punto (conexión de planos de tierra en estrella) que es el pin de tierra análoga del micro-controlador. Como ya se había mencionado anteriormente, en un circuito impreso de doble capa una de ellas debe estar dedicada al menos un 75 % al plano de tierra, en nuestro Sistema de Adquisición la capa *Bottom* es la dedicada al plano de tierra y se puede observar en el *anexo E* que cumple con lo dicho anteriormente.

El plano de tierras del circuito cuenta con una distancia mínima a las demás pistas de conexión y a los elementos de 0,4089 mm para asegurar que no se presentaran cortos con tierra en algún punto del circuito.

- Desacoples de fuentes de alimentación:

El desacople en las fuentes de alimentación es muy importante para los sistemas que necesiten un voltaje de alimentación constante y con muy poco ruido. Para esto se utilizan normalmente pares de condensadores conectados entre fuente y tierra de cada uno de los elementos cuyos valores pueden oscilar entre 1 nf y 10 µf con el objetivo de implementar un filtro pasa bajos que disminuya notablemente el ruido de altas frecuencias que se pueda presentar en las fuentes, obteniendo como resultado el voltaje DC fijo deseado.

En nuestro sistema de adquisición se utilizaron condensadores de 10 nf cerámico y de 2.2 µf de tantalio, formando así el par de condensadores de desacople para todo los elementos del circuito.

Para los amplificadores operacionales se utilizó un par de condensadores por cada amplificador, en el caso de los filtros pasa-bajos Butterworth se utilizó un par de condensadores por cada 2 filtros ya que la distribución de estos componentes lo permitía, para el microcontrolador se utilizó un par de condensadores para el desacople de tierra y fuente digital y otro par para el desacople de la fuente y tierra análoga. En el GPS igualmente se utilizó un par de condensadores para fijar su voltaje y en cada uno de los reguladores se implementaron los condensadores de desacople que se especificaban en los *datasheets*. En todos los componentes del circuito, los condensadores de desacople se pusieron muy cercanos a sus fuentes de alimentación para así obtener la respuesta deseada.

Consideraciones Generales

- Ancho de las pistas: se tienen dos tipos de pistas distintos dependiendo si son conexiones entre componentes o conexiones para las fuentes de alimentación.

Ancho de pista	Clearence	Descripción
12 mils (0.3048mm)	0,254 mm	Pistas dedicadas a las conexiones de todos los componentes
15 mils (0.381mm)	0,254mm	Pistas dedicadas a la conexión de las fuentes de alimentación (6 VDC, 5VDC, 3.3 VDC)

Tamaño de las pistas Tabla 8

- **Separación entre componentes:** Para no tener inconvenientes a la hora de colocar y soldar los componentes en el impreso, se estableció que la distancia mínima entre componentes debía ser de al menos 0,8 mm.
- **Foot-prints:** Algunos de los *foot-prints* que se utilizaron para los componentes del circuito impreso ya estaban creados en Kicad, pero otros como el *foot-print* para la tarjeta de sensores, para el ultrasonido, para los reguladores, fueron necesarios crearlos ya que no existían en este software.

- **Esquemático de cada componente:** Todos los esquemáticos excepto los del micro controlador y los MAX 232 fueron creados según los pines de entrada, salida o fuente que se indicaban en cada uno de los *datasheets*. En el caso de la tarjeta de sensores el *foot-print* se hizo teniendo en cuenta todas las conexiones que posee este dispositivo así no estén conectadas a algún elemento.
- **Tamaño final:** Las dimensiones finales del circuito impreso fueron 10.8 cm de largo por 12.3 cm de alto, lo que lo hace fácilmente portable para cualquier sistema en que se necesiten capturar distintas variables en tiempo real, de esta manera se cumple con uno de los criterios más importantes de diseño para nuestro sistema de adquisición de datos que era la portabilidad.

Consideraciones Específicas

- Circuito impreso en dos capas:

Idealmente todo circuito impreso debe ser implementado en dos capas (top y bottom) para dedicar una de estas solo a conexiones y otra únicamente al plano de tierras. En la práctica esto no es posible en un circuito impreso que implemente un gran número de señales pues el cruce de las pistas de conexión sería inevitable, aunque si se debe preservar al menos un 75 % en una de las dos capas para realizar el plano de tierra. ^[1]

El circuito impreso de nuestro Sistema de Adquisición de Datos se realizó teniendo en cuenta estas consideraciones anteriormente mencionadas. En la capa *Top* se pusieron todos los componentes excepto el ultrasonido y se realizaron la mayoría de conexiones entre ellos, mientras que en la capa *Bottom* se encuentra únicamente el ultrasonido y algunos caminos que fueron necesarios pasarlos por esta capa ya que se interceptaban con otros que ya estaban en la capa superior.

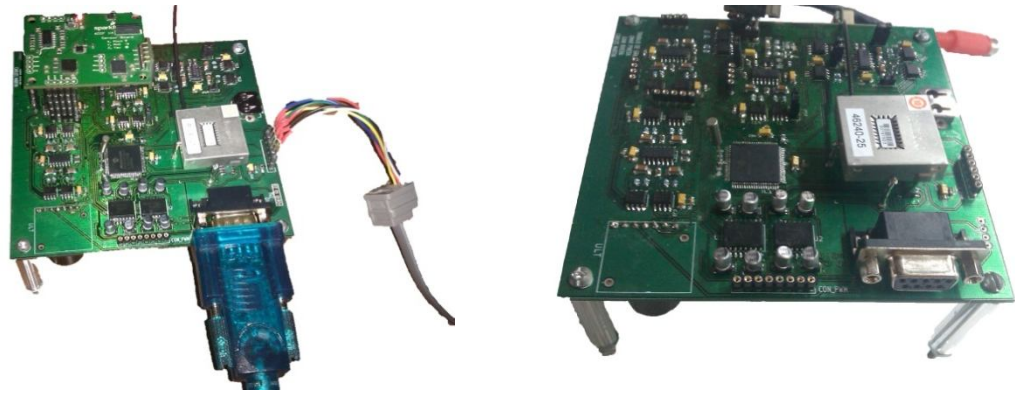
- Conectores de entrada y salida:

La ubicación de los conectores de entradas y salidas en un circuito impreso es muy importante ya que deben ser fácilmente alcanzables para que el usuario pueda conectar los dispositivos que necesite.

En el impreso del sistema de adquisición de datos se encuentran cinco tipos de conectores distintos:

- Conector para la fuente de alimentación del circuito.
- Conector para el programador del DSPIC 30f6010A.
- Conector de salida de las cuatro señales de PWM para controlar los motores.
- Conector para el cable serial.
- Conector de programación para el GPS.
- Conector para la pila de 3.3 v del GPS.

Todos estos se encuentran ubicados en los bordes del impreso con el objetivo de facilitar su conexión con los distintos elementos a conectar.



Fotografías del Circuito Impreso Implementado. Imagen 1

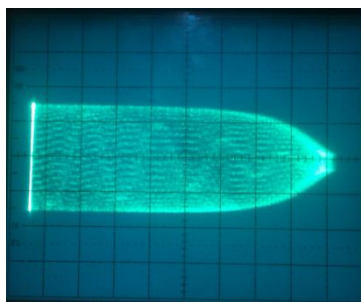
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.2.1 RESULTADOS ANÁLOGOS

Para asegurar el funcionamiento de la etapa de adquisición análoga se realizaron diferentes pruebas; la primera fue realizar un barrido en frecuencia para así poder obtener la respuesta en frecuencia de los canales; la segunda es una prueba de visualización entrada-salida para cada canal.

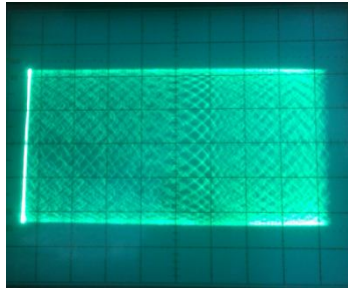
BARRIDO EN FRECUENCIA.

Se realiza un Barrido en frecuencia desde 10Hz a 1000Hz en el generador; y se programa una frecuencia de corte de 800Hz en los filtros anti-aliasing variables. La Imagen [1] muestra la gráfica resultante en el osciloscopio en el modo X-Y al hacer el barrido de frecuencia; se evidencia un cambio de amplitud debido a la acción de los filtros; lo cual era de esperarse ya que la frecuencia de corte se encontraba dentro del rango de frecuencia.



Respuesta en Frecuencia Imagen 2

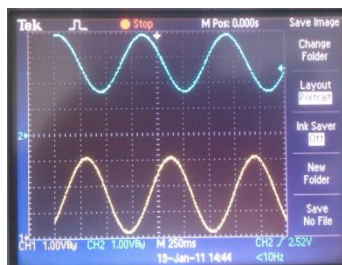
Se realiza un segundo barrido en el cual se mantiene constante la frecuencia de inicio y parada; pero se modifica la frecuencia de corte de los filtros a 2kHz. La Imagen[2] evidencia una respuesta completamente plana; esto se debe a que la frecuencia de corte esta fuera del rango del barrido, por lo tanto la señal no se ve atenuada por el filtro.



Respuesta Plana Imagen 3

ANALISIS EN TIEMPO

Se realiza un análisis en tiempo de cada uno de los canales; como primera medida se alimenta un canal con una señal sinusoidal de una frecuencia menor a la frecuencia de corte, en la Imagen[3] se evidencian dos señales; la señal amarilla corresponde a la señal de entrada, mientras que la señal azul corresponde a la señal de salida; la señal de entrada tiene una amplitud de 0v a 3.3V mientras que la señal de salida presenta una amplitud de 1,4V a 4V; el resultado obtenido confirma el hecho que está funcionando el acoplador de señal; ya que la salida se esperaba en un rango de 1.35V a 3.95V para una amplitud entre 3.3V y 0V respectivamente, partiendo de este hecho se comprueba que la señal no está siendo atenuada por el filtro, lo que es consecuente ya que la frecuencia de la señal es menor a la frecuencia de corte establecida.



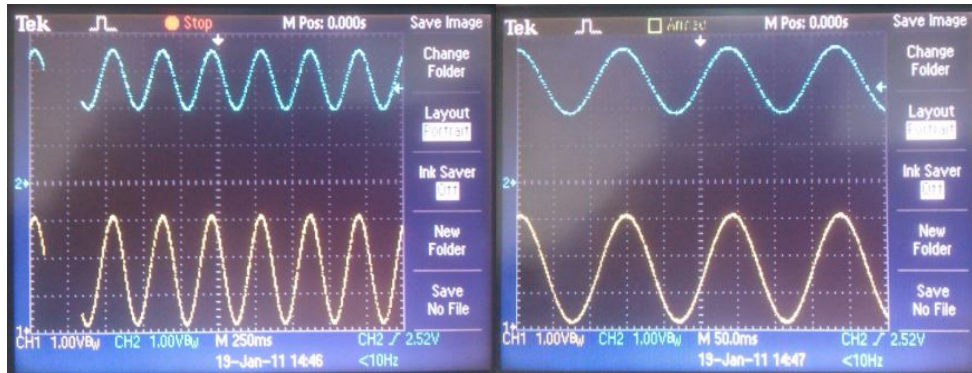
Señal Acoplador Imagen 4

Posteriormente se realiza una prueba similar para cada canal; pero en estos casos se hace coincidir la frecuencia de corte con la frecuencia de muestreo; de tal manera que lo que se espera obtener es la señal de entrada intacta, y la señal de salida atenuada en 3dB; desde la Imagen[3] hasta la Imagen[17] se mantiene la misma escala en amplitud, con el fin de apreciar la relación entre las amplitudes de la Imagen[3] que presenta una frecuencia en la señal de entrada menor a la de corte y el resto de Imágenes que tienen frecuencia de la señal de entrada igual a la de corte.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada canal con su respectiva frecuencia de corte y muestreo (Frecuencia de corte = Frecuencia de la señal):

Ch1: Frecuencia Corte =3 Hz

Ch2: Frecuencia Corte =7 Hz

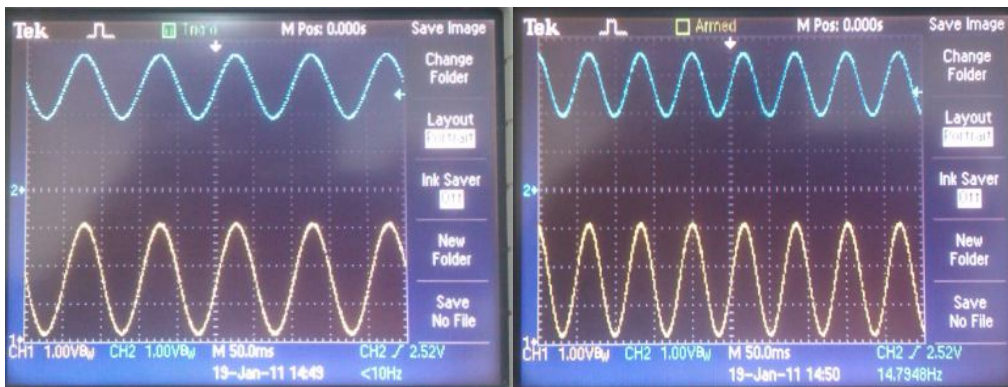


Señal 3Hz Imagen 5

Señal 7Hz Imagen 6

Ch3: Frecuencia Corte =10 Hz

Ch4: Frecuencia Corte =15 Hz

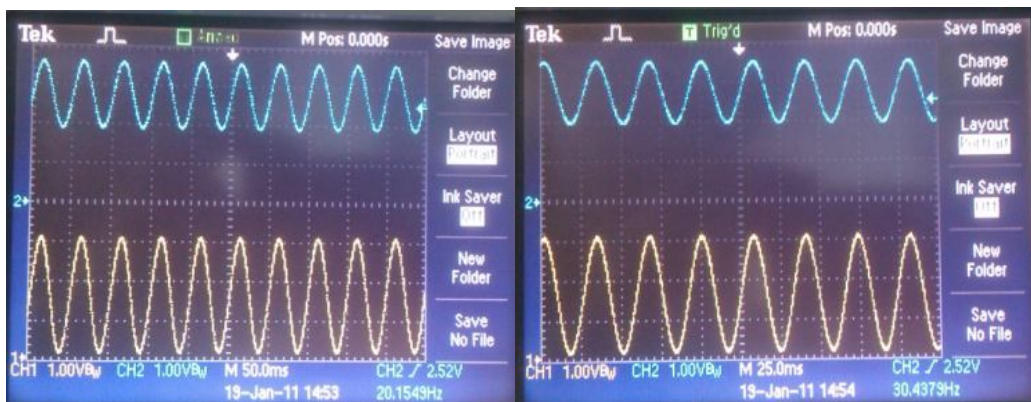


Señal 10Hz Imagen 7

Señal 15Hz Imagen 8

Ch5: Frecuencia Corte =20 Hz

Ch6: Frecuencia Corte =30 Hz

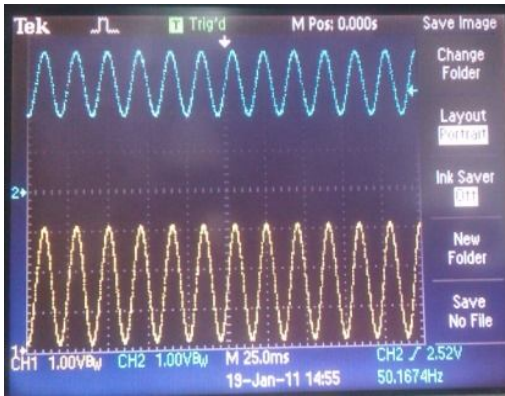


Señal 20Hz Imagen 9

Señal 30Hz Imagen 10

Ch6: Frecuencia Corte =50 Hz

Ch7: Frecuencia Corte =100 Hz

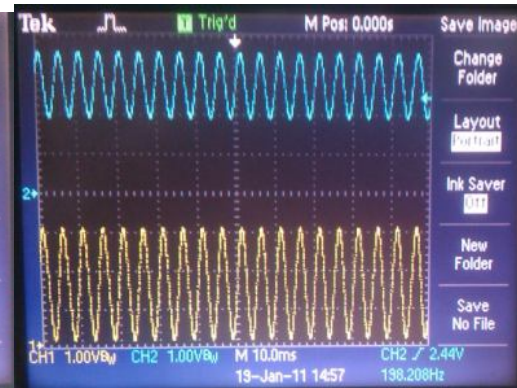
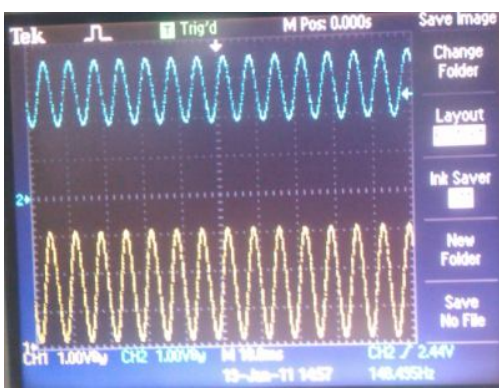


Señal 50Hz Imagen 11

Señal 100Hz Imagen 12

Ch8: Frecuencia Corte 150 Hz

Ch9: Frecuencia Corte =200 Hz

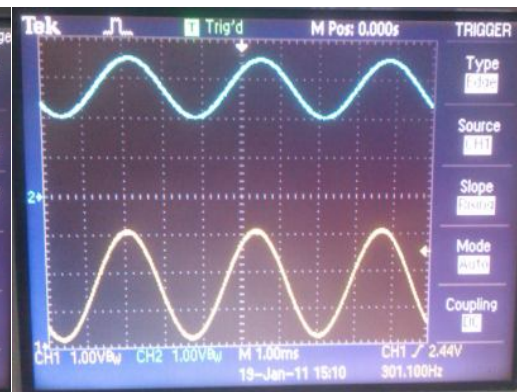
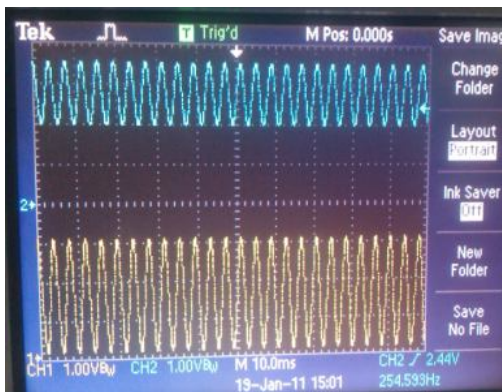


Señal 150Hz Imagen 13

Señal 200Hz Imagen 14

Ch10: Frecuencia Corte =250 Hz

Ch11: Frecuencia Corte =300 Hz

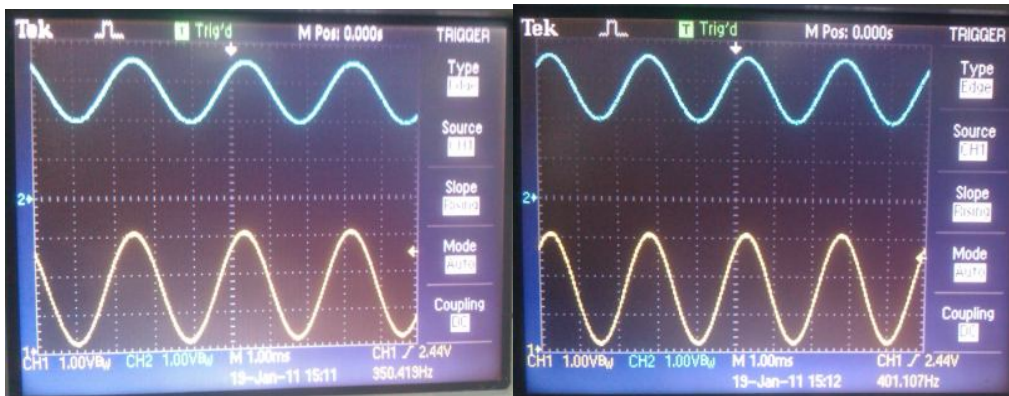


Señal 250Hz Imagen 15

Señal 300Hz Imagen 16

Ch12: Frecuencia Corte =350 Hz

Ch13: Frecuencia Corte =400 Hz

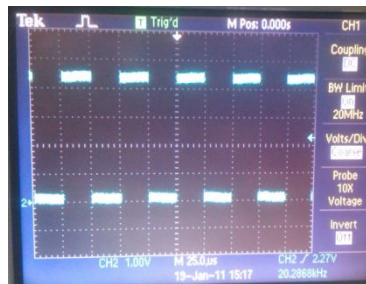


Señal 350Hz Imagen 17

Señal 400Hz Imagen 18

En las imágenes anteriores se observa que se mantiene la misma amplitud de la señal de salida y la misma frecuencia de la señal de entrada, pero al compararlas con la Imagen[3] se observa que sus amplitudes son menores; esto es debido a que en el primer caso la señal no se estaba atenuando por el filtro, pero en estos casos si se atenúa en 3dB la señal dado que la frecuencia de la señal es igual a la frecuencia de cada uno de los filtros.

Adicionalmente se verifica la frecuencia que está controlando los filtros variables, ya que la frecuencia de corte de la Imagen[17] es 400Hz, se espera que la señal de control de los filtros tenga una frecuencia igual a 50 veces la frecuencia de corte, es decir 20KHz; la Imagen[18] muestra la señal de reloj a una frecuencia aproximada de 20KHz lo que quiere decir que los filtros si tenían la frecuencia de corte correspondiente.



Señal Entrada Filtros Antialiasing Imagen 19

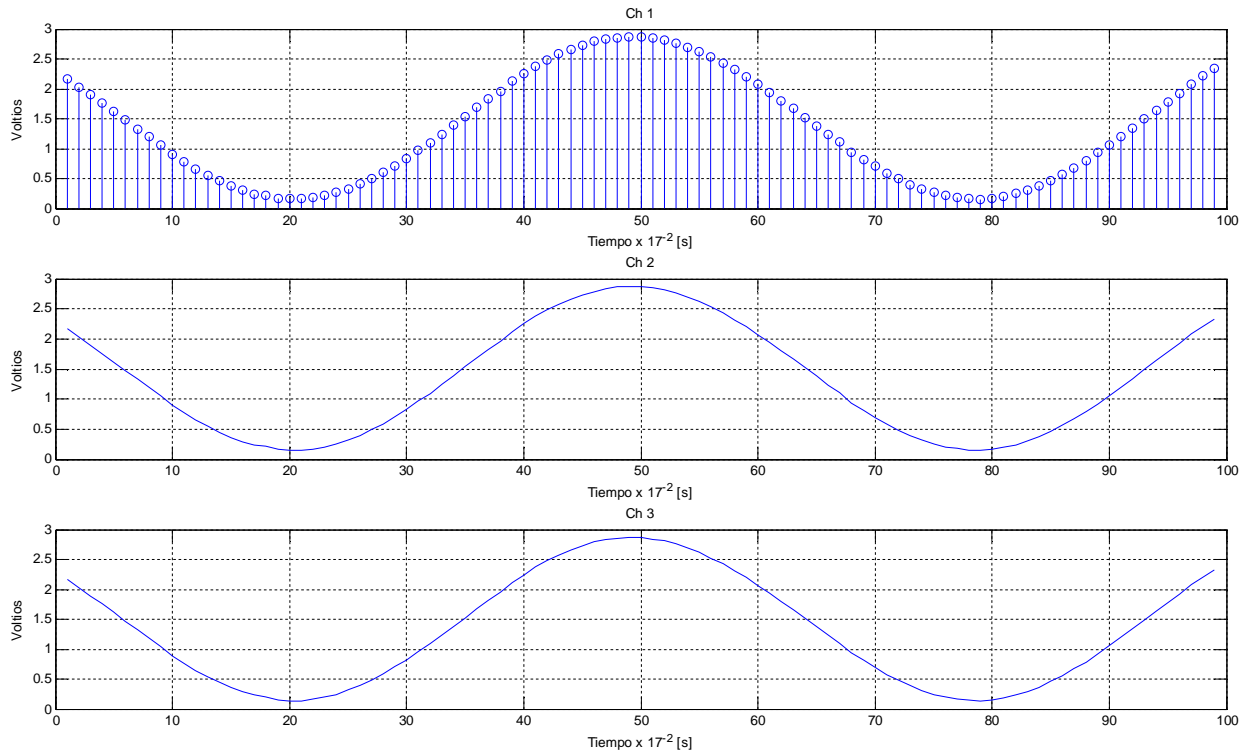
4.2.2 RESULTADOS CONVERSIÓN ANÁLOGO- DIGITAL

Para garantizar que la conversión análogo-digital estuviera funcionando correctamente en el microcontrolador, se realizaron una serie de pruebas en donde el objetivo principal es lograr la reconstrucción de la señal, después de los procesos de adquisición, digitalización de la señal y transmisión de datos al computador; la señal se reconstruye a partir de los archivos de texto que genera la interfaz, donde quedan almacenadas todas las muestras de cada una de las 14 variables. Se

realizan la adquisición de una señal seno a diferentes frecuencias para cada modo de operación: Offline y Online.

Modo Online

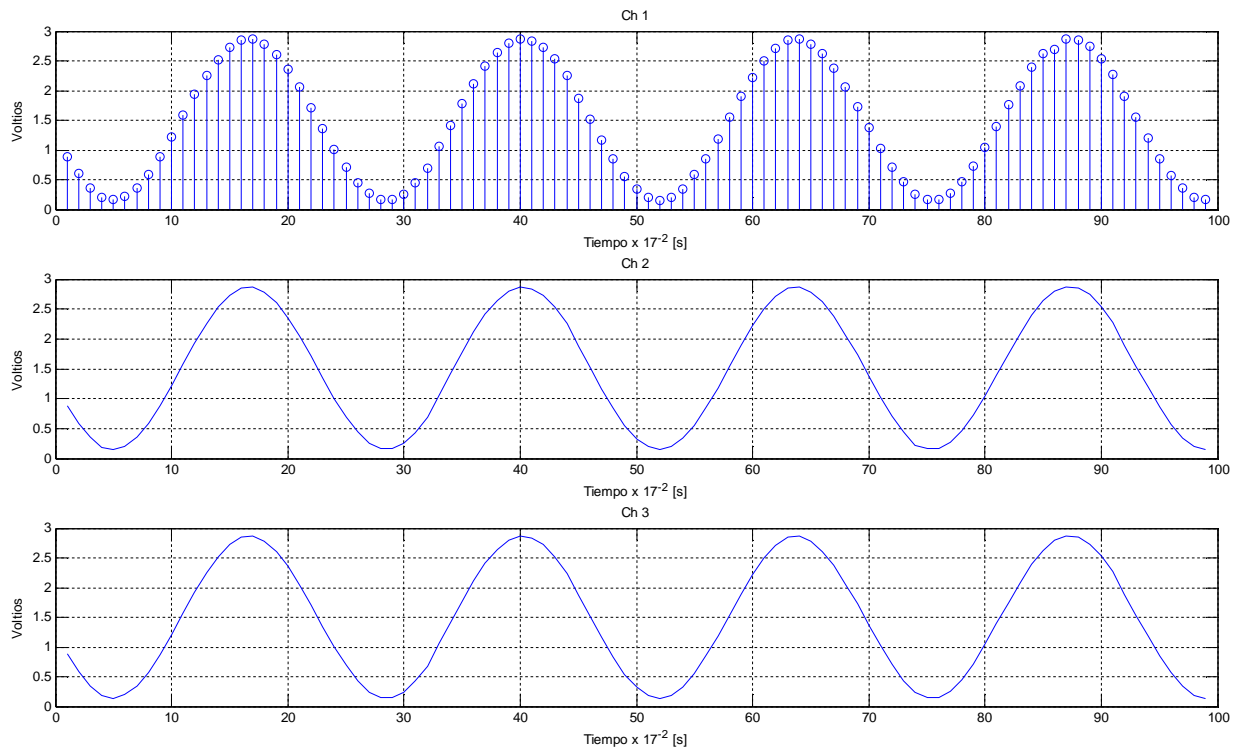
Ch1 : Frecuencia: 0.1Hz



Señal seno digitalizada 0.1 Hz Figura 42

La Figura 42 muestra la señal obtenida a través de tres diferentes canales, se observa la cantidad de muestras tomadas y la reconstrucción de la señal; también se evidencia que el periodo de la señal reconstruida es $(60 \cdot 0.17)$ s con lo cual se obtiene una frecuencia de $1/(60 \cdot 0.17) = 0.098$ Hz que corresponde a la señal de entrada.

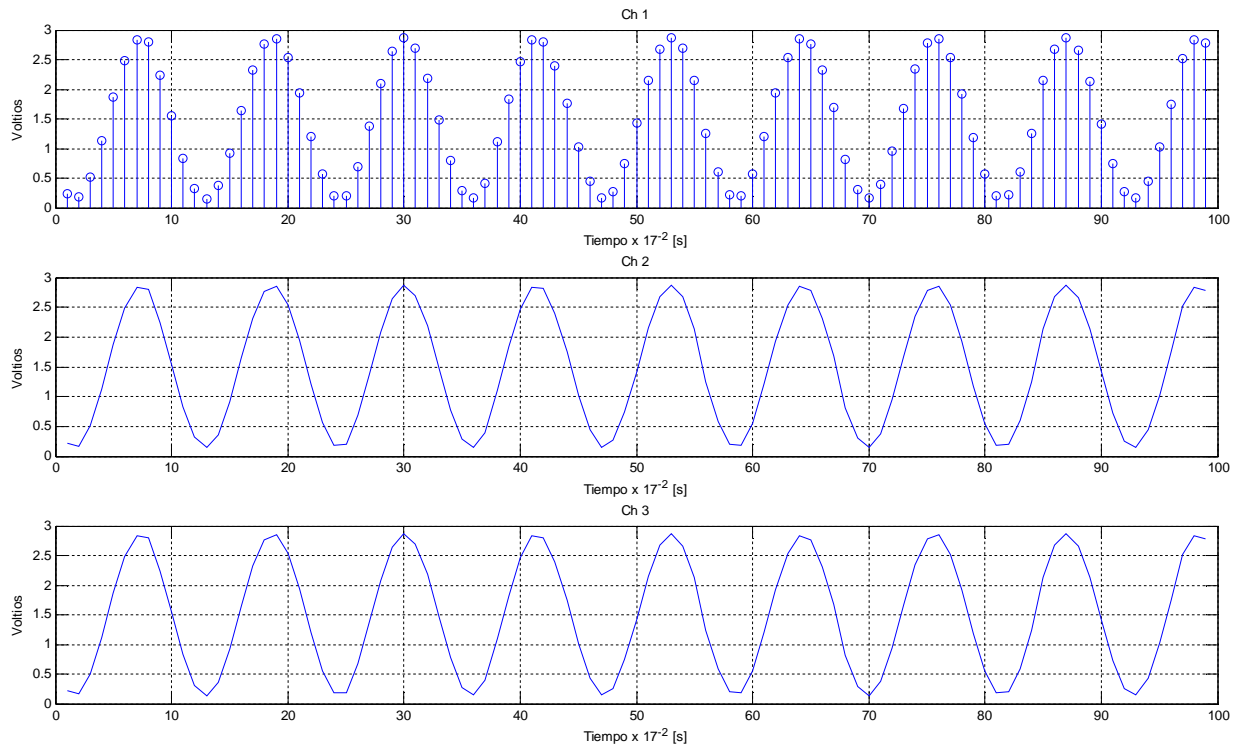
Ch2 : Frecuencia: 0.25Hz



Señal seno digitalizada 0.25 Hz Figura 43

En la figura 43 se evidencia que la señal de entrada es de mayor frecuencia que en el caso anterior; si se realiza el cálculo visual de la frecuencia se obtiene un resultado de 0.245 Hz.

Ch3 : Frecuencia: 0.5Hz



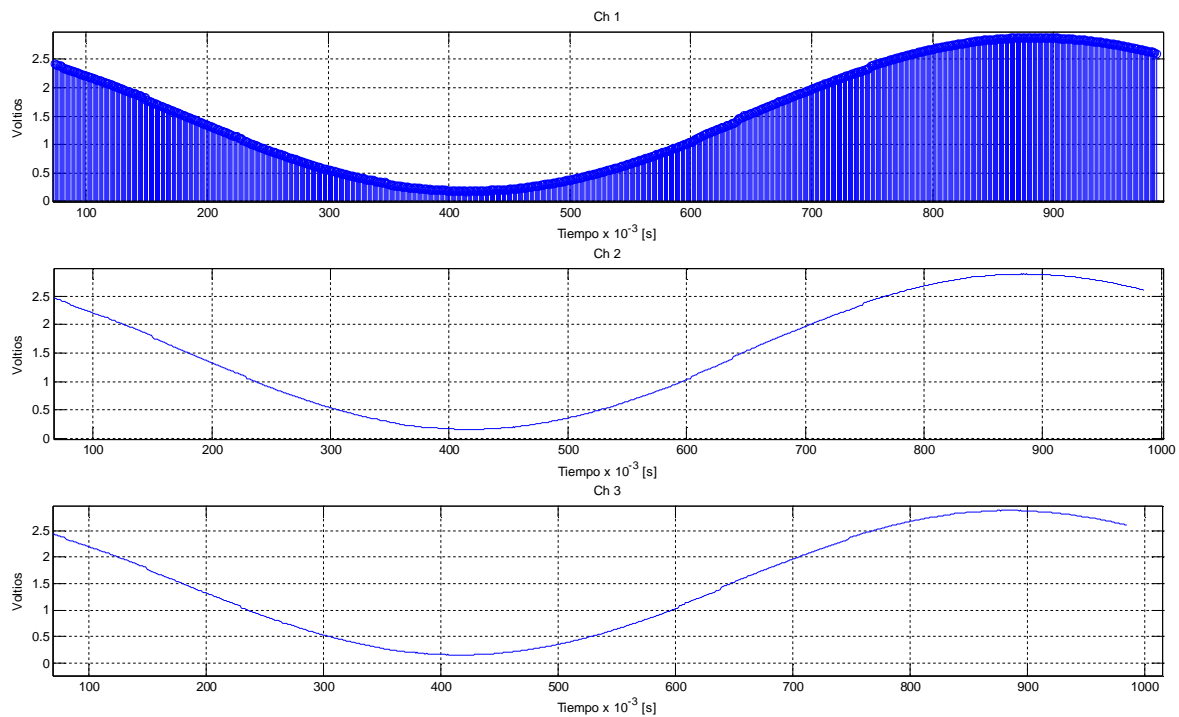
Señal seno digitalizada 0.5 Hz Figura 44

En la Figura 44 se observa que a mayor frecuencia en la señal de entrada, serán menores las muestras tomadas en un solo periodo; esto se debe a que el tiempo de envío entre trama y trama es constante por lo tanto para señales con menor periodo también tendrán menor número de muestras y será más difícil su reconstrucción. La máxima frecuencia en la cual se garantiza que se pueda reconstruir la señal es de 0.6 Hz para el modo Online.

Modo Offline

En el modo offline se realizaron las siguientes pruebas:

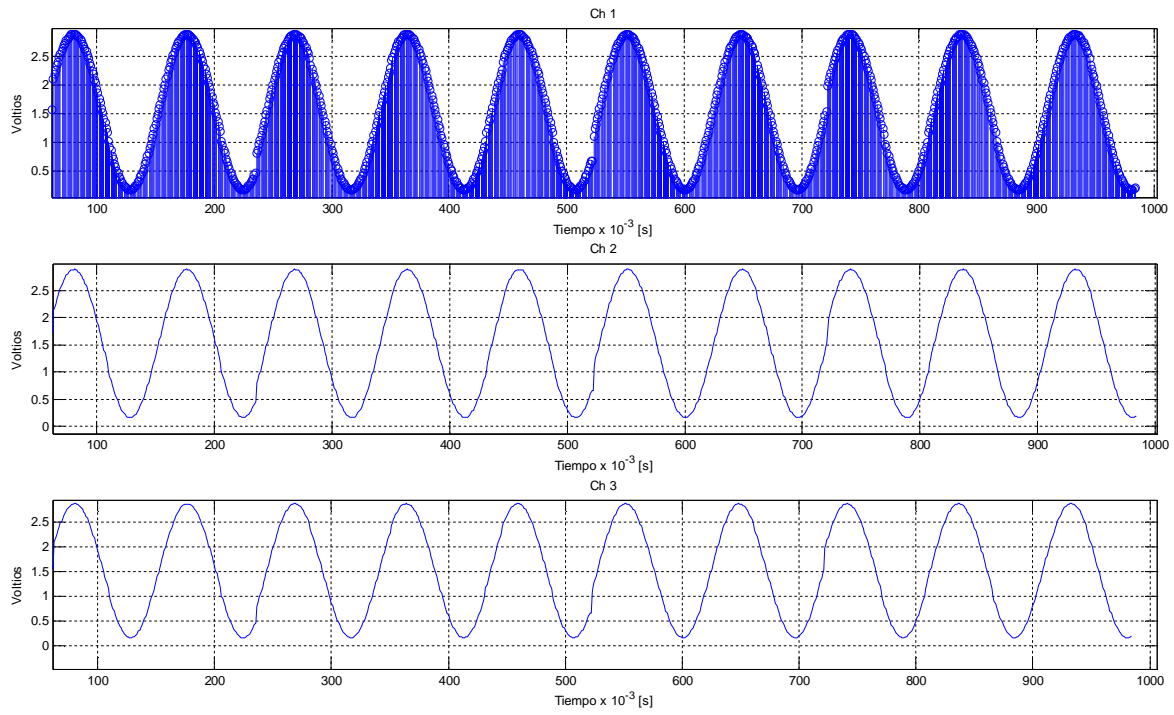
Ch1 : Frecuencia: 0.1Hz



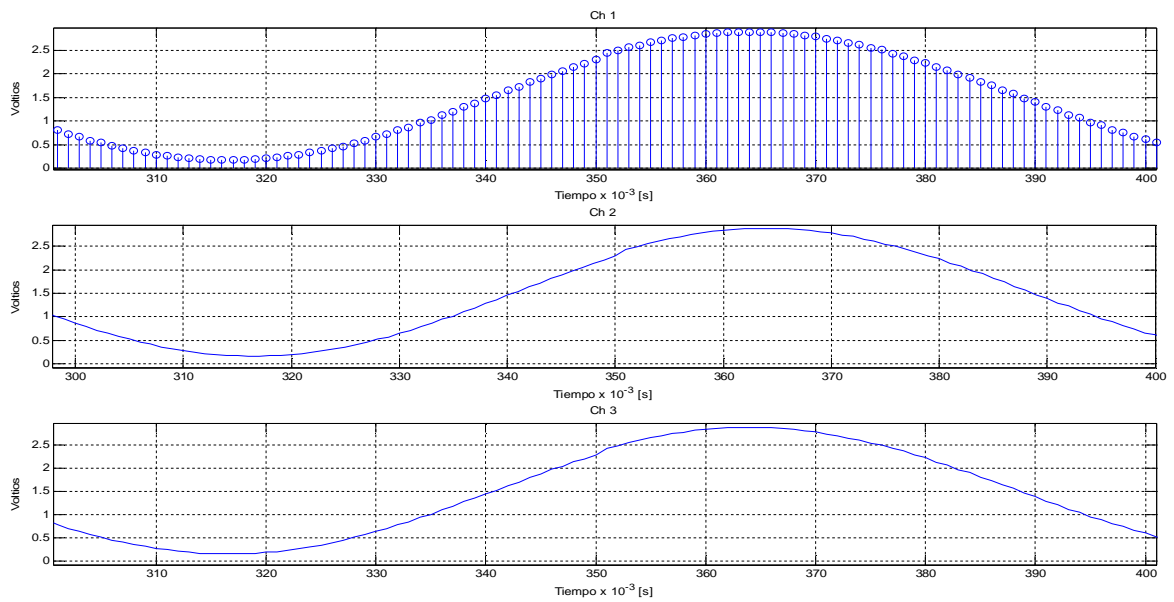
Señal seno digitalizada 0.1 Hz Offline Figura 45

La Figura 45 muestra la reconstrucción de la señal en modo Offline, se ve claramente que la cantidad de puntos tomadas en el modo Offline es mucho mayor que en Online para una señal de la misma frecuencia; esto se debe a que en el modo Offline el tiempo de envío entre tramas es mucho menor, lo cual hace que haya una mayor frecuencia de transmisión de datos y una mayor calidad en la reconstrucción de la señal original.

Ch3: Frecuencia: 1Hz

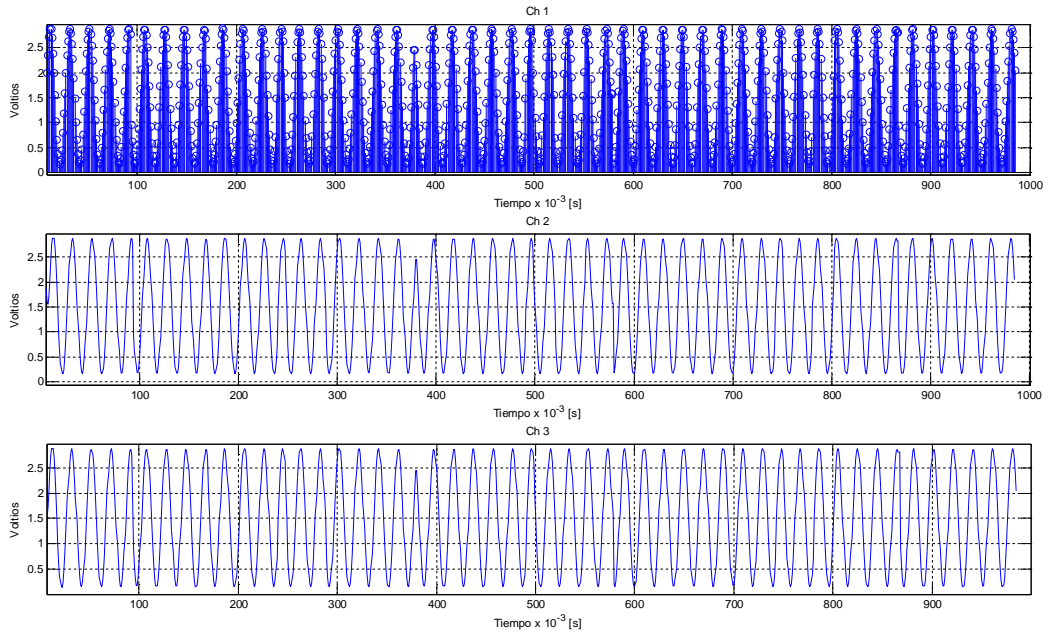


Señal seno digitalizada 1 Hz Offline. Figura 46



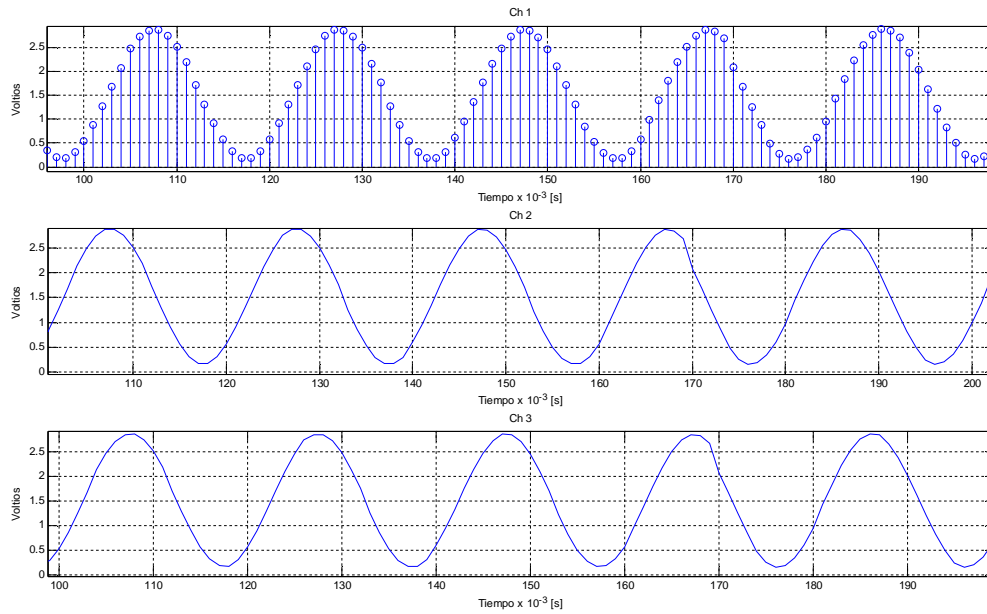
Segmento señal seno digitalizada 0.1 Hz Offline. Figura 47

La figura 47 es un segmento en tiempo de la Figura 46; en esta última se puede apreciar claramente que la frecuencia de la señal reconstruida es la misma que la señal original.



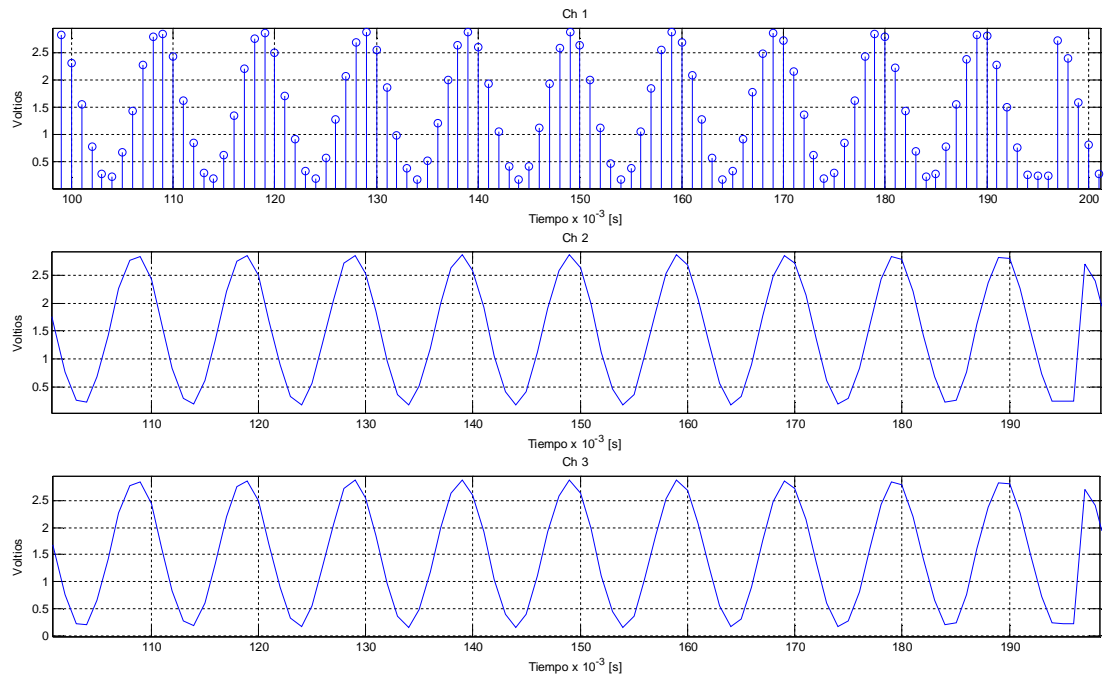
Señal seno digitalizada 5 Hz Offline Figura 48

Ch3 : Frecuencia: 5Hz

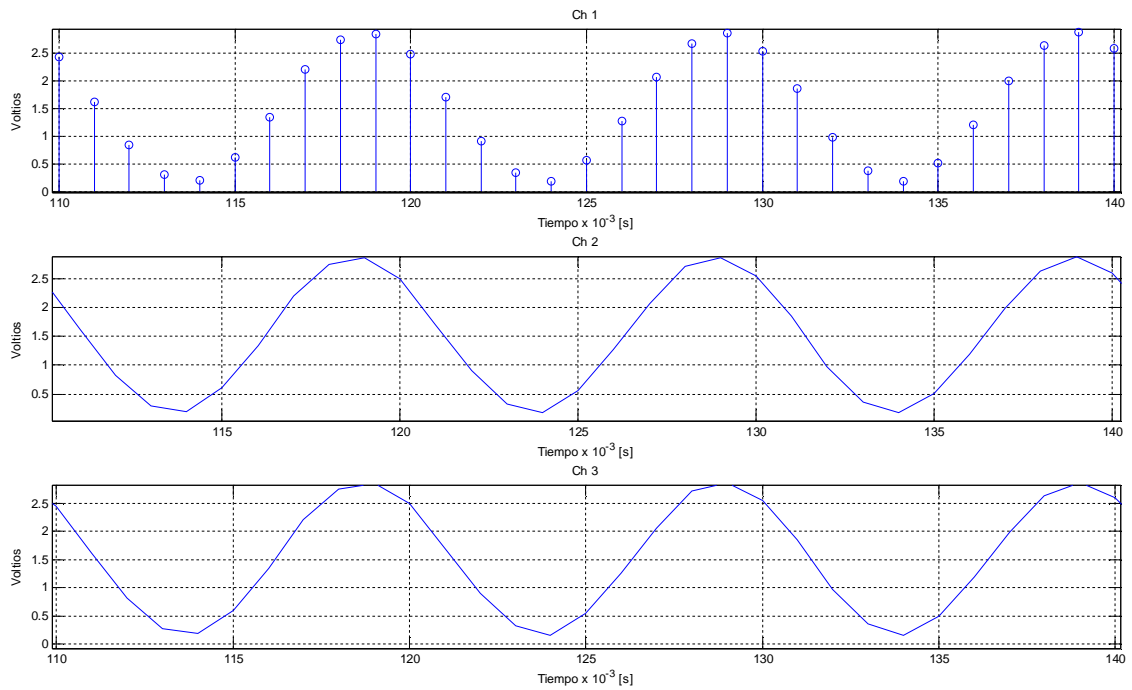


Segmento Señal seno digitalizada 5 Hz Offline. Figura 49

Ch3 : Frecuencia: 10Hz



Señal seno digitalizada a 10Hz Offline Figura 50

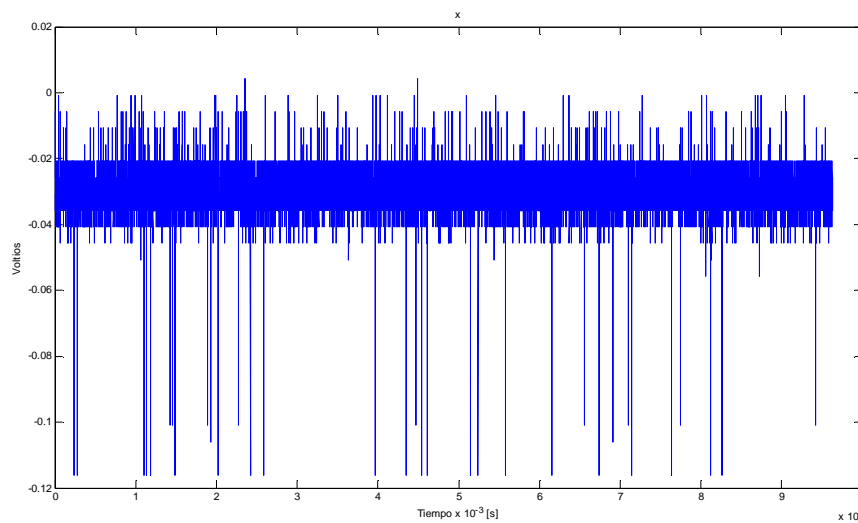


Segmento señal seno digitalizada 10 Hz Offline Figura 51

La Figura 51 corresponde a la señal de mayor frecuencia que se puede reconstruir confiablemente en el modo Offline (10Hz), de otro modo la señal perdería calidad. Es importante resaltar que las graficas anteriores verifican el hecho que en el modo Offline se pueden muestrear señales más rápidas que en el Online debido a sus diferencias en la transmisión de datos al computador

4.2.3 Piso de Ruido

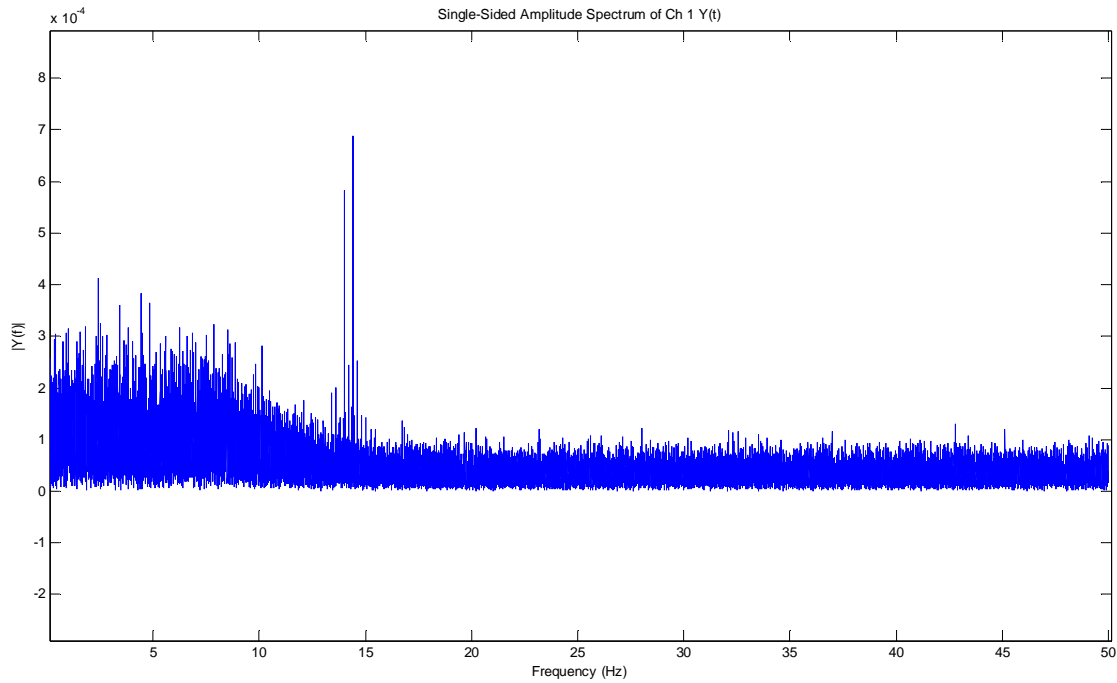
Con el fin de detectar el ruido presente en el sistema se realiza una prueba en la cual las entradas son conectadas a tierra físicamente y se realiza una conversión de datos prolongada; la Figura 52 muestra la respuesta en tiempo obtenida.



Piso de ruido en tiempo. Figura 52

Se evidencia que se presenta un nivel de ruido constante en el sistema, con una amplitud de 20 mV.

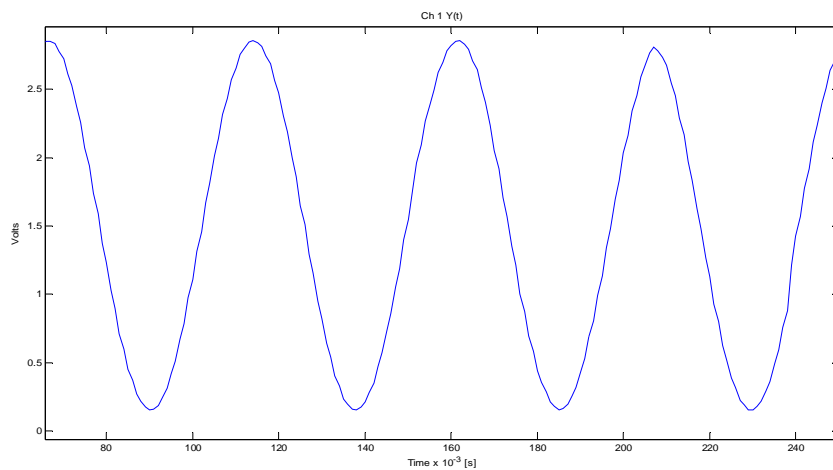
Se realiza la Transformada de Fourier para diferenciar los componentes de ruido en las diferentes



Piso de ruido en frecuencia. Figura 53

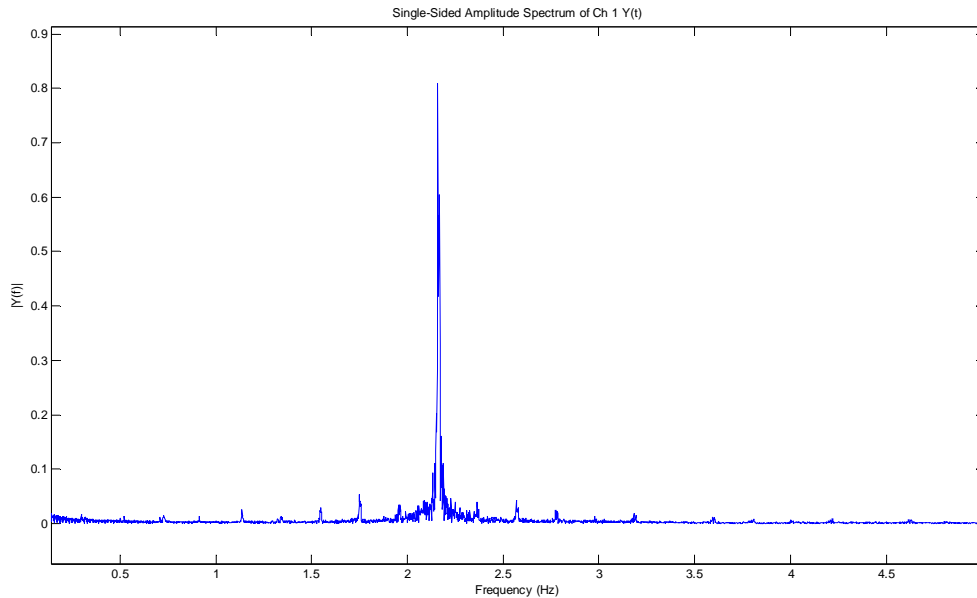
4.2.4 Distorsión de la señal muestreada

Con el fin de determinar la calidad de la señal reconstruida se realiza un análisis de los componentes en las diferentes frecuencias; para esto se realiza la transformada de Fourier.



Señal seno 2Hz. Figura 54

La Figura 54 muestra un segmento de la señal reconstruida en tiempo; dicha señal tiene una frecuencia aproximada de 2 Hz.



FFT Señal seno a 2Hz Figura 55

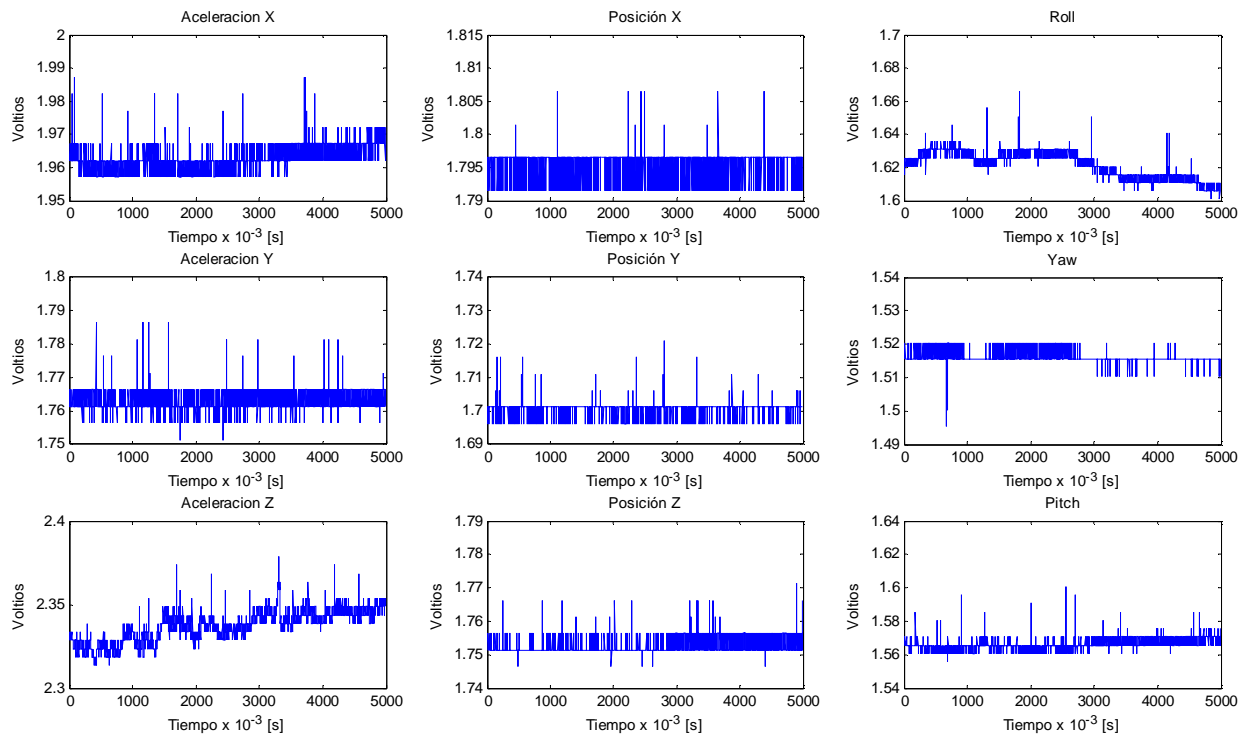
La figura 55 corresponde a la señal reconstruida luego de hacerle FFT (Fast Fourier Transform); se evidencia solo un componente de amplitud relevante que coincide con la frecuencia de la señal original; esta grafica indica que el sistema tiene una buena digitalización de la señal, ya que a la hora de la reconstrucción no presenta componentes de otra frecuencia con amplitud relevante; es decir es una señal con baja distorsión armónica

4.3 RESULTADOS UTILIZANDO SENSORES – EN ESTADO ESTABLE

Una vez garantizada la capacidad del sistema para adquirir señales análogas y reconstruirlas evitando la pérdida de información, se procede a realizar pruebas incluyendo la IMU y el GPS; es decir se realizan pruebas del sistema incluyendo la sensorica correspondiente.

Con el fin de establecer variaciones en las señales adquiridas ante una “estabilidad” del sistema; se realiza una prueba en la cual el sistema de adquisición de datos no presente ningún movimiento por un determinado tiempo.

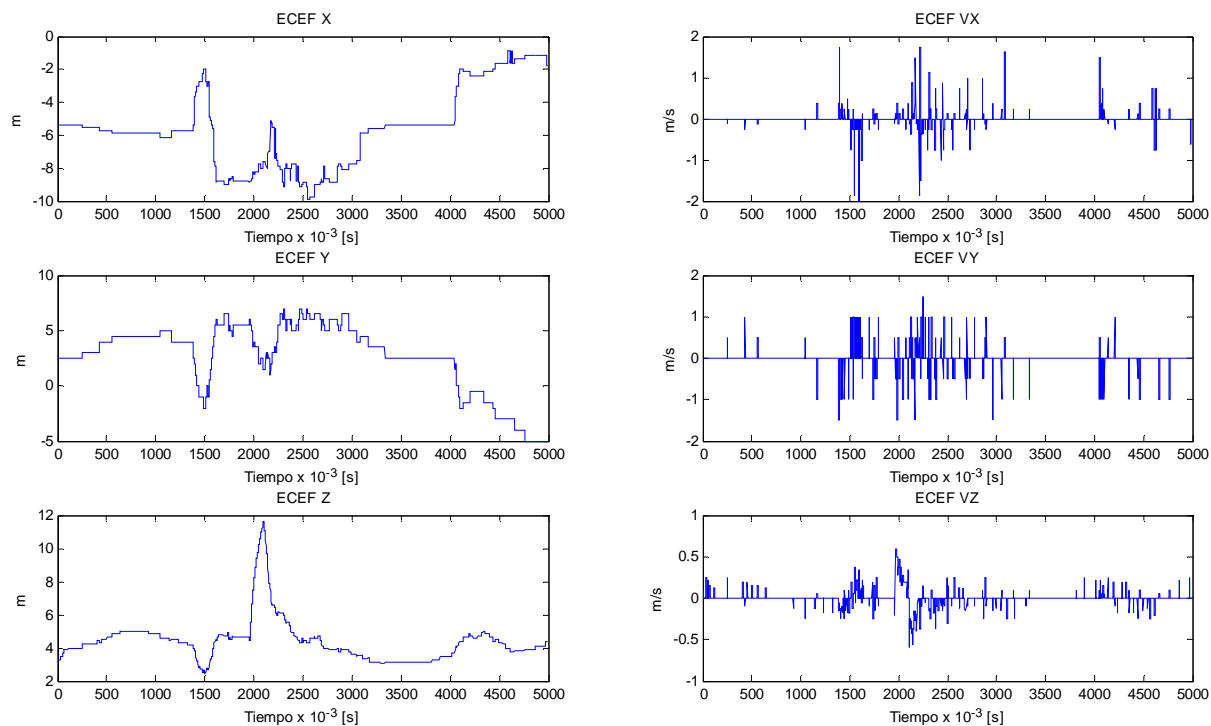
La Figura 56 muestra el voltaje adquirido por SADA en cada una de las 9 variables provenientes de la IMU.



Resultados análogos en prueba estable. Figura 56

Se obtiene como resultado una estabilidad en voltaje para cada uno de los canales; aunque se presentan variaciones, las magnitudes están siempre alrededor de un valor DC constante; es de esperarse este tipo de respuesta; ya que cada uno de los sensores posee un offset que indica que SADA está en reposo, es por eso que se evidencian voltajes de 1.6 en Roll, Yaw y Pitch, o de 2,35 en la aceleración en z.

También es importante hacer el mismo análisis para las variables digitales que se están adquiriendo a través del GPS; por lo tanto de la misma prueba se obtienen los resultados plasmados en la Figura 57.



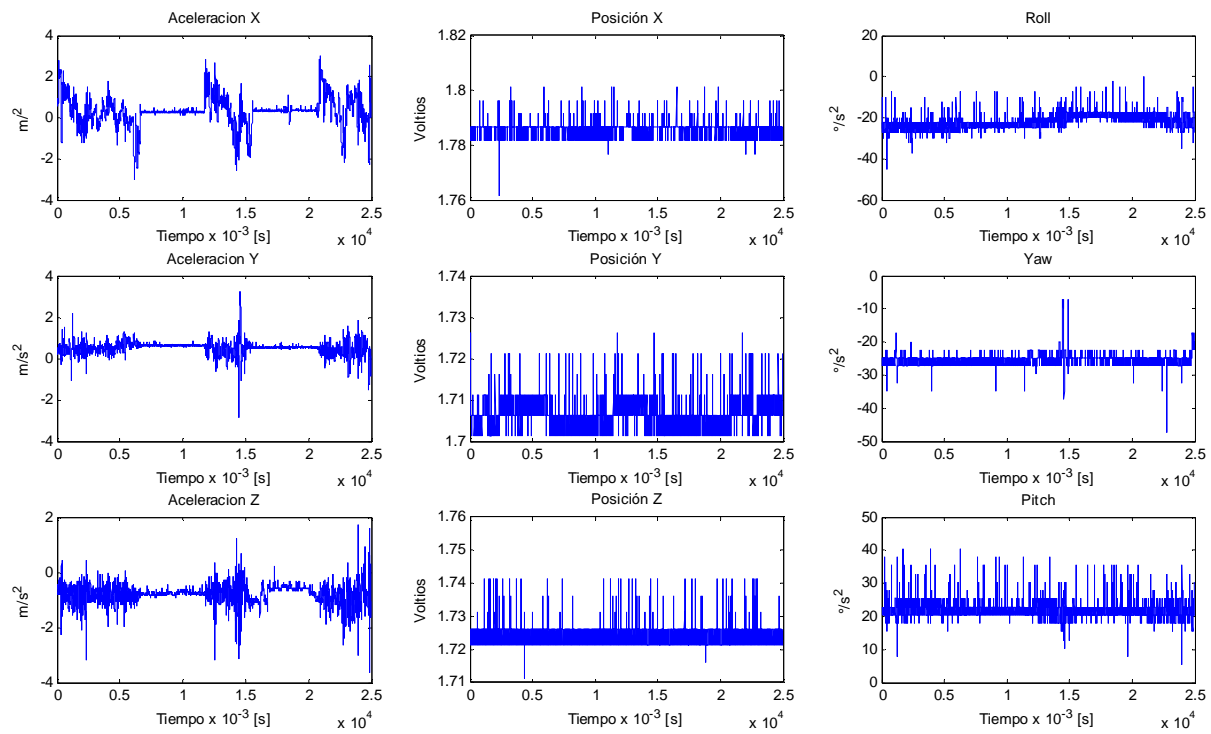
Resultados digitales en prueba estable. Figura 57

Sabiendo que las coordenadas ECEF se refieren a la distancia en metros con respecto a un punto de origen, y que las velocidades son los cambios de posición con respecto al tiempo, el resultado que se espera al realizar una adquisición en la cual no hay ningún tipo de desplazamiento, es completamente nulo. En la Figura 57 se muestra el resultado obtenido en este caso; es evidente que ni las distancias en metros ni las velocidades son nulas pero si se encuentran dentro del rango de error que puede presentarse en la medición del GPS (Ver anexo A.12); las distancias presentan variaciones en el peor de los casos de 10 m; dichas variaciones se ven reflejadas simultáneamente en las velocidades; ya que al presentar una variación de posición de una muestra a la otra indica entonces un cambio de velocidad ya que esto correspondería a diferencia de posiciones en un intervalo de tiempo determinado.

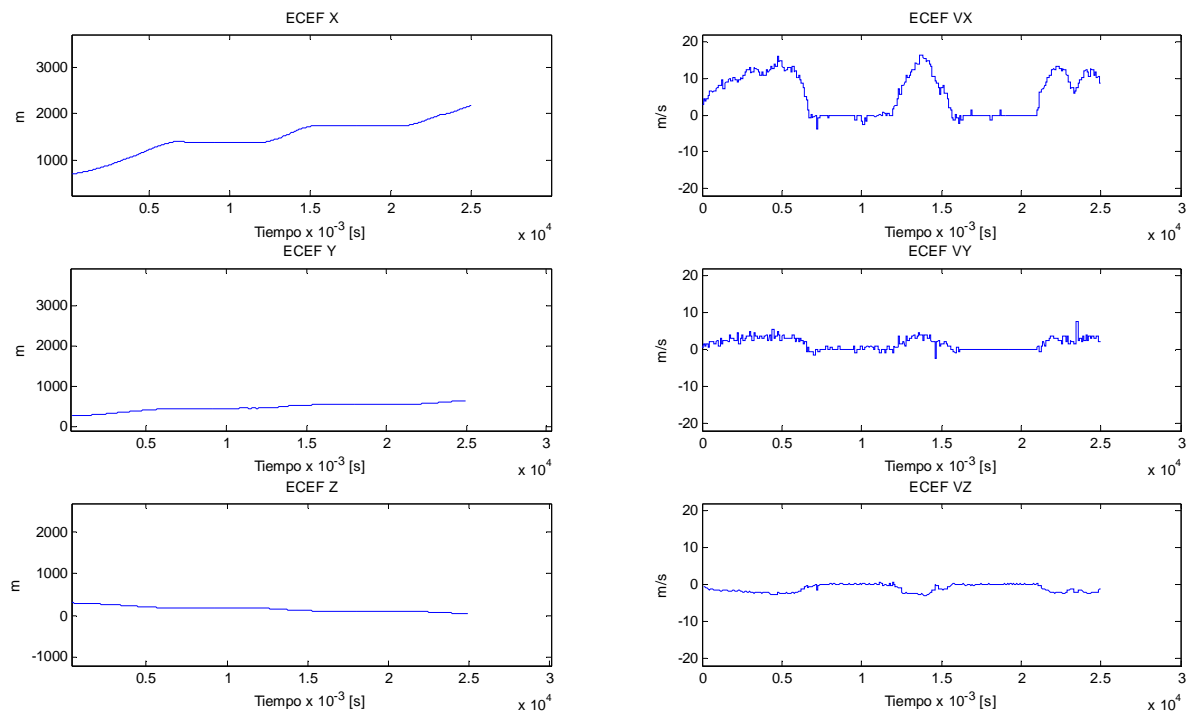
4.4 RESULTADOS DEL SISTEMA EN MOVIMIENTO

Para verificar la reacción del sistema frente a variaciones de velocidades y desplazamientos se realizan pruebas en donde se adquieren datos en modo Offline mientras el sistema se encuentra dentro de un carro en movimiento.

Las siguientes graficas corresponden a los resultados obtenidos en dichas pruebas.



Resultado N° 1 Análogo en movimiento. Figura 58



Resultado N° 1 Digital en movimiento. Figura 59

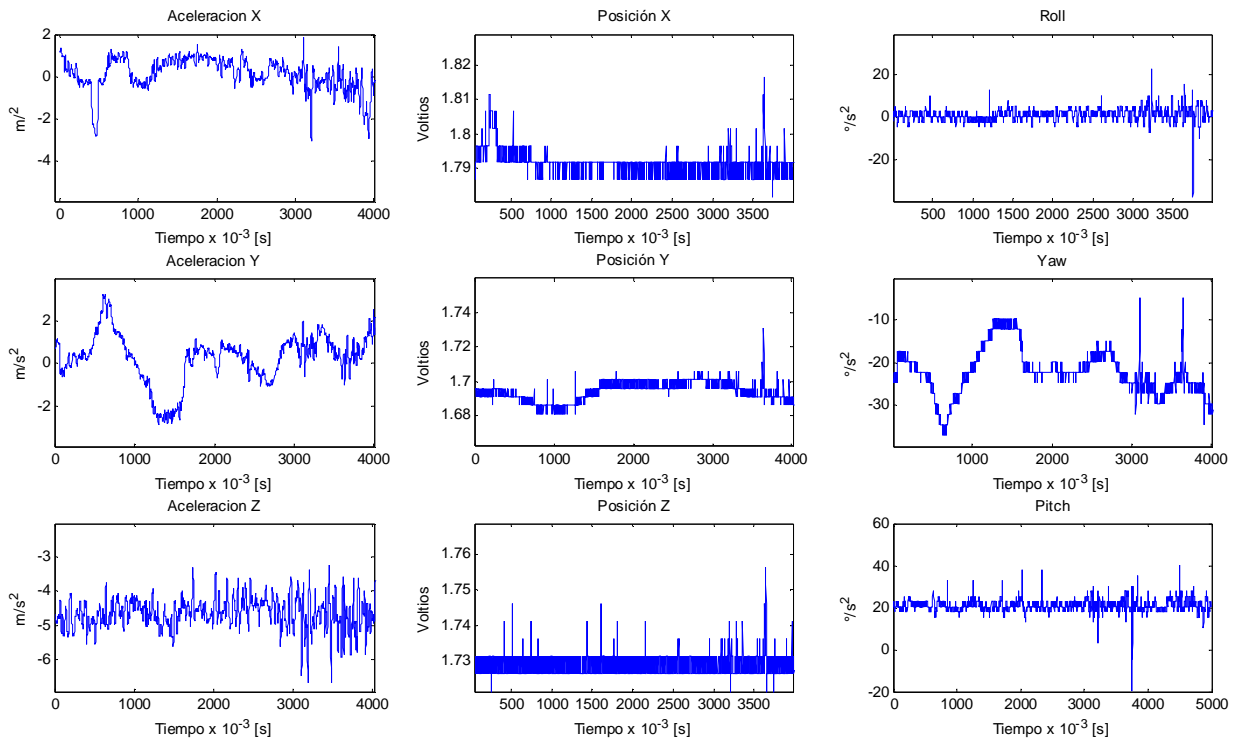
La Figura 58 y la Figura 59 evidencian el comportamiento de las variables adquirida en el transcurso de la adquisición; a continuación se describirá el comportamiento del carro en el mismo intervalo de tiempo con el fin de analizar los datos graficados:

Muestras	Comportamiento
0-1200	Subiendo un Puente
1200-2200	Bajando el puente
6500	frena
11800	Arranca
14800	Desvió un hueco
20000	Arranca

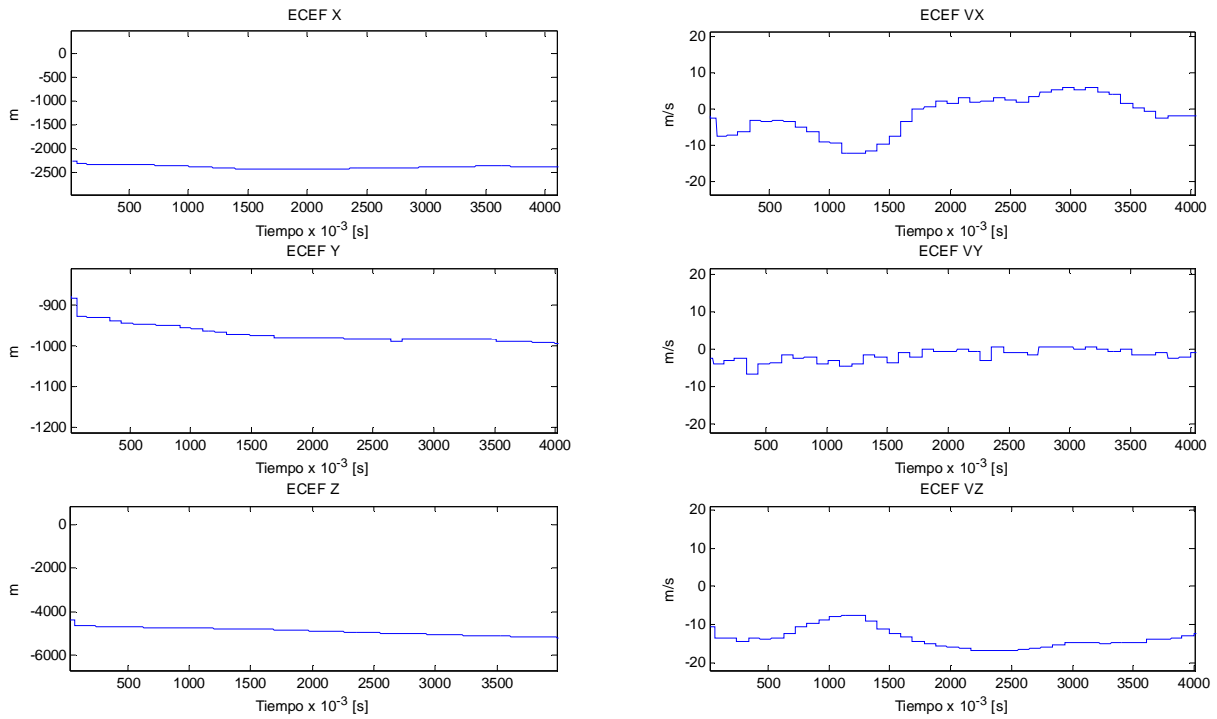
Al analizar las graficas de las aceleraciones se evidencia que existen tanto aceleraciones positivas y negativas mientras se sube y se baja del puente; una vez el carro se detiene en la muestra 6500 se evidencia una aceleración nula hasta la muestra 12000 que es justo cuando el carro arranca nuevamente; también se presenta una estabilidad en aceleración desde la muestra 16000 hasta la muestra 21000 debido a que el carro estuvo detenido por un semáforo.

Este comportamiento también se evidencia en las velocidades en el eje X y en el eje Y; ya que en los intervalos en los que el carro está detenido la velocidad en ambos ejes es completamente nula; a diferencia del aumento progresivo de la velocidad mientras el carro acelera y disminución cuando el carro desacelera para detenerse.

Es importante resaltar el aumento progresivo en las Coordenadas ECEF(X,Y,Z); esto se debe a que mientras estaba el carro en movimiento se siempre se alejaba del punto de origen, por lo tanto es normal que las distancias medidas en metros aumenten de tal manera

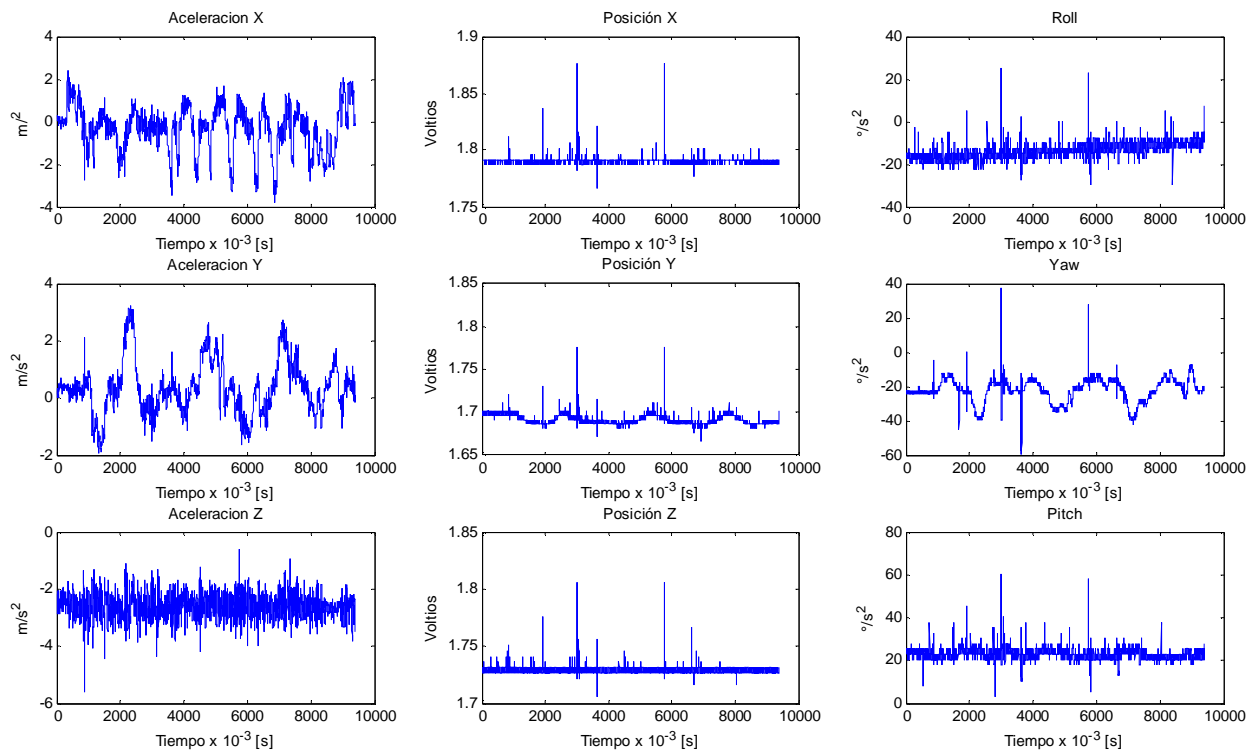


Resultado N° 2 Análogo en movimiento. Figura 60

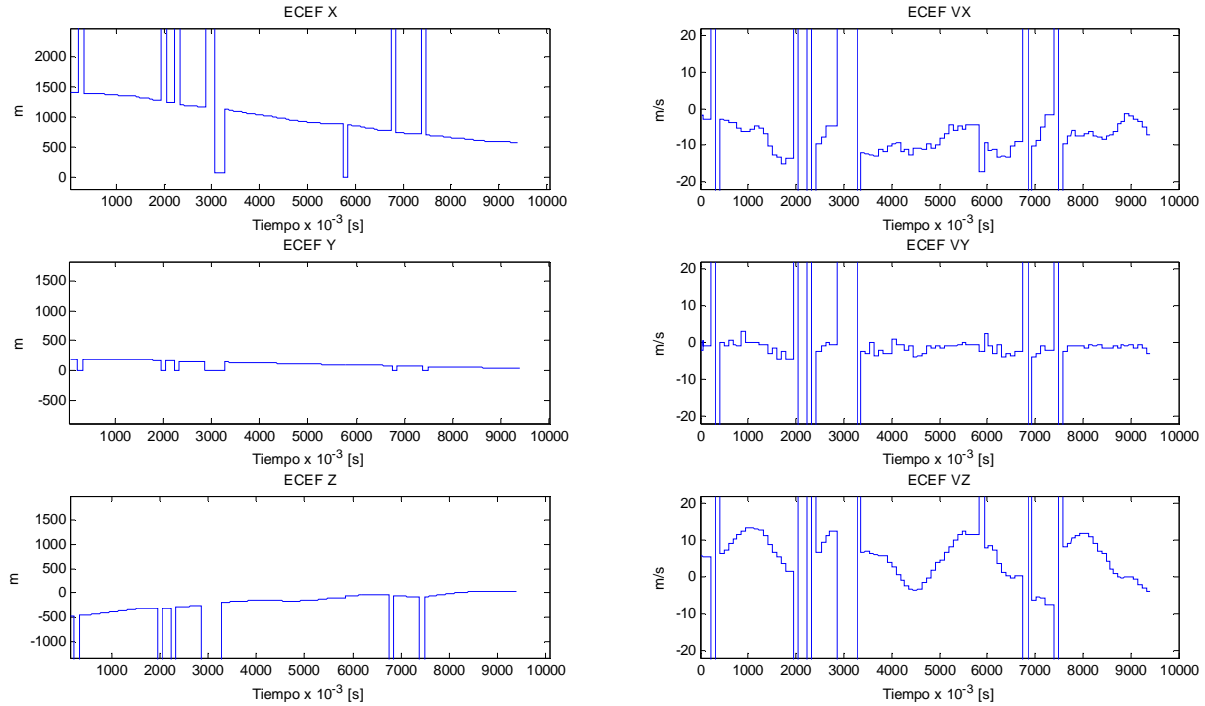


Resultado N° 2 Digital en movimiento Figura 61

En la Figura 62 y 63 se presenta una nueva adquisición de datos mucho más corta, donde lo más importante a resaltar es la aceleración en una curva desde la primera muestra hasta la muestra 500, en donde se evidencia después una desaceleración; la aceleración en curva es importante resaltarla ya que esta interviene directamente en las mediciones de Yaw; si se observa la grafica de aceleración en Y y la grafica de Yaw es notoria la relación dependiente que poseen especialmente en la primera mitad de la adquisición.



Resultado N° 2 Análogo en movimiento Figura 62



Resultado N° 3 Digital en movimiento Figura 63

La Figura 64 y 65 representan una tercera adquisición de datos en donde el carro se encontraba descendiendo de la Calera; se observan variaciones en las aceleraciones que se ven reflejadas en Yaw principalmente; esto se debe a las curvas presentes en la trayectoria del carro. Es de gran importancia notar que en las Coordenadas EFEC en el eje X y Z se presenta una reducción en la distancia al punto de origen; lo cual es congruente ya que se estaba retornando a las coordenadas base del sistema.

En la figura 65 se presentan saltos en las señales de Coordenadas y velocidades; estos saltos se dan cuando el GPS pierde cobertura; esto hace que se presente una pérdida de información, y que al momento de realizar los cálculos correspondientes a distancias y velocidades se genere un error, una vez el GPS recupera su cobertura se realiza un nuevo cálculo con datos verídicos.

5 CARACTERISTICAS SADA

POLARIZACIÓN

Max 30V - Min 8V

Max 380mA

ENTRADAS

- **Canales Análogos**
 - 14 Canales Análogos
 - Sensitividad 4mV
 - Frecuencia de Corte Filtros. Min 5Hz - Max 30kHz.
 - Frecuencia de Muestreo. Min 1kHz – Max 10kHz.
 - Voltajes de Entrada. Min 0V – Max 3.3V.
- **Digitales**
 - Conector DB9, protocolo RS-232.
 - Velocidad de Comunicación 115200 Baudios.
- **Programación**
 - Pines de Programación Pickit 3.
- **Polarización**
 - 1 Conector de entrada de Polarización

SALIDAS

- **PWM**
 - 4 Canales de Salida.
- **GPS**
 - Pines de Salida protocolo TSIP, PPS.

FRECUENCIA DE OSCILACIÓN

- Min 30MHz – Max 120MHz.

COMUNICACIÓN

- **Modo Online**
 - Máxima Frecuencia Adquirida 1Hz.
- **Modo Offline**
 - Máxima Frecuencia Adquirida 10Hz.
- **PROTOCOLO**
 - Protocolo de comunicación RS 232, con transmisión de datos binario para canales análogos, y en modo ASCII para los datos del GPS y el ultrasonido.

CONSUMO

- A máxima velocidad del reloj: 3.19W.

DIMENSIONES

- 10.8cm x 12.3cm

VARIABLES

- **DIGITALES**
 - Sistema de Coordenadas ECEF: X, Y, Z, Vx, Vy, Vz. [m]

NOTA

Las características de los sensores contenidos en la IMU, GPS y ultrasonido se encuentran especificadas en los manuales respectivos que se señalan en las referencias.

6 CONCLUSIONES

SADA es un sistema de adquisición de datos portable y versátil que fue diseñado especialmente para ser implementado en una aeronave del tipo Quadrotor. Para su realización fue necesario tener en cuenta varias consideraciones a la hora de la implementación.

Como primera medida en el desarrollo del sistema fue necesario el uso de acopladores de señal que permitieran conservar la región lineal de los filtros antialiasing debido a los voltajes de polarización con los cuales se estaba trabajando.

La implementación de un protocolo de comunicación binario, permite tener una actualización de datos de las señales capturadas mucho más rápido minimizando el tiempo de procesamiento y mejorando la comunicación entre el sistema de adquisición y el PC donde van a ser graficados y almacenados los datos. El diseño de una interfaz gráfica le brinda al usuario la posibilidad de observar el comportamiento de cada una de las variables adquiridas tanto en modo online adquiriendo señales de hasta 1Hz y en modo offline logrando obtener señales de hasta 10Hz. De igual forma la interfaz le permite al usuario cambiar características de la tarjeta de adquisición, tales como los tiempos de muestreo y la frecuencia de corte de los filtros anti-aliasing desde la interfaz, hace que el sistema tenga una mayor versatilidad.

Dado que el sistema de adquisición cuenta con señales análogas proveniente de la IMU y digitales en el diseño del hardware fue necesaria la implementación de planos de tierra diferentes para componentes análogos y componentes digitales con el fin de evitar el acoplamiento de señales digitales en los circuitos análogos. Para el sistema fue implementada la teoría de “*conexión en estrella*” la cual consiste en conectar en un único punto los planos de tierras, sobre el dispositivo que contiene las dos tipos de alimentación, esto con el objetivo de evitar el acoplamiento de señales por los caminos donde retorna la corriente tanto en circuitos análogos como en circuitos digitales.

El uso de un software libre llamado Kicad utilizado para la realización del circuito impreso, le da también una mayor versatilidad al sistema de adquisición ya que se tiene la posibilidad de modificar el circuito impreso sin necesidad de adquirir una licencia.

Este sistema de adquisición es el inicio de un proyecto a mayor escala que abre la puerta a futuros proyectos en el área de aviación en la universidad que puedan llevar a desarrollos futuros como lo son un sistema de control que permita realizar vuelos autónomos y aplicaciones que ayuden a mejorar las capacidades tecnológicas del país.

REFERENCIAS

- [1] Conceptos e historia de la Aviación, Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Aviación>
- [2] Instrumentación Aeronáutica, Disponible en:
[http://es.wikipedia.org/wiki/Instrumentos_de_control_\(avión\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Instrumentos_de_control_(avión))
- [3] MERIÑO, ELIAS. Historia de la Aviación Colombiana, Disponible en:
http://themerinos.com/el_hangar_colombiano/aviacion_colombiana.htm
- [4] Fuerza Aérea Colombiana, Historia de la Aviación Militar, Disponible en:
<http://www.fac.mil.co/index.php?idcategoria=80>
- [5] Avianca, Orígenes de la aviación Comercial en Colombia, Disponible en:
<http://www.avianca.com/Inicio/Navegacion/AcercaAvianca/Nuestra+historia/es/Naceunahistoriacionalas.html>.
- [6] Fernando Gandía, “Sistema de Adquisición de datos de una aeronave no tripulada UAV”, España, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica, Publicado en:
<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-12676>
- [7] “Data acquisition integrated system for UAV Monitoring of maritime and coastal Environment”, Italia, Publicado en:
http://www.manunet.net/index.php?option=com_content&view=article&id=50:data-acquisition-integrated-system-for-uav-monitoring-of-maritime-and-coastal-environment&catid=5:success-stories&Itemid=30
- [8] Manual Copernicus GPS Receiver [en línea]. Sunnyvale CA, USA, Trimble, [fecha de consulta: 22 de Diciembre 2009]. Disponible en: <http://gpsd.berlios.de/vendor-docs/trimble/trimble-copernicus.pdf>
- [9] IMU 6 Degrees of Freedom v4 Data Sheet [en línea]. Boulder Colorado, USA, Sparkfun Electronics, [fecha de consulta: 25 de Septiembre 2009].
Disponible en: <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/IMU/6DOF-v4-Rev1.pdf>

CAPITULO 2

- [10] ALCALÉ, Javier “Escuela de vuelo” http://escueladevuelo.iespana.es/instrumentos_7.htm
- [11] IINVENSENSE, Inc., “Integrated Dual-Axis Gyro” Año 2006, 3150A Coronado Drive, Santa Clara, CA 95054 U.S.A. 4. www.sparkfun.com/datasheets/Components/IDG-300_Datasheet.pdf
- [12] HONEYWELL INTERNATIONAL INC. “1, 2 and 3 Axis Magnetic Sensors HMC1051 /HMC1052L /HMC1053 ” December 2006 12001 Highway 55 Plymouth, MN 55441
www.magneticsensors.com/datasheets/HMC105X.pdf.

CAPITULO 3

[13] Ing. Sandra Ochoa, Ing. Carlos Pérez, Ing., Carlos Sierra, “Sistema Electrónico de Adquisición, Registro y Transmisión de Señales Sísmicas” Publicado en el 2007.

[14] Datum Transformation of GPS Transformation, Application Note, 5 de Julio de 2009.

[15] Microchip Technology, “Digital Signal Controller dsPIC30F6010A/6015 Datasheet”, Disponible en: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en025842>.

CAPITULO 4

[16] *The Data Conversion Handbook*, edición de internet, noviembre 2007, http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/39-06/data_conversion_handbook.html, consultada 4 de octubre de 2010.

INDICE DE FIGURAS

Movimientos de roll, pitch y yaw de una aeronave. Figura 1.....	13
Plano de Desplazamiento de la Aeronave. Figura 2	14
Movimiento de Pitch debido al empuje del Aire sobre el Aeronave. Figura 3.....	14
Modelo Sencillos de la Capacitancia del Acelerómetro. Figura 4.....	16
Proceso de Adquisición Figura 5	18
Amplificador Operacional en Configuración Seguidor. Figura 6.....	19
Esquemático voltaje de offset de acoplador de señal Figura 7	20
Respuesta en Frecuencia Figura 8.....	21
Frecuencia de corte y orden del Filtro. Figura 9.....	22
Información de tramas GPGGA y GPVTG del GPS. Figura 10.....	26
Sistema de Coordenadas ECEF Figura 11.....	27
Coorenadas ECEF y Elipsoide Referencia. Figura 12	28
Vista MPLAB Rutinas Sistema de Adquisición. Figura 13	29
Diagrama de Flujo Rutina Principal Sistema de Adquisición. Figura 14.....	30
Diagrama de Flujo Conversión Análoga Digital. Figura 15.....	31
Diagrama de Flujo Interrupción Captura Datos GPS. Figura 16	32
Diagrama de Flujo Interrupción Cambio Frecuencia de Corte y Cambio Frecuencia de Muestreo. Figura 17	33
Diagrama de Flujo Captura de bits Modulo UART Emulado. Figura 18.....	35
Tramas GPS fuera de Cobertura. Figura 19	39
Diagrama de Flujo Función que Organiza las tramas del GPS. Figura 20.....	40
Funciones de Error para determinar si las Tramas Capturadas del GPS contienen datos validos. Figura 21	41

Diagrama de Flujo Modulo UART3. Figura 22	42
Diagrama de Flujo Función Calibrar. Figura 23	43
Diagrama de Flujo proceso de conversión de Buffers ADC. Figura 24.....	44
Diagrama Función Conversión_GPS. Figura 25	45
Diagrama Función Conversión_GPS_V. Figura 26.....	45
Diagrama de Flujo Función Llenado. Figura 27.....	46
Diagrama de Flujo Función Transferencia. Figura 28	47
Diagrama Función Sonar. Figura 29	48
Muestras trama de envió de los datos de cada uno de los canales. Figura 30	51
Tramas de Información del GPS. Figura 31	52
Diagrama de Flujo de IAD en el modo Online. Figura 32	55
Visualización ingreso de parámetros. Figura 33.....	57
Diagrama de Flujo de Configuración de la Frecuencia de Muestreo Figura 34	58
Diagrama de Flujo de Configuración de la Frecuencia de Corte. Figura 35	58
Diagrama de flujo de la Transmisión de datos Figura 36.....	61
Visualización de Parámetros del GPS Figura 37	62
Imagen de la Interfaz Figura 38.....	64
Distribución de gráficas. Figura 39.....	64
Diagrama de flujo de IAD en modo Offline Figura 40.....	65
Diagrama de Flujo de Adquisición en Python. Figura 41	66
Señal seno digitalizada 0.1 Hz Figura 42.....	77
Señal seno digitalizada 0.25 Hz Figura 43	78
Señal seno digitalizada 0.5 Hz Figura 44	79
Señal seno digitalizada 0.1 Hz Offline Figura 45	80
Señal seno digitalizada 1 Hz Offline. Figura 46.....	81
Segmento señal seno digitalizada 0.1 Hz Offline. Figura 47.....	81
Señal seno digitalizada 5 Hz Offline Figura 48.....	82
Segmento Señal seno digitalizada 5 Hz Offline. Figura 49.....	82
Señal seno digitalizada a 10Hz Offline Figura 50	83
Segmento señal seno digitalizada 10 Hz Offline Figura 51	84
Piso de ruido en tiempo. Figura 52	84
Piso de ruido en frecuencia. Figura 53.....	85
Señal seno 2Hz. Figura 54.....	85
FFT Señal seno a 2Hz Figura 55	86
Resultados análogos en prueba estable. Figura 56.....	87
Resultados digitales en prueba estable. Figura 57	88
Resultado N° 1 Análogo en movimiento. Figura 58.....	89
Resultado N° 1 Digital en movimiento. Figura 59	89
Resultado N° 2 Análogo en movimiento. Figura 60.....	91
Resultado N° 2 Digital en movimiento Figura 61	91
Resultado N° 2 Análogo en movimiento Figura 62.....	92
Resultado N° 3 Digital en movimiento Figura 63	93

INDICE DE TABLAS

Tabla de relación Frecuencia de corte y Frecuencia de Muestreo. Tabla 1.....	23
Características sensores Tarjeta Sparkfun. Tabla 2	24
Tramas del GPS Tabla 3	26
Tramas del GPS Tabla 4	26
Configuración Timers 1, 3, 5. Tabla 5	36
Configuración módulos UART Tabla 6.....	38
Forma del paquete de cada canal. Tabla 7.....	51
Tamaño de las pistas Tabla 8.....	70

INDICE DE IMAGENES

Fotografías del Circuito Impreso Implementado. Imagen 1	72
Respuesta en Frecuencia Imagen 2	72
Respuesta Plana Imagen 3.....	73
Señal Acoplador Imagen 4	73
Señal 3Hz Imagen 5 Señal 7Hz Imagen 6.....	74
Señal 10Hz Imagen 7 Señal 15Hz Imagen 8.....	74
Señal 20Hz Imagen 9 Señal 30Hz Imagen 10	74
Señal 50Hz Imagen 11 Señal 100Hz Imagen 12.....	75
Señal 150Hz Imagen 13 Señal 200Hz Imagen 14.....	75
Señal 250Hz Imagen 15 Señal 300Hz Imagen 16.....	75
Señal 350Hz Imagen 17 Señal 400Hz Imagen 18.....	76
Señal Entrada Filtros Antialiasing Imagen 19	76

ANEXOS

A. ESPECIFICACIONES DE COMPONENTES UTILIZADOS

A.1 TLC04ID

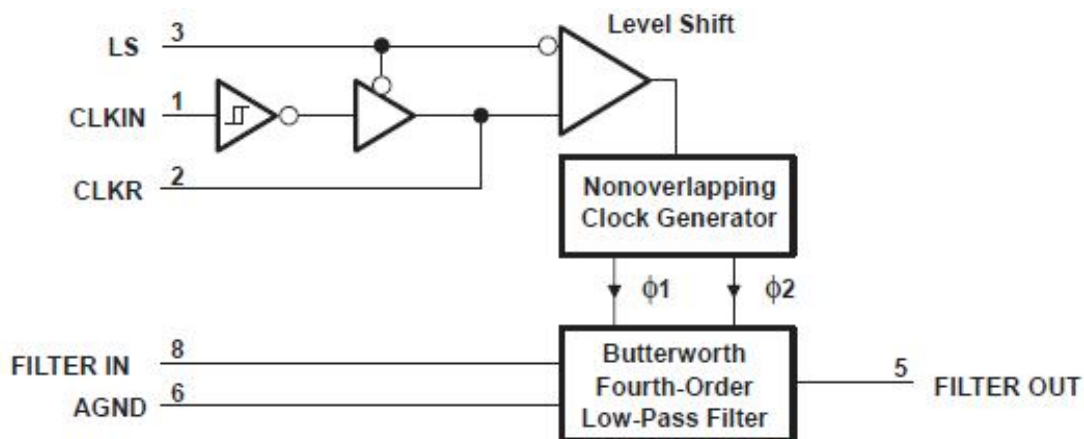
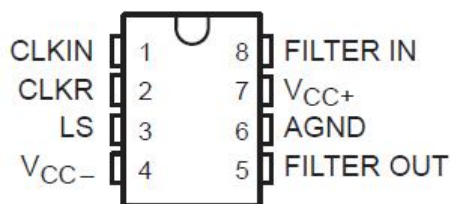


Diagrama funcional del TLC04ID Figura [76].

- Empaque SOIC 8.
- Cociente de la frecuencia de reloj y la frecuencia de corte: 50.
- Frecuencia de corte del filtro sintonizable con error menor a $\pm 0.8\%$.
- Frecuencias de corte:
 - Mínima: 0.1 Hz @ $V_{cc} \pm = \pm 2.5$
 - Máxima: 30 kHz @ $V_{cc} \pm = \pm 2.5$
- Rango de operación.
 - Mínimo: 5 VDC.
 - Máximo: 12 VDC
- Rango de temperatura:
 - Mínima: -40°C
 - Máxima: 85°C
- Entradas de reloj:
 - Tecnología TTL.
 - Tecnología C-MOS
 - Auto reloj
- Baja sensibilidad de las fuentes de voltaje.
- Voltaje offset de salida: 25 mV típico @ $V_{cc} \pm = \pm 2.5$, ≤ 250 .
- Corriente en la fuente de voltaje:
 - Típico: 1.2 mA @ $F_{clock} = 250$
 - Máximo: 2.25 mA @ $F_{clock} = 250$
- Frecuencia de reloj:

- Mínima: 5 Hz @ $V_{cc} \pm = \pm 2.5$
- Máxima: 1.5 MHz @ $V_{cc} \pm = \pm 2.5$

Descripción de la configuración de pines



TLC 041D Figura [77]

- **AGND:** Tierra análoga. Es la entrada no inversora a los amplificadores operacionales de el filtro pasa bajos Butterworth de cuarto orden.
- **CLKIN:** Entrada de reloj. En este pin se puede conectar una entrada de reloj externa compatible con tecnología CMOS o se puede realizar una conexión para generar su propio reloj de funcionamiento. Para cualquier de las dos opciones Ls debe estar conectado a Vcc-
- **CLKR:** Es la entrada de reloj compatible con tecnología TTL. Para un reloj TTL, Ls se debe conectar al valor medio de la fuente y CLKIN puede dejarse abierto, aunque se recomienda que sea conectado a Vcc+ o Vcc-.
- **FILTER IN:** Entrada del filtro.
- **FILTER OUT:** Salida del filtro pasa bajos Butterworth de cuarto orden.
- **LS:** Nivel de cambio. Para relojes compatibles con tecnología C-MOS o reloj autogenerado Ls se debe conectar a Vcc- y para relojes compatibles con tecnologías TTL, Ls se debe conectar al valor medio de la fuente.
- **Vcc+:** Terminal de fuente de voltaje positivo.
- **Vcc-:** Terminal de fuente de voltaje negativo.

A.2 OPA 4141

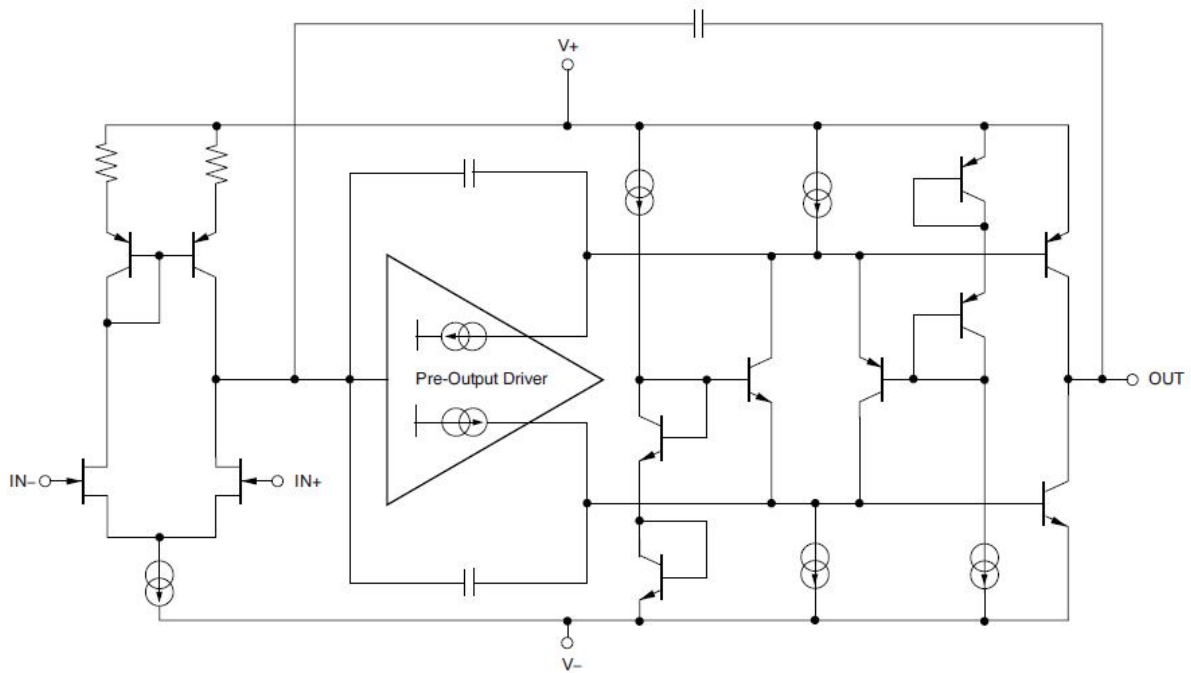
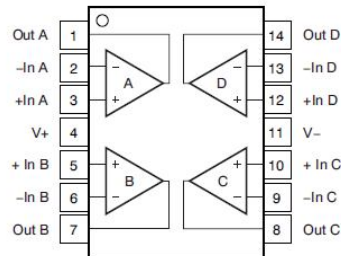


Diagrama de cada OPA Figura [78].

- Empaque SOIC 14.
- Baja consumo de corriente en la fuente 2.3 mA máx
- Bajo *Drift*: 10uV/°C
- Poca corriente de polarización: 20 pA max
- Muy bajo ruido 1/f: 250 nVpp
- Bajo ruido $6.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Ancho de banda: 10 MHz
- Slew rate: 20 V/us
- Salida *rail to rail*
- Rango de operación con fuente sencilla:
 - Mínima: 4.5 V.
 - Máxima: 36 V.
- Rango de operación con fuente dual:
 - Mínima: ± 2.25
 - *á* : ± 18
- Rango de temperatura
 - Mínima: -40 °C
 - Máxima: 125°C
- Bajo nivel de ruido en voltaje
 - $12 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 10 Hz
 - $6.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz

- Bajo ruido en corriente
 - $0.8 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz

Descripción de la configuración de pines



OPA 4141 Figura [79]

OUT A: Pin de salida del amplificador operacional A.

- IN A: Pin de entrada negativo al amplificador operacional A.

+ IN A: Pin de entrada positivo al amplificador operacional A.

V+: Terminal de fuente de voltaje positivo.

+IN B: Pin de entrada positivo al amplificador operacional B.

-IN B: Pin de entrada negativo al amplificador operacional B.

OUT B: Pin de salida del amplificador operacional B.

OUT C: Pin de salida del amplificador operacional C.

-IN C: Pin de entrada negativo al amplificador operacional C.

+IN C: Pin de entrada positivo al amplificador operacional C.

V-: Terminal de fuente de voltaje negativo.

+IN D: Pin de entrada positivo al amplificador operacional D.

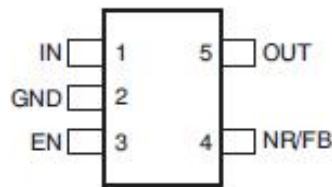
-IN D: Pin de entrada negativo al amplificador operacional D.

OUT D: Pin de salida del amplificador operacional D.

- Alto:
 - Mínimo: 1.25 V @ $5.5V < V_{in} < 6.5V$
 - Máximo: 6.5 V @ $5.5V < V_{in} < 6.5V$
- MAXIMA CORRIENTE ALIMENTACIÓN?

Descripción de la configuración de pines

- **IN:** Entrada al dispositivo
- **GND:** Tierra.
- **EN:** Este pin se utiliza para habilitar o deshabilitar el regulador. Si este pin está en alto el regulador funcionará normalmente, de lo contrario estará en modo *Standby* reduciendo así la corriente de operación. Si el dispositivo va a estar funcionando continuamente, este pin puede ir conectado directamente al pin IN del dispositivo.
- **NR:** Un condensador conectado a éste terminal pasa por alto el ruido generado por la referencia interna (bandgap reference), disminuyendo el ruido en la salida.
- **OUT:** Este pin es la salida de voltaje regulada, es necesario un condensador pequeño desde este pin a tierra para asegurar la estabilidad del regulador, un condensador de 1 μf es adecuado.



TPS 71733 Figura [81]

A.4 Regulador TPSA8001

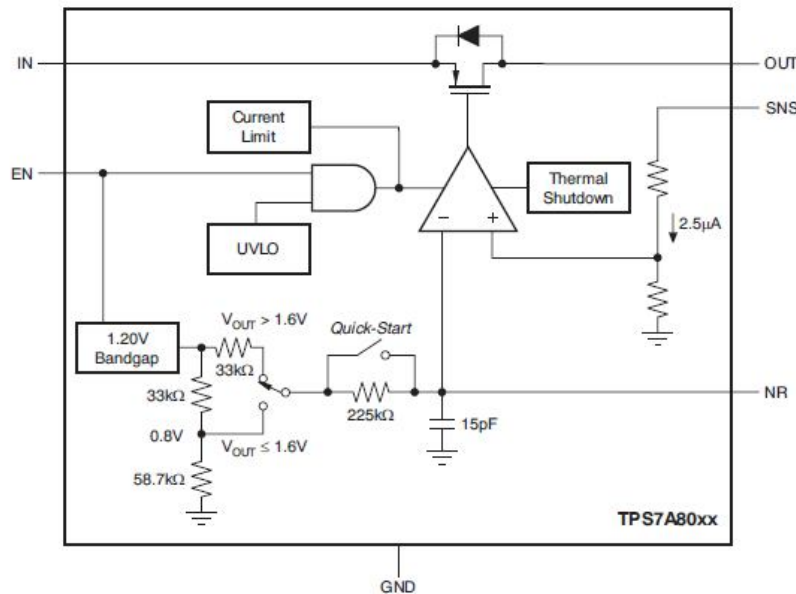
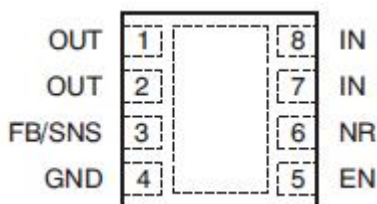


Diagrama funcional del TPS 7A8001 Figura [82]

- Empaque SON
- Rango de voltaje de entrada
 - Mínimo: 2.6 VDC
 - Máximo: 6.5 VDC
- Referencia interna:
 - Mínima: 0.790 V
 - Típica: 0.8 V
 - Máxima: 0.810 V
- Rango de voltaje de salida:
 - Mínimo: 0.8 VDC.
 - Máximo: 6.0 VDC
 -
- Precisión del voltaje de salida:
 - Mínima: -3.0 % @ $V_{OUT} + 0.5V \leq V_{IN} \leq 6.5V, V_{IN} \geq 2.2V, 100mA \leq I_{OUT} \leq 1A$
 - Típica: ± 0.3 % @ $V_{OUT} + 0.5V \leq V_{IN} \leq 6.5V, V_{IN} \geq 2.2V, 100mA \leq I_{OUT} \leq 1A$
 - Máxima: +3.0 % @ $V_{OUT} + 0.5V \leq V_{IN} \leq 6.5V, V_{IN} \geq 2.2V, 100mA \leq I_{OUT} \leq 1A$
- Bajo ruido: 78 μ V típicamente (desde 100 Hz hasta 100 kHz)
- Alto PSRR
 - 63 dB @ 1 kHz
 - 57 dB @ 100 kHz
 - 38 dB @ 1 MHz
- *Voltaje de Drop-out*
 - Típico: 170 mV @ 1 A
 - Máximo: 500 mV @ 1 A
- Protección de sobre corriente y sobre temperatura.
- Ruido en el voltaje de salida
 - 15.6 * @ BW = 100Hz to 100kHz, $V_{IN} = 4.3V, V_{OUT} = 3.3V, I_{OUT} = 100Ma,$ = 0.001 μ
 - 15.6 * @ BW = 100Hz to 100kHz, $V_{IN} = 4.3V, V_{OUT} = 3.3V, I_{OUT} = 100Ma,$ = 0.01 μ
 - 15.1 * @ BW = 100Hz to 100kHz, $V_{IN} = 4.3V, V_{OUT} = 3.3V, I_{OUT} = 100Ma,$ = 0.1 μ
- Corriente de salida
 - Mínima: 1100 mA @ $V_{in} > 3.3V$
 - Típica: 1400 mA @ $V_{in} > 3.3V$
 - Máxima: 2000 mA @ $V_{in} > 3.3V$
- Corriente del pin de habilitación:
 - Mínima: 0.02 μ A @ =6.5 V, =6.5 V.
 - Máxima: 1 μ A @ =6.5 V, =6.5 V.
- Nivel de voltaje en el pin de habilitación:
 - Bajo:
 - Mínimo: 0 V @ = 1 K Ω .
 - Máximo: 0.4 V @ @ = 1 K Ω . .
 - Alto:
 - Mínimo: 1.35 V @ $3.6V < V_{in} < 6.5V$

Descripción de la configuración de pines

- **IN:** Voltaje de entrada no regulado.
- **GND:** Tierra.
- **EN:** Este pin se utiliza para habilitar o deshabilitar el regulador. Si este pin está en alto el regulador funcionará normalmente, de lo contrario estará en modo *Apagado*. Este pin no se debe dejar al aire, en caso de no necesitarlo se puede dejar conectado directamente al pin IN.
- **NR:** Se debe conectar un condensador entre este pin y tierra para reducir notablemente el ruido en la salida.
- **SNS:** Este pin es la entrada al lazo de control del amplificador de error y se usa para seleccionar el voltaje de salida del regulador. Cuando se trata de una referencia como estas que es fija, este pin va cortocircuitado con el pin OUT.
- **OUT:** Salida del regulador. Se requiere un condensador de al menos $4.7 \mu\text{F}$ para la estabilidad.



TPS 7A8001 Figura [83]

A.5 Regulador LM 7805

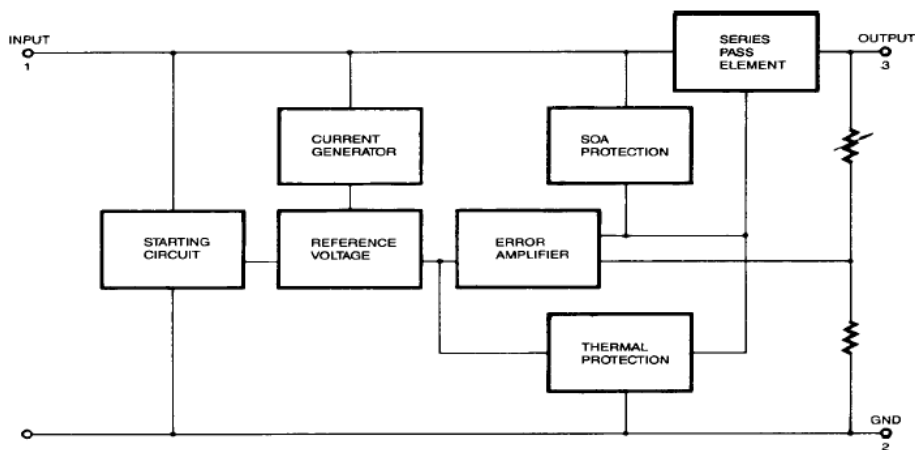


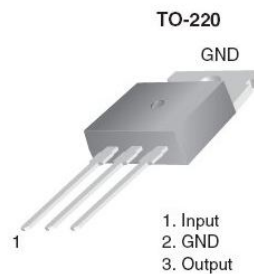
Figura [82] Diagrama funcional del LM 7805

- Empaque TO-220.
- Voltaje de *Dropout*.
 - Típico: 2 VDC
- Rango de voltaje de entrada
 - Mínimo: 5 + VDC

- Máximo: 35 VDC
- Rango de voltaje de salida:
 - Mínimo: 4.8 VDC.
 - Típico: 5 VDC.
 - Máximo: 5.2 VDC
- Ruido en el voltaje de salida:
 - Típico: $42 \mu V / \sqrt{Hz}$ @ $f = 10 \text{ Hz a } 100 \text{ kHz}$, $T = +25^\circ$
- Rechazo a ripple:
 - Mínimo: 62 db @ $f = 120 \text{ Hz}$, $V_{in} = 8 \text{ V}$ $V_{out} = 1.8 \text{ V}$
 - Típico: 73 db @ $f = 120 \text{ Hz}$, $V_{in} = 8 \text{ V}$ $V_{out} = 1.8 \text{ V}$
- Pico de corriente:
 - Típico: 2.2 A @ $T = +25^\circ$
- Corriente de corto circuito:
 - Típico: 230 mA @ $T = 35^\circ$, $V_{in} = 5 \text{ V}$, $V_{out} = +25^\circ$
- Resistencia de Salida:
 - Típica: $15 \text{ m}\Omega$ @ $f = 1 \text{ KHz}$
- - Típico: 5
 - Máximo: 8
- Protección sobrecarga térmica
- Protección de corto circuito.

Descripción de la configuración de pines

- **INPUT:** Pin de voltaje de entrada no regulado.
- **GND:** Tierra.
- **OUTPUT:** Pin de voltaje de salida regulado a 5VDC.



LM 7805 Figura [84]

A.6 Referencia REF 3040

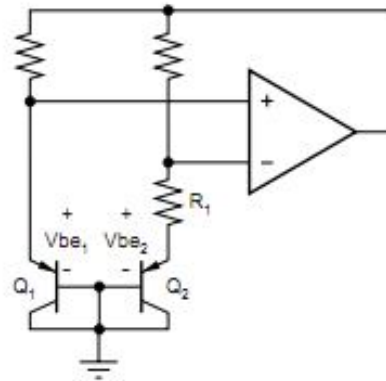
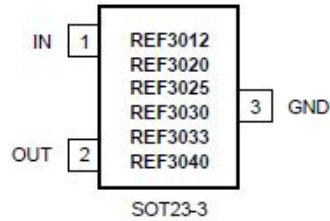


Diagrama funcional de REF 3040 Figura [85]

- Empaque SOT 23-3.
- Rango de voltaje de entrada
 - Mínimo: +
 - Máximo: 5.5 VDC
- Rango de voltaje de salida:
 - Mínimo: 4.088 VDC.
 - Típico: 4.096 VDC
 - Máximo: 4.104 VDC
- Ruido en el voltaje de salida:
 - Típica: 45μ - @ $f = 0.1 \text{ Hz a } 10 \text{ Hz}$
 - Típica: 128μ @ $f = 10 \text{ Hz a } 10 \text{ kHz}$
- *Voltaje de Drop-out*
 - Típico: 1 mV
 - Máximo: 50 mV
- - Típico: 42μ
 - Máximo: 50μ
- Corriente de salida
 - Típica: 25 mA
 -

Descripción de la configuración de pines

- **INPUT:** Pin de voltaje de entrada.
- **OUT:** Pin de voltaje de salida fijo.
- **GND:** Tierra.



REF 3040 Figura [86]

A.7 MAX 232

- Voltaje de alimentación
 - Mínimo: 4.5 VDC
 - Típico: 5 DVC
 - Máximo: 5.5 VDC
- Nivel alto de voltaje de entrada (T1IN,T2IN)
 - Mínimo: 2 VDC
- Nivel bajo de voltaje de entrada (T1IN,T2IN)
 - Máximo: 0.8 VDC
- Voltaje entrada del receptor (R1IN, R2IN)
 - Máximo: ± 30
- - Mínimo: 0° @ Operando al aire libre
 - Mínimo: 0° @ Operando al aire libre
 - Máximo: 70°
- Corriente de alimentación
 - Típico: 8 mA @ $V_{cc} = 5.5$ VDC, todas las salidas abiertas, $\theta = 25^\circ$
 - Máximo: 10 mA @ $V_{cc} = 5.5$ VDC, todas las salidas abiertas, $\theta = 25^\circ$
- SECCION DEL CONTROLADOR
 - Nivel alto de voltaje de salida (T1OUT,T2OUT)
 - Mínimo: 5 VDC @ $R_L = 3 \Omega$ a GND
 - Típico: 7 VDC @ $R_L = 3 \Omega$ a GND
 - Nivel bajo de voltaje de salida (T1OUT,T2OUT)
 - Típico: -7 VDC @ $R_L = 3 \Omega$ a GND
 - Máximo: -5 VDC @ $R_L = 3 \Omega$ a GND
 - Resistencia de salida (T1OUT, T2OUT)
 - Mínima: 300Ω @ $V_o = 0$, $V_i = \pm 2$
 - Corriente de salida en corto circuito (T1OUT, T2OUT)
 - Típico: ± 10 @ $V_{cc} = 5.5$ VDC, $V_o = 0$ VDC.
 - Corriente entrada en corto circuito (T1IN, T2IN)
 - 200 @ $V_i = 0$ VDC.

- SECCION DE RECEPCIÓN
 - Nivel alto de voltaje de salida (R1OUT,R2OUT)
 - Mínimo: 3.5 VDC @ $V_{CC} = -1$
 - Nivel bajo de voltaje de salida (R1OUT,R2OUT)
 - Máximo: 0.4 VDC @ $V_{CC} = 3.2$
 - Voltaje histéresis de entrada (R1IN, R2IN)
 - Mínimo: 0.2 @ $V_{CC} = 5$ VDC
 - Típico: 0.5 @ $V_{CC} = 5$ VDC
 - Máximo: 1 @ $V_{CC} = 5$ VDC
 - Resistencia de entrada(R1IN,R2IN)
 - Mínimo: 3 Ω @ $V_{CC} = 5$ VDC, $T = 25^\circ$
 - Típico: 5 Ω @ $V_{CC} = 5$ VDC, $T = 25^\circ$
 - Máximo: 7 Ω @ $V_{CC} = 5$ VDC, $T = 25^\circ$

A.8 Acelerómetro MMA7260Q

Especificaciones Generales

- Sensitividad 800mV/g
- Respuesta en Frecuencia
 - Coordenadas XY f_{-3dB} 350Hz.
 - Coordenada Z f_{-3dB} 150Hz.
- Voltaje de Offset
 - Mínimo 1.485V - Máximo 1.815V - Típico 1.65V
- Amplitud de Salida 3.3V
- Temperatura de Operación -20 a +85°C

Especificaciones Eléctricas

- Voltaje de Alimentación
 - Mínimo 2.2V - Máximo 3.6V - Típico 3.3V
- Corriente e Alimentación
 - Típica 500 - Máximo 800
- Ruido Eléctrico
 - 350 $\mu V/\sqrt{Hz}$ @ (0.1Hz – 1kHz)

A.9 Especificaciones del Giroscopio IDG-300

Al igual que en el caso del acelerómetro se toman especificaciones similares; estas especificaciones son:

- Sensitividad: 2mV/°/s
- Respuesta en Frecuencia
 - Presenta una frecuencia de corte en alto de 140 HZ
- Frecuencias mecánicas
 - Frecuencia de resonancia del Giroscopio en el eje x: 12 kHz
 - Frecuencia de resonancia del Giroscopio en el eje x: 15 kHz
- Excursión de voltaje a la salida: Vdd - 0.05 V
- Impedancia de Salida: 100 Ω
- Voltaje de Alimentación
 - Mínimo 3V - Máximo 3.3V
- Temperatura de Operación: 0 a 70°C
- Tasa de densidad de ruido 0.014 °/s/√Hz

A.10 Sensor magnético HMC1051

- Sensitividad: 1 mV/V/gauss
- Resolución: 120 μgauss
- Temperatura de Operación: -55 a 150°C
- Humedad : 80%
- Ancho de Banda: 5 MHz

A.11 Ultrasonido LV- MaxSonar –EZ1

- Características Eléctricas
 - Voltaje de Alimentación: de 2,5 a 5,5 V
 - Corriente de Alimentación: 2mA.
- Comunicación
 - Salida Análoga: 9.8mV/in. @ 5.5V 6.4mV/in @ 3.3V
 - Salidas Digitales: Asíncrona con formato RS 232, a 9600 baudios, 8 bits de datos y sin paridad.
 - Salida PWM: Representación por PWM, es necesario realizar una escalización por 147us.
- Características de Funcionamiento
 - Frecuencia de Trabajo: 42KHz.
- Frecuencia de lectura: 20Hz.

A.12 GPS Trimble

- Ultra-baja Potencia: menor 94mW

- Alta sensibilidad:
 1. 160dBm Sensitividad de seguimiento.
 2. 148 dBM Sensitividad de Adquisición.
- Soporta diseño de antenas activas o pasivas.
- 12 Canales de operación
- Soporta los protocolos NMEA 0183, TSIP y TAIP
- Soporte SBAS el cual es un sistema de corrección de las Señales que los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (SGSS) transmiten al receptor. Este mejora el posicionamiento horizontal y vertical y da información sobre la calidad de las señales.

Diseño ultra delgado y tamaño reducido.

A.13 Microcontrolador dsPIC30F6010A



Figura [87] Microcontrolador dsPIC30F6010A

El microcontrolador dsPIC30F6010A, es un microcontrolador de última tecnología fabricado por la empresa Microchip, el cual cuenta con las siguientes características. [12]

- Características Eléctricas
 - Voltajes de Alimentación: 4.5-5.5V
 - Voltaje en cualquier pin con respecto a Vss: -0.3V hasta Vdd+0.3V
 - Máxima Corriente de salida sobre el pin Vss: 300mA.
 - Máxima Corriente de Entrada sobre el pin Vdd: 250mA.
 - Máxima corriente de Salida por cada pin I/O: 25mA.
 - Máxima corriente de Entrada por cada pin I/O: 25mA.
 - Máxima corriente suministrada por todos los puertos I/O: 200mA.
 - Máxima corriente recibida por todos los puertos I/O: 200mA.
- Características de Desempeño
 - 30 MIPS de operación.
 - Reloj interno de 7.35MHz con posibilidad de utilizar PLL de 4x, 8x, 16x.
 - Opción de oscilador externo de 4 -10MHz con multiplicador PLL 4x, 8x, 16x.

- Características de Periféricos
 - Módulos de Timer con pre escaler programables.
 - 2 Módulos de comunicación serial UART con buffers tipo FIFO.
 - 8 canales de salida de PWM, con 4 generadores de ciclo útil.
- Características Análogas
 - Conversor Análogo digital de 10 bits.
 - 16 canales de entrada.
- Tecnología CMOS.
 - Bajo consumo de potencia, alta velocidad con tecnología Flash.

B. CODIGO DE MATLAB

Se encuentra en CD Adjunto debido a su longitud.

C. CODIGO EN C DEL MICROCONTROLADOR

Se encuentra en CD Adjunto debido a su longitud.

D. CODIGO EN PYTHON

Se encuentra en CD adjunto.

E. ESQUEMATICO Y CIRCUITO IMPRESO

Se encuentra en CD Adjunto.

F. COSTOS DEL PROYECTO

	Elemento	Cantidad	Costo Unitario (COP)	COSTO Total (COP)
	OPA 4141AID	4	11172	44688
	TLC04ID	14	7448	104272
	TPS7A8001	1	2527	2527
	REF3040	1	4655	4655
	TPS71733	1	3287	3287
	MAX232	2	2166	4332
	DSPIC30F1410A	1	6650	6650
	Conector GPS	1	36005	36005
	Conector pila	1	3705	3705
	IMU *	1	665000	665000
	GPS *	1	95000	95000
	Antena GPS *	1	36005	36005
	LM7805	1	1500	1500
	Cristal 29.4912 MHz	1	2088	2088
	Pila 3.3V	1	3000	3000
	Jumpers	14	50	700
	Regleta 40x1	1	225	225
	Regleta 30x1	1	2000	2000
	Conector DB9 Hembra	1	850	850
Resistencias	12.1 kΩ	15	180	2700
	9.53 KΩ	14	180	2520
	10 kΩ	30	180	5400
	2 MΩ	1	180	180
	390 kΩ	1	180	180
Condensadores	10 nf cerámico	17	500	8500
	2.2 uf tantalio	17	250	4250
	22 pf cerámico	2	200	400
	1 uf ceramic	3	500	1500
	1 uf electrolítico	8	300	2400
	4.7 uf ceramico	1	500	500
	0.47 uf	1	600	600
	Impreso	1	60000	60000
	TOTAL			1105619

* Dispositivos de la Universidad Militar Nueva Granada