



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS MECATRÓNICA

**“DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
GIROSCOPIOS DIGITALES USANDO TECNOLOGÍA FPGA PARA
MONITOREO DE LA ORIENTACIÓN DE ROBOTS”**

TESIS

**QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS PRESENTA:**

ING. URIEL LOMELÍ HERNÁNDEZ

ASESOR:

DR. RENÉ DE JESÚS ROMERO TRONCOSO

San Juan del Rio, Querétaro, Agosto 2012



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias en Mecatrónica

NOMBRE DE LA TESIS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Mecatrónica

Presenta:

Ing Uriel Lomeli Hernández

Dirigido por:

Dr René de Jesús Romero Troncoso

SINODALES


Dr. René de Jesús Romero Troncoso
Presidente

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Secretario

M.I. Carlos Rodríguez Doñate
Vocal

Dr. Arturo García Pérez
Suplente

Dr. Luis Morales Velázquez
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Firma


Firma

Carlos Rodríguez D.
Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro
Agosto 2012
México

Resumen

Los giroscopios digitales tipo MEMS (Microelectromechanical System) son sensores electrónicos de movimiento angular los cuales se utilizan en: sistemas de orientación, video juegos, telefonía móvil, medición de velocidad angular, entre otras aplicaciones. El objetivo de este trabajo es la descripción en VHDL e implementación en FPGA de una unidad de pre-procesamiento digital capaz de disminuir el error en las mediciones realizadas por un giroscopio digital de tres ejes tipo MEMS aumentando la exactitud de éstas para posteriormente obtener la orientación del sensor que al ser montado en un robot se obtendrá la orientación de éste. Se emplearon métodos estadísticos para calcular y eliminar el nivel de offset en cada una de los ejes del giroscopio, así como las técnicas de Diezmado, filtro Butterwoth y filtro Kalman para eliminar el ruido eléctrico en las señales., Para la validación del sistema el giroscopio se montó en la flecha de un motor de CD con encoder con el que se realizaron pruebas de velocidad y se compararon los resultados donde se obtuvo como resultado una considerable reducción en la variación de alta frecuencia (ruido) en las medidas del giroscopio así como un nivel de referencia de cero en la señal gracias a la eliminación del offset. Con esta unidad de procesamiento se obtiene un acondicionamiento de la señal listo para ser utilizadas por algún sistema digital que requiera la aplicación del giroscopio, en el caso de este trabajo las señales son integradas por in sistema digital para obtener la orientación de un robot manipulador en los ejes Roll, Pitch y Yaw en un marco de referencia.

(Palabras clave: giroscopio digital de tres ejes, MEMS, procesamiento de señales, FPGA, orientación de robots).

Abstract

MEMS Gyroscopes (Microelectromechanical System) are electronic sensors of angular movement which are used in: guidance systems, video games, mobile phones, measuring angular velocity, among other applications. The aim of this paper is the description in VHDL and FPGA implementation of a unit of digital preprocessing can reduce the error in measurements made by a digital three-axis gyroscope MEMS type increasing the accuracy of these to subsequently obtain the orientation the sensor being mounted on a robot orientation is obtained from it. Statistical methods were used to calculate and eliminate the offset level in each of the axes of the gyroscope and Decimation techniques, Butterworth filter and Kalman filter to eliminate electrical noise in the signals., For validation of the gyroscope system was mounted on the shaft of a DC motor with encoder with speed tests were performed and compared the results which yielded results in a considerable reduction in the high frequency variation (noise) in the measurements of the gyroscope and a zero reference level in the signal due to the elimination of the offset. With this processing unit is obtained a signal conditioning ready for use by a digital system that requires the application of the gyroscope, in the case of this work are composed of signals in a digital system for the orientation of a robot manipulator axes Roll, Pitch and Yaw in a frame of reference.

(Keywords: digital three-axis gyroscope, MEMS, signal processing, FPGA, robot orientation).

A mis padres, familia y amigos, que siempre estuvieron para brindarme su apoyo

Agradecimientos

A mi familia que siempre me ha apoyado para salir adelante personal y profesionalmente y ser una persona productiva para la sociedad, por todo su cariño y fe en mí y su apoyo incondicional.

A mi asesor el Dr. René de Jesús Romero Troncoso por confiar en mí y darme la oportunidad de participar en este proyecto, por compartir consejos, conocimiento y experiencia para formarme personal y profesionalmente.

A mis profesores Dr. Roque Alfredo Osornio Rios, Dr. Luis Morales Velázquez, M.I. Carlos Rodríguez Doñate, Dr. Arturo García Pérez por su apoyo y paciencia que fueron clave para mi desarrollo y culminación de mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme dado la oportunidad de desarrollar mi proyecto de investigación, y a la Universidad Autónoma de Querétaro a la cual me siento muy orgulloso de pertenecer.

A todos GRACIAS.

Índice general

Capítulo I	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos	6
1.5. Planteamiento general	7
Capítulo II	9
2.1. Estado del arte	9
2.2. Giróscopo Mecánico	9
2.3. Giróscopo Electrónico	9
2.3.1. Fuerza Coriolis	10
2.4. Giróscopos MEMS	11
2.5. Principales Características de los Giróscopos Electrónicos	15
2.5.1 Nivel de Cero	16
2.5.2. Sensibilidad	16

2.5.3. Densidad de Ruido	16
2.1. Cinemática de un robot manipulador	17
2.3. Filtrado	19
2.3.1. Filtros FIR e IIR	19
2.3.2. Filtro Kalman	20
2.4. Procesamiento en FPGA	22
Capítulo III	23
3.1 Metodología	23
3.2. Instrumentación del robot	24
3.3. Sistema de adquisición de datos	25
3.3.1. Protocolo de comunicación SPI	27
3.3.2. Interfaz de comunicación	28
3.3.3. Adquisición del sensor	28
3.3.4. Configuración del sensor	29
3.4. Diseño del sistema de adquisición	29
3.4.1. Diseño en hardware del protocolo SPI	29
3.4.2. Diseño en hardware del sistema de adquisición y configuración del sensor	31

3.4.3. Sistema de adquisición de datos	33
3.5. Acondicionamiento de las señales del giroscopio	33
3.5.1. Calibración del giroscopio	33
3.5.2. Filtrado de las señales del giroscopio	36
3.5.3. Sistema de acondicionamiento de señales	38
Capítulo IV	40
4.1. Resultados	40
4.1.2. Pruebas de velocidad angular	40
4.1.3 Pruebas de orientación en el robot PUMA	42
Capitulo V	49
Conclusiones	49
Bibliografía	50

Índice de figuras

1.1: Diagrama general del sistema	8
2.1: Efecto de las fuerzas de Coriolis	12
2.2: velocidad angular de los ejes Pitch, Roll y Yaw	13
2.3: Efecto de Coriolis	13
2.4: masas utilizadas para general el efecto Coriolis	14
2.5: Aceleración de las masas en la misma dirección	15
3.1: Metodología general	24
3.2: Ubicación del sensor	25
3.3: Diseño del sistema de adquisición de datos	26
3.4: Diagrama de tiempo del protocolo SPI	27
3.5: Estructura digital del protocolo SPI	31
3.6: Sistema de adquisición y configuración del sensor	32
3.7: Módulo de eliminación del offset	34
3.8: Módulo para la eliminación de offset para tres ejes independientes	35
3.9: Sistema de calibración	36
3.10: Unidad de filtrado	37
3.11: Banco de filtros	38

3.12: Sistema de acondicionamiento de señales	39
4.1: Pruebas de velocidad angular	41
4.2: Velocidad del motor (rojo giroscopio, azul encoder)	42
4.3: Velocidades obtenidas en los ejes Roll, Pitch y Yaw	43
4.4: filtro Butterworth	44
4.5: Diezmado	45
4.6: Kalman	46
4.7: Orientación del robot utilizando un filtro Butterwork	47
4.8: Orientación del robot utilizando filtro Kalman	48

Capítulo I

1.1. Introducción

Un robot es un sistema mecánico diseñado para emular diversas tareas humanas, controlado por un sistema electrónico donde los sensores son la parte fundamental de todo el sistema ya que son los encargados de brindar la información necesaria para llevar a cabo las tareas requeridas. La principal aplicación de los robots es en la industria donde se utilizan para realizar tareas repetitivas o peligrosas para el hombre, el desempeño de estas tareas depende de la precisión de las mediciones realizadas por los sensores. Comúnmente los sensores más utilizados en los robots industriales son los encoders los cuales son dispositivos mecánicos montados a la flecha de cada servomotor del robot con el que se mide su desplazamiento angular mediante un sistema de cuentas, otro tipo de sensores utilizados son los acelerómetros y giroscopios los cuales miden la aceleración o velocidad del movimiento de los eslabones del robot y mediante un algoritmo se determinan los desplazamientos del mismo. Recientemente con el desarrollo de la tecnología MEMS se ha tenido un gran interés en los sensores como acelerómetros, giroscópicos, brújulas digitales, entre otros para aplicaciones en el campo de la robótica, esto se debe a las sus características de bajo costo, pequeño tamaño y bajo consumo de energía.

En este trabajo se desarrollo e implemento un sistema electrónico el cual adquiere la información de un giroscopio digital de tres ejes tipo MEMS procesándola por diversas técnicas y algoritmos por los cuales se obtiene la orientación del órgano terminal de un robot manipulador tipo PUMA. La función de este sistema es monitorear la orientación del órgano terminal del robot durante la trayectoria realizada para llevar a cabo una determinada tarea, con el fin de poder determinar el desempeño del robot.

1.2. Antecedentes

A principios del siglo XX con el crecimiento de la industria automotriz se desarrollaron nuevos procesos de producción en los cuales se asignaban secciones de la planta para ensamblar determinadas partes del auto para disminuir el tiempo final de construcción, estos procesos de producción requerían realizar tareas repetitivas y relativamente sencillas en cada sección con lo cual se hizo evidente que estas tareas podían ser realizadas por mecanismos automatizados, fue así como se introdujeron los primeros robots industriales en la primera mitad del siglo XX. Estos primeros robots eran controlados por interruptores de fin de carrera y levas con la capacidad de realizar tareas sencillas, con el crecimiento de la industria automotriz se comenzó una constante evolución en los robots para realizar tareas más complejas las cuales requerían de una mayor precisión lográndose esto con la implementación de sensores de movimiento y sistemas de control electrónicos, esta nueva generación de robots industriales permitió que fueran introducidos a otras industrias diferente a la automotriz convirtiéndose en partes indispensables de las líneas de producción. En la segunda mitad del siglo XX con los cambios tecnológicos en lapsos de tiempo cada vez más cortos fue necesario el desarrollo de nuevos conceptos en la robótica para adaptarlos a los nuevos mercados fue así como surgió la necesidad de desarrollar robots capaces de llevar a cabo múltiples tareas en las líneas de producción, fue así como en 1975 el ingeniero mecánico estadounidense Victor Scheinman de la Universidad Stanford, Carolina, desarrolló un manipulador polivalente realmente flexible conocido como Brazo Manipulador Universal Programable (PUMA, siglas en ingles) este robot tiene la capacidad de posicionar y orientar un objeto en cualquier punto dentro de su espacio de trabajo. El PUMA es la estructura robótica que

más es utilizada en la industria en los últimos años esto debido a su característica de ser programable pudiendo adaptarse a una infinidad de tareas en las líneas de producción.

Desde entonces los estándares de calidad han tenido una creciente exigencia en la precisión y exactitud en los productos que se fabrican en las industrias, con los robots esto se logra mediante sistemas de control más eficaces y sobre todo en las mediciones precisas de sus sensores de movimiento, debido a esto existe un gran interés en la investigación del desempeño de nuevos sensores y combinación de estos para mejorar el desempeño de los robots. Los sensores utilizados de manera tradicional son los encoders cuya resolución depende del número de bits presente en su disco, debido a la fiabilidad que han demostrado estos sensores existen un gran número de trabajos, uno de ellos propone mecanismos electromagnéticos para mejorar la precisión en la medición del movimiento angular (Kikuchi *et al.* 1997), otros por su parte proponen el incremento en la resolución de estos sensores como el trabajo de Kojima *et al.* (2004) que propone métodos de fabricación para encoders ópticos con una resolución de 30 bits muy superior a la resolución convencional de 8 a 12 bits. Estos trabajos cumplen el propósito de mejorar la medición de los movimientos del robot sin embargo un aumento en la resolución de este tipo de sensor implica un aumento en los costos de fabricación y son más susceptibles a daños generados por golpes o por desgaste mecánico afectando de manera indeseable la medición. Esto ha hecho que los investigadores busquen soluciones alternas utilizando otro tipo de sensores y proponiendo nuevas metodologías.

Con el avance de la tecnología MEMS (Microelectromechanical System) se ha logrado el desarrollo de sensores miniaturizados de bajo costo y bajo consumo de energía los cuales se han vuelto cada vez más competitivos respecto a sus contrapartes de macro escala, además proporcionan alternativas para solucionar problemas de una manera diferente a la tradicional. El

progreso de la tecnología MEMS ha hecho posible el desarrollo de nuevos dispositivos y aplicaciones donde el uso de los sensores de macro escala es inviable como por ejemplo en el caso de los sistemas de inyección de tinta o los arreglos de micro espejos para proyectores de video (Antonello *et al.* 2012). Históricamente los sensores de aceleración y presión fueron los primeros desarrollados y fabricados a gran escala utilizando la tecnología MEMS, siendo dominantes el mercado de silicio. Recientemente los giroscopios de micro escala han comenzado a ser producidos en masa los cuales han mostrado un creciente potencial para el desarrollo de sistemas y dispositivos novedosos. Desde la producción del primer giroscopio MEMS por Bosh GmbH para el control de la estabilidad en los vehículos en 1998, otros fabricantes de semiconductores comenzaron a producir y vender sus propios giroscopios atraídos por las oportunidades del mercado y la producción de enormes ingresos que se generarían en los próximos años. En los primeros trabajos realizados con giroscopios de micro escala se utilizaron en la industria automotriz como: sensores auxiliares para sistemas GPS en vehículos (Antonello *et al.* 2012)., sistemas avanzados para detectar y prevenir que un vehículo se vuelque o patine mientras es conducido y un sistema de amortiguamiento activo para mejorar el manejo y confort de los vehículos. Otra área que ha tenido gran crecimiento en el uso de giroscopios son los dispositivos móviles como los teléfonos celulares y cámaras digitales.

La aplicación de los giroscopios MEMS en los robots comenzó con trabajos de obtención de la orientación en robots móviles como el de Ojeda *et al.* (2000) en el que propone un método de calibración de sistemas de navegación por medio de un giroscopio y Houshangi *et al.* (2006) que propuso la utilización de giroscopios para determinar la posición y orientación de robots móviles, una vez introducidos los giroscopios MEMS se desarrollaron trabajos más complejos como medir la velocidad angular (Shi *et al.* 2010). Con las ventajas mostradas en los diversos trabajos de los sensores MEMS sobre sus contrapartes de macro escala se ha buscado sustituir los

sensores tradicionales en los robots, como el caso del encoder en el robot puma, para obtener un mejor desempeño de las diversas tareas que realizan los robots en la industria. En 2010 Rodríguez *et al.* Propuso un sensor inteligente basado en la fusión de acelerómetros de tres ejes con encoders en una plataforma FPGA para estimar los parámetros del movimiento dinámico, inclinación y vibración en un robot PUMA, este trabajo es el punto de partida de esta tesis ya que reporta las ventajas de usar sensores de tecnología MEMS para obtener la información requerida.

1.3. Justificación

Los robots como se ha mencionado anterior mente han pasado a ser parte indispensable en la industria para que esta logre ser competitiva en el mercado actual, los robots no solo realizan las tareas repetitivas y peligrosas para el hombre también lo hacen de manera más precisa, exacta y rápida, con la capacidad de trabajar jornadas completas sin necesidad de descanso. Las principales tareas que realizan son: soldar, pintar, ensamblar, cortar, colocar piezas, etc. Para lograr esto se requiere información de la posición y orientación del robot en todo momento para que el controlador realice las correcciones necesarias, fundamentalmente para lograr el mejor desempeño del robot se requiere de la fiabilidad de la información brindada por los sensores. Los sensores MEMS han demostrado un gran desempeño en la medición de las diferentes variables para los que son fabricados, en el caso específico del uso de estos sensores en un robot PUMA se puede mencionar las ventajas sobre los sensores de macro escala utilizados tradicionalmente (encoders), la primera de ellas es el espacio que ocupan montados en el robot mientras el MEMS se encuentra encapsulado en un chip electrónico que mide unos cuantos

milímetros cuadrados los encoders tienen una estructura cilíndrica con un radio y altura de varios centímetros de longitud, los encoders al ser sensores mecánicos sufren un mayor desgaste con el uso, los MEMS al ser un chip son sensores no invasivos en el robot esto quiere decir que no afectan los movimientos del robot y el costo es mucho menor. Estas ventajas son la razón que exista un gran interés por el desarrollo de sistemas de control para los robots manipuladores utilizando los sensores de micro escala, Sin embargo la única característica de los encoders que ha hecho que no sean sustituidos de forma radical es que están diseñados especialmente para medir el movimiento angular de la flecha de los servomotores que mueven al robot de tal manera que las variables físicas externas y el ruido eléctrico tienen un efecto casi nulo en sus mediciones mientras que los sensores MEMS están diseñados para medir variables físicas como aceleración, gravedad, velocidad angular, entre otras lo cual los hace susceptibles al ruido eléctrico y a ciertos fenómenos físicos por eso es importante el diseño de sistemas electrónicos que procesen las señales eliminando el ruido mediante filtrados y obteniendo la información de los movimientos del robot mediante algoritmos. El sistema desarrollado en este trabajo satisface las necesidades de una estructura digital capaz de adquirir información de un giroscopio en forma de señales para posteriormente procesarlas y obtener información de interés principalmente la orientación de un robot manipulador con suficiente precisión para propósitos de investigación.

1.4. Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar e implementar un sistema de instrumentación con un giroscopio digital usando tecnología FPGA para monitorear la orientación de robots.

Objetivos particulares

- Diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos en FPGA que permitirá obtener la información del giroscopio de tres ejes.
- Realizar la interfaz de comunicación del sistema de adquisición con la PC (lenguaje de programación C) para la transmisión de los datos.
- Analizar las señales del giroscopio usando MATLAB para obtener una señal más fiable aplicando técnicas de procesamiento digital de señales.
- Implementar las técnicas de procesamiento digital de señales en el FPGA para monitorear la orientación del robot en tiempo real.
- Instrumentar al robot PUMA con el sistema que se desarrollará colocando el giroscopio en el órgano terminal para determinar su orientación.

1.5. Planteamiento general

El desarrollo de este proyecto de investigación se divide en tres partes principales comprendidas por un giroscopio digital, una estructura digital en FPGA y un sistema de comunicación con la PC. El giroscopio digital es la parte primaria del sistema con el cual se obtiene la velocidad angular de sus propios movimientos, la estructura digital en FPGA es la parte más compleja de todo el sistema que a su vez está conformada por sistemas más pequeños, la

estructura digital se encarga de adquirir y guardar en memoria la información entregada por el giroscopio durante el tiempo deseado para que después sea filtrada para eliminar el ruido eléctrico y procesada para obtener a información de interés posteriormente esta información es enviada a la PC mediante una interfaz de comunicación USB, la tercer parte compuesta por la PC es solo una interfaz que nos permite configurar los parámetros de adquisición del sensor y posteriormente observar los resultados.

El diagrama de la Figura 1.1 muestra de manera general como está compuesto el sistema desarrollado en este trabajo en ella se observa la sección del sistema digital una interfaz de comunicación SPI la cual permite comunicar al giroscopio con el resto del sistema, un sistema de adquisición encargado de guardar y organizar en memoria los datos obtenidos del sensor, un bloque compuesto por un banco de filtros y un algoritmo para obtener la orientación en base a la velocidad angular y finalmente una interfaz USB que permite la comunicación de una PC con el resto del sistema.

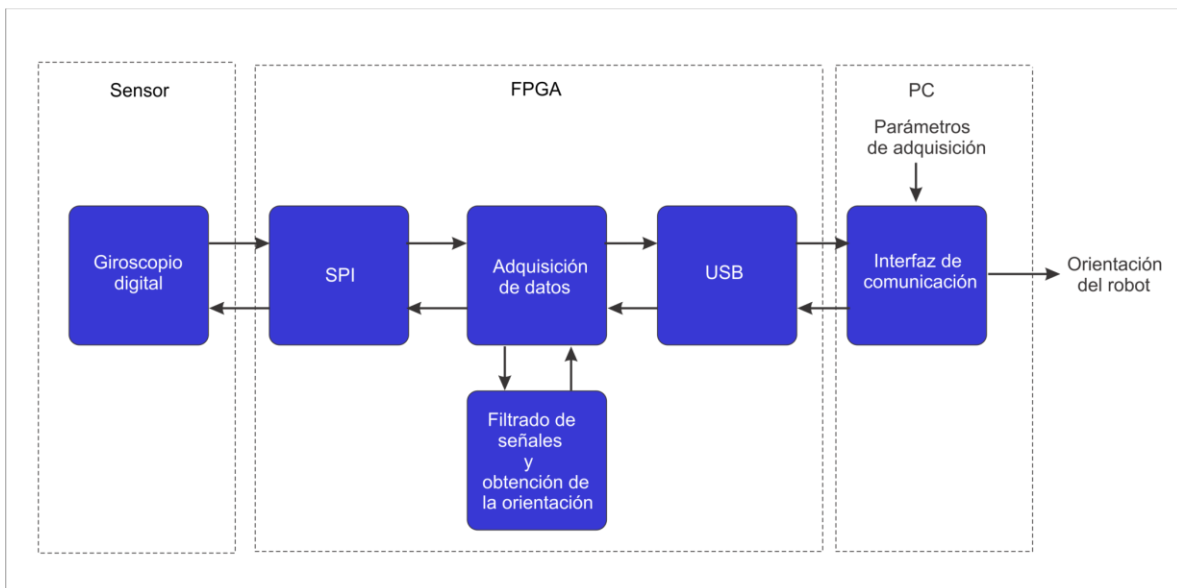


Figura 1.1: Diagrama general del sistema

Capítulo II

2.1. Estado del arte

Antes de poder comenzar con el diseño y desarrollo del sistema, un análisis de todos los temas relacionados para el desarrollo del proyecto es necesario. A continuación se presentan diversos conceptos y temas tomados como base para el desarrollo del proyecto.

2.2. Giróscopo Mecánico

El giroscopio o giróscopo es un dispositivo mecánico formado esencialmente por un cuerpo con simetría de rotación que gira alrededor de su eje de simetría. Cuando se somete el giroscopio a un momento de fuerza que tiende a cambiar la orientación del eje de rotación su comportamiento es aparentemente paradójico ya que el eje de rotación, en lugar de cambiar de dirección como lo haría un cuerpo que no girase, cambia de orientación en una dirección perpendicular a la dirección "intuitiva". El giroscopio fue inventado en 1852 por Léon Foucault, quien también le dio el nombre, montando una masa rotatoria en un soporte de Cardano para un experimento de demostración de la rotación de la tierra.

2.3. Giróscopo Electrónico

Por otro lado el gir6scopo electr6nico est6 basado en la fuerza de Coriolis.

2.3.1. Fuerza Coriolis

El efecto Coriolis, descrito en 1835 por el cient6fico franc6s Gaspard-Gustave Coriolis, es el efecto que se observa en un sistema de referencia en rotaci6n (y por tanto no inercial) cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia. Este efecto consiste en la existencia de una aceleraci6n relativa del cuerpo en dicho sistema en rotaci6n. Esta aceleraci6n es siempre perpendicular al eje de rotaci6n del sistema y a la velocidad del cuerpo. El efecto Coriolis hace que un objeto que se mueve sobre el radio de un disco en rotaci6n tienda a acelerarse con respecto a ese disco seg6n si el movimiento es hacia el eje de giro o alej6ndose de 6ste. Debido a que el objeto sufre una aceleraci6n desde el punto de vista del observador en rotaci6n, es como si para 6ste existiera una fuerza sobre el objeto que lo acelera. A esta fuerza se la llama fuerza de Coriolis, y no es una fuerza real en el sentido de que no hay nada que la produzca. Se trata pues de una fuerza inercial o ficticia, que se introduce para explicar, desde el punto de vista del sistema en rotaci6n, la aceleraci6n del cuerpo, cuyo origen est6 en realidad, en el hecho de que el sistema de observaci6n est6 rotando.

La fuerza de Coriolis es una fuerza ficticia que aparece cuando un cuerpo est6 en movimiento con respecto a un sistema en rotaci6n y se describe su movimiento en ese referencial. La fuerza de Coriolis es diferente de la fuerza centr6fuga. La fuerza de Coriolis siempre es perpendicular a la direcci6n del eje de rotaci6n del sistema y a la direcci6n del movimiento del cuerpo vista desde el sistema en rotaci6n. La fuerza de Coriolis tiene dos componentes:

- una componente tangencial, debido a la componente radial del movimiento del cuerpo, y
- una componente radial, debida a la componente tangencial del movimiento del cuerpo.

La componente del movimiento del cuerpo paralela al eje de rotación no engendra fuerza de Coriolis.

El valor de la fuerza de Coriolis F_c es:

$$F_c = -2m(\omega \times v) \quad (2.1)$$

Donde:

- m , es la masa del cuerpo.
- v , es la velocidad del cuerpo en el sistema en rotación.
- ω , es la velocidad angular del sistema en rotación vista desde un sistema inercial.
- \times , indica producto vectorial.

En la Figura 2.1 observamos un experimento donde podemos ver un disco que gira, con una velocidad angular ω , respecto a un eje perpendicular a la superficie del disco. En la superficie del disco se encuentra una bola de masa m , que se desplaza a una velocidad v , en la dirección que se observa en la figura, en ésta podemos observar la trayectoria seguida por la bola en la superficie del disco debido al efecto de las fuerzas de Coriolis.

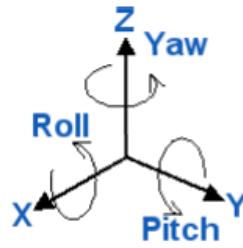
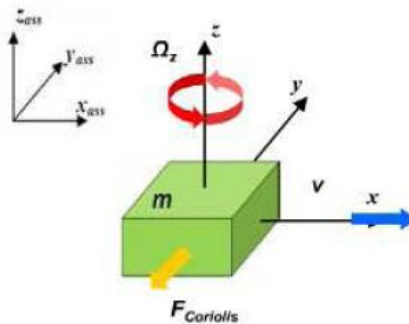


Figura 2.2: velocidad angular de los ejes Pitch, Roll y Yaw

Para entender cómo se produce el efecto Coriolis en el interior del MEMS consideremos el siguiente bloque de masa m , el cual se mueve a una velocidad v , tal y como se observa en la figura por la flecha azul. Si a este bloque le aplicamos un movimiento angular Ω_z , el cual se representa el rojo, se producirá una fuerza de Coriolis de valor $F = -2m \mathbf{v} \times \mathbf{\Omega}$, en la dirección que apunta la flecha amarilla (Figura 2.3).



$$F_{Coriolis} = -2m\Omega_z \wedge v$$

Figura 2.3: Efecto de Coriolis

Utilizando un interfaz sensora de tipo capacitiva se consigue medir esa velocidad angular aplicada en función de la fuerza de Coriolis generada. En la práctica, son dos masas las que se utilizan, como se puede observar en la figura 2.4.

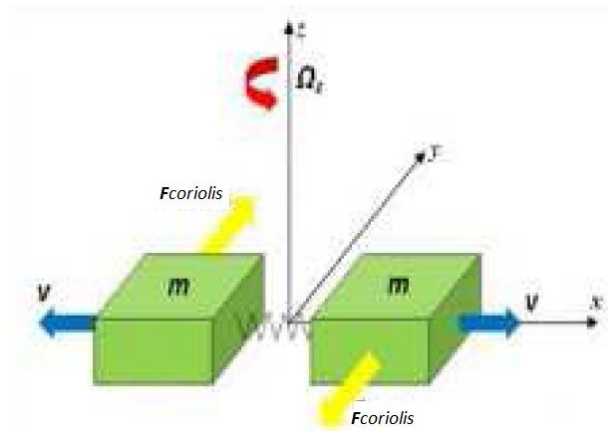


Figura 2.4: masas utilizadas para general el efecto Coriolis

Las dos masas oscilan de forma constante a una velocidad v (flechas azules), cuando se le aplica una velocidad angular, que viene denotada por Ω_z , las fuerzas de Coriolis resultantes tienen sentido opuesto (flechas en amarillo). Este resultado se traduce a una medida diferencial capacitiva, como se entenderá más adelante cuando nos centremos en la implementación física mediante MEMS. Cuando una aceleración es aplicada a las dos masas en la misma dirección, éstas

se mueven en la misma dirección, por lo que la medida capacitiva diferencial es cero, tal y como se observa en la figura 2.5.

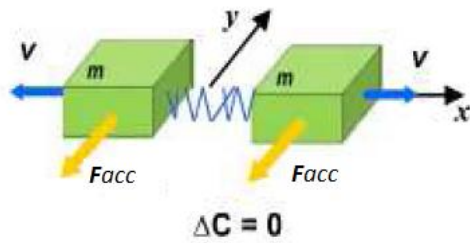


Figura 2.5: Aceleración de las masas en la misma dirección

En resumen en los giróscopos MEMS las masas se encuentra continuamente en movimiento, cuando un movimiento angular es aplicado, se genera un par de fuerzas de Coriolis, las cuales son medidas mediante una interfaz sensora capacitiva. Estas fuerzas son proporcionales a la velocidad angular aplicada, que es la magnitud que nos interesa medir.

2.5. Principales Características de los Giróscopos Electrónicos

A continuación se detallan las principales características de los Giróscopos electrónicos.

2.5.1 Nivel de Cero

Corresponde al nivel de tensión de salida, cuando no hay presencia de velocidad angular. Se suele indicar mediante un nivel de tensión continua a una temperatura de funcionamiento. Por ejemplo 1,23 V a 25°C.

2.5.2. Sensibilidad

Se mide como la relación entre la entrada y la salida del sensor, cuando se aplica un cambio a la entrada que produce una respuesta a la salida. Se mide en mV/dps. El valor de la sensibilidad es especificado para un rango de exactitud y es variable con la temperatura.

2.5.3. Densidad de Ruido

El último parámetro importante a tener en cuenta es la densidad de ruido. La variación del ruido a la salida depende del ancho de banda seleccionado. Reduciéndose éste mediante un filtro paso bajo a la salida, se mejora la resolución de salida. Normalmente la densidad de ruido se expresa en términos de “rate noise density” expresado en $\frac{dsp}{\sqrt{Hz}}$.

2.1 Cinemática de un robot manipulador

La cinemática es un área de la ingeniería que estudia el movimiento de los cuerpos sin tomar en cuenta la causa que los producen, limitándose, esencialmente, al estudio de la trayectoria de un cuerpo o una partícula durante un lapso de tiempo. La cinemática de un robot manipulador describe las trayectorias posibles de éste para posicionar y orientar su órgano terminal a un punto en el espacio, el cual se describe mediante un vector de posición ${}^A P$ (1) y una matriz de rotación ${}^A_B R$ (2), donde el vector de posición está compuesto por sus proyecciones P_x, P_y, P_z sobre los ejes x, y, z en un sistema de coordenadas de referencia A y la matriz de rotación por los vectores $[{}^A \hat{X}_B \ {}^A \hat{Y}_B \ {}^A \hat{Z}_B]$ que forman un sistema de coordenadas B adjunto al órgano terminal relativo al marco de referencia A .

$${}^A P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$${}^A_B R = [{}^A \hat{X}_B \ {}^A \hat{Y}_B \ {}^A \hat{Z}_B] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

El movimiento de un punto a otro el órgano terminal de un robot manipulador se logra desplazando los seis eslabones que lo conforman, siendo los primeros tres eslabones los encargados de la posición y los tres restantes los encargados de la orientación, describiendo de esta manera una trayectoria en el espacio del órgano terminal, donde la posición y la orientación en cada punto de la trayectoria se determinan mediante la matriz de transformación homogénea mostrada en la ecuación (3) la cual contiene los vectores de orientación n, o, a y el vector de posición p .

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Un método para describir la orientación del robot es tomar un sistema de coordenadas de referencia X, Y, Z y se calcula las rotaciones del cuerpo sobre el sistema de referencia, una rotación γ sobre el eje de referencia X, una rotación β sobre el eje de referencia Y y finalmente una rotación α sobre el eje Z, de esta manera se obtiene una expresión de la orientación en tres parámetros que son los ángulos de balanceo, inclinación y orientación (en inglés, roll, pitch, yaw). La forma de obtener los ángulos que describen la orientación utilizando la matriz de orientación homogénea es evaluando ciertos parámetros en las siguientes ecuaciones:

$$\beta = \text{Atan2}(-n_z, \sqrt{n_x^2 + n_y^2}) \quad (2.5)$$

$$\alpha = \text{Atan2}\left(\frac{n_y}{c\beta}, \frac{n_x}{c\beta}\right) \quad (2.6)$$

$$\gamma = \text{Atan2}\left(\frac{o_z}{c\beta}, \frac{a_z}{c\beta}\right) \quad (2.7)$$

En donde $c\beta$ es la abreviación de $\cos(\beta)$ y Atan es una función arcotangente de dos argumentos.

Usando estas ecuaciones de la cinemática de un robot (Craig, 2006) se puede obtener una representación matemática en base a tres ángulos un sistema de coordenadas de referencia que en conjunto representan la orientación de un robot en el espacio.

2.3 Filtrado

El filtrado es una técnica que se utiliza en diversas ramas de la ingeniería cuando se requiere tener información precisa de las mediciones de un fenómeno físico en observación. Los filtros generalmente se implementan en sistemas electrónicos análogos o digitales, los filtros análogos se componen de un circuito resistencia-capacitor en determinados arreglos dependiendo de las características requeridas por los algoritmos o ecuaciones, los filtros digitales se componen por diversos circuitos lógicos los cuales forman un sistema digital con las características de los algoritmos o las ecuaciones, las características deseadas en estos filtros digitales se especifican en el dominio de la frecuencia en función de la respuesta del filtro en magnitud y en la fase (Proakis, 1998).

2.3.1 Filtros FIR e IIR

Existen dos principales tipos de filtros digitales que se usan en el procesamiento digital de señales, estos son, los filtros de respuesta finita al impulso FIR y los filtros de respuesta infinita al impulso IIR. El tipo de filtro más sencillo es el FIR que tiene como características principales su estabilidad inherente y su fase lineal, el cual se representa por la ecuación (5) donde M es el orden del filtro, b_k los coeficientes del filtro y x la señal que se desea filtrar. La principal desventaja de este filtro es que requiere un orden grande para cumplir con las características de diseño.

$$Y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} b_k x(n-k) \quad (2.8)$$

La principal característica del filtro IIR es que es un filtro recursivo, es decir, su salida esta retroalimentada al sistema dando como resultado la ventaja de necesitar un orden menor para un diseño con las mismas características de diseño de un filtro FIR, la desventaja de su característica de recursividad es que se puede volver inestable debido al redondeo o truncamiento de bits que limita al sistema. El filtro FIR está definido por la ecuación (6).

$$Y(n) = - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (2.9)$$

2.3.2 Filtro Kalman

El filtro Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva óptima, por el método de mínimos cuadrados. La meta de esta solución consiste en calcular una estimación lineal de un parámetro en un tiempo t en base a la información disponible en $t-1$, y actualizar, con la información adicional disponible en t , dichas estimaciones, esto significa que el filtro predice el próximo valor de un parámetro con la información disponible de los valores ya obtenidos y una vez obtenido el nuevo valor se actualizan los datos para obtener la predicción del próximo dato, de esta forma el filtro tiene la habilidad de seguir el comportamiento de una señal desconocida. El algoritmo del filtro Kalman se divide en dos partes fundamentales, la estimación del valor de la señal y la corrección de la estimación, la predicción se lleva a cabo por medio de las ecuaciones (7) y (8). En la predicción se estima un nuevo valor \hat{X}_t^* de la señal en base

al valor pasado \hat{X}_{t-1}^* multiplicado por la matriz A que relaciona el estado en el momento t-1 con el estado en el momento actual t, también se estima el error de covarianza P_t^* en base a la matriz A, el error de covarianza en el estado pasado P_{t-1} y la covarianza de la señal Q.

$$\hat{X}_t^* = A\hat{X}_{t-1}^* \quad (2.10)$$

$$P_t^* = AP_{t-1}A^T + Q \quad (2.11)$$

En la segunda parte se realiza la corrección de los parámetros del algoritmo mediante las ecuaciones 9,10 y 11. La primera tarea para realizar la corrección es el cálculo de la ganancia Kalman representada por K_t , este factor minimiza la covarianza del error de la nueva estimación del estado, esta ganancia es calculada por medio de la ecuación 7, que implica el error de covarianza estimado P_t^* , la matriz H que relaciona el estado con la medición del sensor y la covarianza del ruido R. Con la ganancia Kalman definida se puede calcular el estado presente \hat{X}_t de la señal que entrega el filtro mediante el uso de la ecuación 8 donde se emplea el valor estimado \hat{X}_{t-1}^* , la ganancia K_t , la medición del sensor Z_t en el estado presente y la matriz H . Como último paso para completar el proceso de corrección se calcula con la ecuación 9 el error de covarianza mediante la ganancia K_t , la constante I , matriz H y el error de covarianza estimado P_t^* .

$$K_t = P_t^* H^t (HP_t^* H^t + R)^{-1} \quad (2.12)$$

$$\hat{X}_t = \hat{X}_{t-1}^* + K_t (Z_t - H\hat{X}_{t-1}^*) \quad (2.13)$$

$$P_t = (I - K_t H)P_t^* \quad (2.14)$$

Después de realizar las predicciones y correcciones el proceso se repite tomando como punto de partida las nuevas estimaciones del estado y covarianza del error.

La propiedad del filtro Kalman para manejar matricialmente los estados presentes y futuros permite que se pueda realizar un filtrado de varias señales diferentes y así obtener un parámetro o comportamiento en base a la fusión de esas señales (Sicilano, 2007).

2.4 Procesamiento en FPGA

Un FPGA (en inglés, Field Programmable Gate Array) es un dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada mediante un lenguaje de descripción de hardware como lo es VHDL. El lenguaje VHDL es el principal lenguaje que se utiliza para la descripción de circuitos ya que este lenguaje está estandarizado por el IEEE (por sus siglas en inglés, Institute of Electrical and Electronics Engineers) y todos los proveedores del lenguaje tienen que seguir el estándar, haciendo que los diseños sean portables de una plataforma a otra (Romero, 2007). Los FPGA tienen como características principales la capacidad de realizar diversos procesos en paralelo, trabajar a altas velocidades además de ser reconfigurables, estas características hacen que en ellos se puedan implementar diversos algoritmos que requieren gran velocidad de procesamiento.

Capítulo III

3.1 Metodología

En este trabajo de tesis describe como obtener la orientación del órgano terminal de un robot manipulador tipo PUMA mediante la información brindada por un giroscopio digital. Un robot PUMA cuenta con seis grados de libertad por lo tanto la ubicación de su último eslabón u órgano terminal queda determinada por la configuración de sus eslabones en un sistema de seis coordenadas independientes, la posición en un punto en el espacio se especifica mediante tres coordenadas en un sistema fijo y para la orientación se requieren un sistema adicional de tres coordenadas cuyo origen coincide con el punto en el espacio que describe la posición, con el cual se especifica las rotaciones de este sistema respecto a un sistema de referencia por lo general el mismo que describe la posición.

La metodología para realizar el trabajo propuesto se presenta de manera general en la figura 3.1, donde el proceso se realiza en tres bloques principales, el primero es la PC donde se encuentra la interfaz de comunicación desarrollada con la cual se introducen los parámetros de adquisición, que son frecuencia de muestreo y numero de muestras, al bloque siguiente y del cual se obtienen los datos de la orientación del órgano terminal. El siguiente bloque es el FPGA donde se encuentra el sistema de estimación de la orientación mediante módulos digitales descritos en lenguaje VHDL los cuales son: USB encargado de la comunicación con la PC mediante la interfaz de comunicación, SPI que permite la comunicación con el sensor giroscópico ya sea para configuración como para lectura de datos, Adquisición de datos que se encarga de recibir los parámetros de adquisición enviados por la PC, configurar el sensor, realizar lecturas del sensor mediante el bloque SPI así como guardar las lecturas en memoria y enviarlas al módulo de

Procesamiento de señales el cuál se encarga de la estimación de la orientación en base a las señales recibidas. Y finalmente el bloque de Sensor donde se encuentra el sensor L3G4200HD que funciona mediante el protocolo de comunicación SPI.

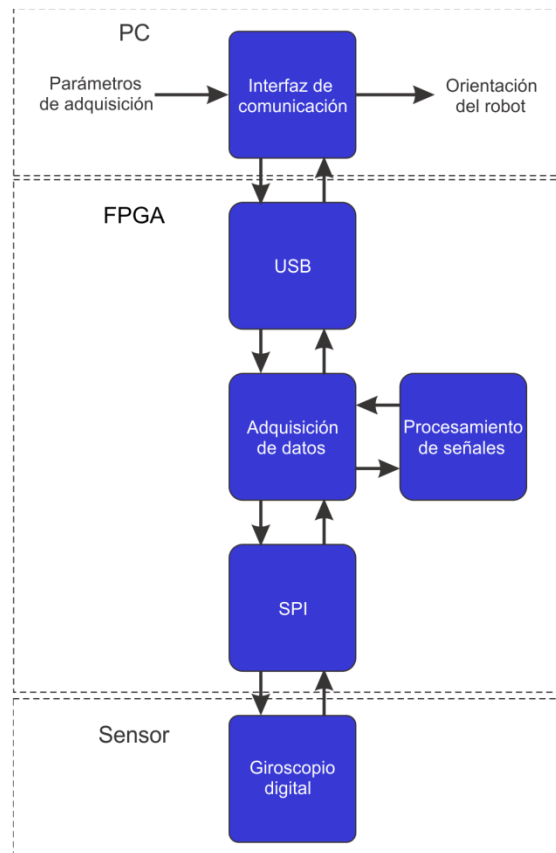


Figura 3.1: Metodología general

3.2. Instrumentación del robot

El robot está instrumentado con el sensor giroscópico de tipo MEMS con matrícula L3G4200HD de ST, el cual cuenta con tres escalas seleccionables de medición (250/500/2000 dsp) ,

interfaces digitales de comunicación SPI y I²C, datos de salida de 16 bits, un filtro pasa-bajas y un filtro pasa-altas integrados con ancho de banda seleccionable, voltaje de alimentación de 2.4V a 3.6V, rangos de temperatura de -40°C a +85°C, una FIFO configurable así como un conjunto de interrupciones también configurables. Este sensor entrega mediciones de velocidad angular en tres ejes independientes llamados Roll (rotación en el eje X), Pitch (Rotación en el eje Y) y Yaw (Rotación en el eje Z). El sistema junto con el sensor se encuentra ubicado en el órgano terminal del robot PUMA como se muestra en la figura 3.2.

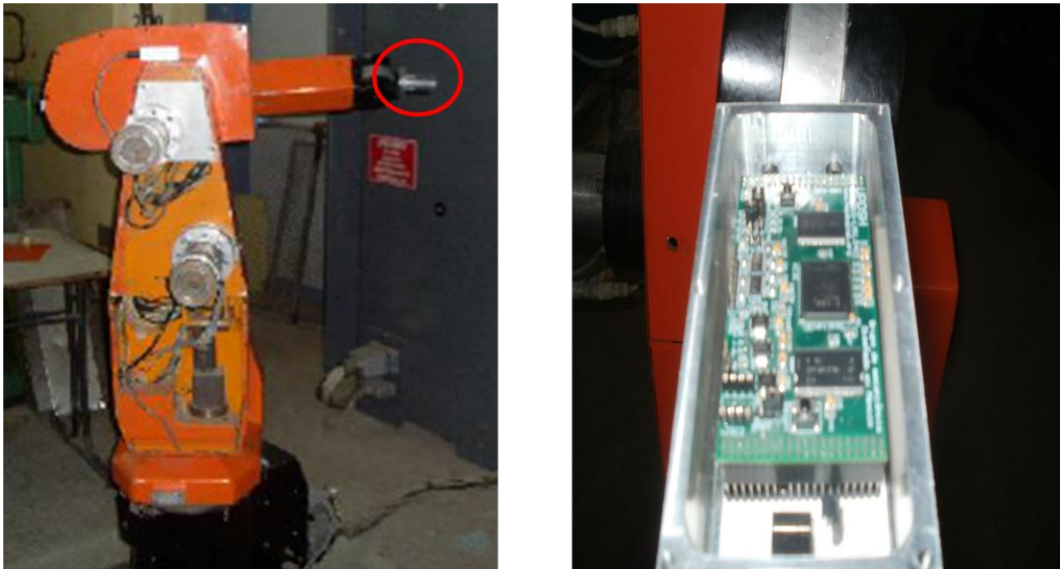


Figura 3.2: Ubicación del sensor

3.3. Sistema de adquisición de datos

Un sistema de adquisición de datos tiene la función de registrar y acondicionar señales eléctricas, provenientes de diversos tipos de sensores, en datos discretos para posteriormente ser

manipulados por un sistema digital o una computadora para su análisis. El sistema de adquisición de datos diseñado para realizar este trabajo consiste en un protocolo de comunicación con el sensor L3G4200HD (debido a que éste sensor es digital no se requirió de un módulo de conversión análogo/digital ya que este se encuentra integrado en el sensor) de esta manera se obtienen los datos de las velocidades angulares en los tres ejes del sensor (Roll, Pitch y Yaw) en un instante de tiempo, un módulo de comunicación USB para comunicarse con la PC mediante una interfaz de comunicación que se describirá posteriormente, un módulo llamado adquisición de datos el cual se encarga de coordinar los parámetros que se ingresan a través de la interfaz de comunicación para realizar una adquisición así como la inicialización del sensor y la escritura de los datos obtenidos en cada lectura en una memoria DRAM para su posterior procesamiento, y finalmente el módulo de procesamiento de señales que se encarga de realizar filtrados de la señal y la estimación de la orientación mediante los algoritmos necesarios para que posteriormente sean interpretados por el usuario.

El diseño del sistema de adquisición de datos se muestra de manera general en la figura 3.3.

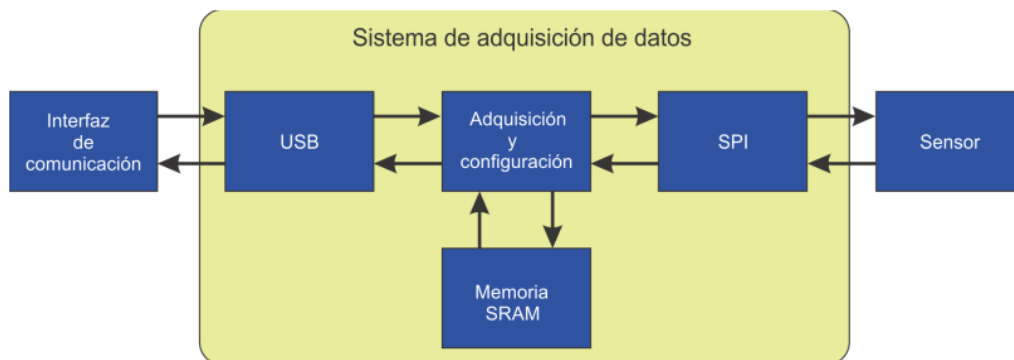


Figura 3.3: Diseño del sistema de adquisición de datos

3.3.1. Protocolo de comunicación SPI

El protocolo de comunicación SPI (Serial Peripheral interface) es un estándar para la transferencia de información entre dispositivos electrónicos mediante el flujo de bits regulado por un reloj, éste cuenta con cuatro líneas de comunicación que interconectan a los dispositivos que se desean comunicar como muestra el diagrama de tiempo en la Figura 3.3.

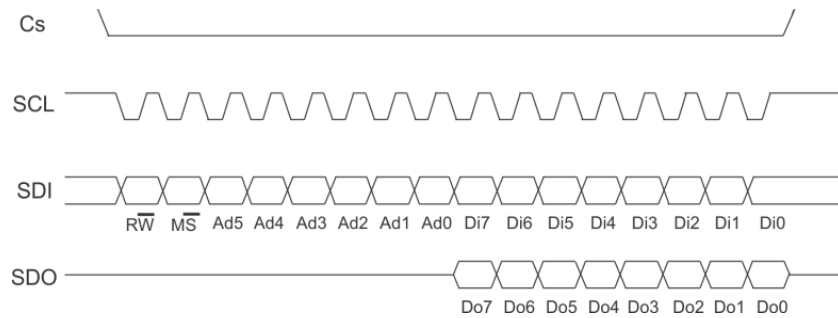


Figura 3.4: Diagrama de tiempo del protocolo SPI

El protocolo permite la comunicación entre dos dispositivos donde uno de ellos debe bajar el nivel lógico de la línea Cs como habilitación para llevar a cabo una comunicación así como generar la frecuencia de reloj de la comunicación y transmitirla por la línea SCL al dispositivo encargado de estas tareas se le denomina “maestro” y al otro dispositivo se le denomina “esclavo” debido a que el maestro mantiene el control sobre la comunicación, la línea SDI es la línea de transferencia de bits desde el dispositivo maestro hacia el esclavo, el bit RW indica si se realizará una escritura o una lectura en el dispositivo esclavo, el bit MS indica si la dirección enviada al dispositivo esclavo no varía en cada escritura-lectura o se incrementa cada vez que se realice una lectura o escritura,

los bits de Ad5 a Ad0 indican la dirección del dispositivo esclavo que se desea leer o escribir, los bits de Di7 a Di0 indican el dato que se mandara a escribir, y finalmente los bits Do7 a Do0 de la línea SDO representan la lectura del dato enviado por el esclavo.

3.3.2. Interfaz de comunicación

La interfaz de comunicación se encarga de permitir a un usuario la introducción de los parámetros de adquisición, los cuales son la frecuencia de muestreo y el número de muestras, del sistema así como la visualización de los datos obtenidos desplegándolos en la pantalla de la PC. La interfaz se desarrolló en el lenguaje de programación C++, la cual es una aplicación de consola que se ejecuta en la PC y una vez ingresados los parámetros de adquisición se comunica con el módulo USB que se encarga de comunicarlo con el sistema de adquisición, ya sea para escribir los parámetros o realizar una lectura de los datos adquiridos y procesados.

3.3.3. Adquisición del sensor

La adquisición del sensor consiste en un módulo con la tarea de realizar una o múltiples lecturas del sensor definidas por el número de muestras requeridas por el usuario a un intervalo de tiempo definido por el usuario mediante la frecuencia de muestreo, este bloque también se encarga de guardar en la memoria DRAM cada lectura realizada del sensor.

3.3.4. Configuración del sensor

La configuración del sensor es parte del módulo donde se realiza la adquisición del sensor, al encender el sistema el módulo automáticamente realiza una serie de escrituras de datos en determinadas direcciones del sensor, grabadas en una memoria ROM, para configurar y asegurar el funcionamiento deseado del sensor antes de realizar alguna adquisición. En la ROM se encuentran todas las direcciones configurables del sensor con el cual se activan o desactivan diversas funciones del sensor como los filtros internos, FIFO, interrupciones, así como seleccionar el ancho de banda de los filtros.

3.4. Diseño del sistema de adquisición

Para la implementación del sistema de adquisición de datos primero se desarrolló un módulo encargado de realizar una comunicación con el giroscopio mediante el protocolo SPI, después se desarrollo el sistema de adquisición y configuración del sensor el cual utiliza el modulo de comunicación SPI mencionado anteriormente.

3.4.1. Diseño en hardware del protocolo SPI

La estructura digital implementada se muestra en la figura 3.4, donde el elemento fundamental es una maquina de estados FSM que se encarga de coordinar las tareas de los otros bloques, esta genera directamente la habilitación Cs para la comunicación con el sensor, controla un contador con la señal OPC2 y en base al dato predeterminado T se genera un periodo contante a una frecuencia de 16MHz el cual al ingresar al circuito de cuadratura (constituido por un registro y una compuerta lógica OR) se convierte en una señal cuadrada con una frecuencia de 8MHz utilizada para el reloj de trabajo del sensor, con la señal OPC1 controla otro contador el cual se encarga de habilitar un registro, al cual entran los datos del registro de desplazamiento adquiridos a través de SDO, cuando el dato es válido, y finalmente genera la señal OPC3 el cual controla el tercer contador el cual a su vez controla un multiplexor encargado de enviar bit por bit los datos de las entradas Add y Din a través de SDI. Las señales de control del protocolo constan de WR, RD encargadas de indicar si se desea realizar una lectura o una escritura, NS que indica el numero de lecturas o escrituras del sensor, en Add se introduce la dirección del sensor de interés y en Din se introduce el dato que se desea escribir en el sensor, todo esto controlado por una señal de inicio STT y una de fin RDY del proceso.

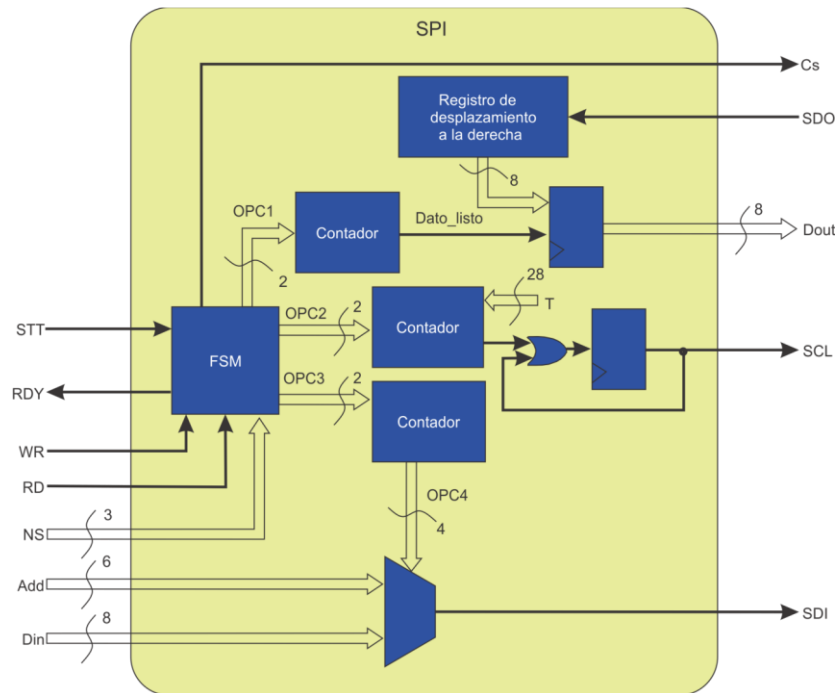


Figura 3.5: Estructura digital del protocolo SPI

3.4.2. Diseño en hardware del sistema de adquisición y configuración del sensor

El sistema de adquisición y configuración del sensor que se implementó es una FSM que se encarga, con ayuda de otros bloques, de controlar el módulo SPI descrito en la sección anterior como se muestra en la figura 3.6. Los bloques auxiliares de la FSM son un contador que se encarga de ir seleccionando las direcciones Tabla de instrucciones que no es otra cosa que una memoria ROM, los datos contenidos son las direcciones y datos a escribir del sensor que se conectan directamente al bloque SPI y un bit de lectura-escritura que se conecta a la FSM, se controla un multiplexor que determina el número de lecturas (NS) del sensor predeterminadas a una o seis

lecturas, también se controla un contador encargado de generar las seis direcciones de un banco de registros encargado de ir guardando en registros los datos leídos del sensor para posteriormente ser concatenados en un dato completo de 16 bits. los bits RW y WR del SPI se controlan directamente. Esta estructura cuenta con las líneas de comunicación Cs, SCL, SDI y SDO también cuenta con los datos de salida a 16 bits de la lectura de las velocidades angulares en los tres ejes del sensor. La estructura se controla mediante una señal de inicio STT y una de fin RDY.

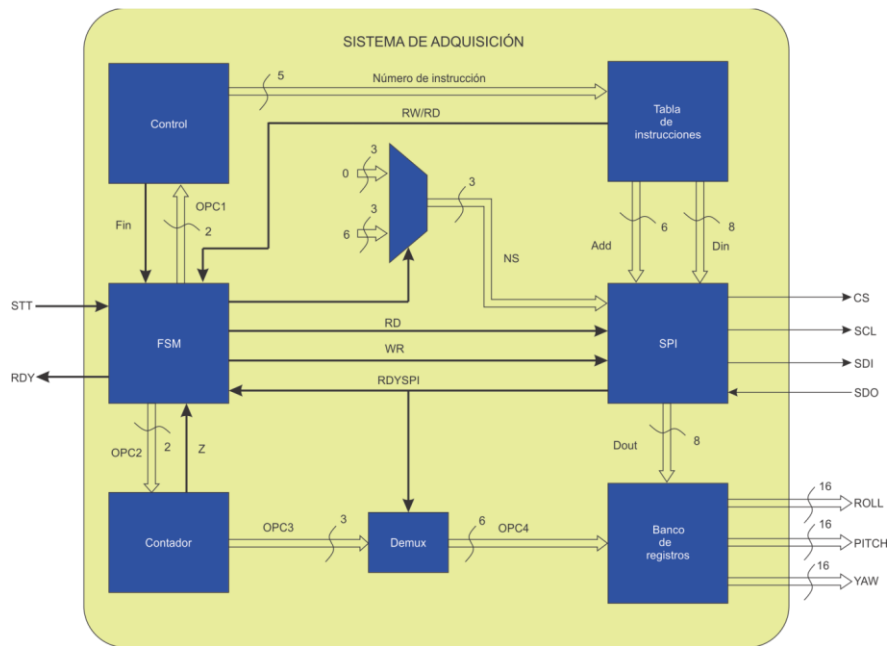


Figura 3.6: Sistema de adquisición y configuración del sensor

3.4.3. Sistema de adquisición de datos

Las salidas Roll, Pitch y Yaw del sistema anterior se conectaron a una memoria DRAM para el almacenamiento de las lecturas y a su vez a un módulo USB desarrollado en la Universidad Autónoma de Querétaro para permitir la comunicación a través de la interfaz de comunicación con la PC, de esta manera se tiene el sistema de adquisición de datos necesarios para realizar las mediciones y su manipulación mediante algoritmos para obtener la estimación de la orientación.

3.5. Acondicionamiento de las señales del giroscopio

Antes de realizar cualquier tipo de procesamiento a una señal es necesario realizar un acondicionamiento de ésta para eliminar componentes no deseadas introducidas a la señal por diversas causas y de esta manera asegurar que la estimación de la orientación o cualquier otra estimación sea lo más fiable posible.

3.5.1. Calibración del giroscopio

La calibración del sensor consiste en asegurar que la señal entregada por el sensor sin movimiento sea cero, para esto se diseñó e implementó una estructura digital que calcula el nivel de componente directa u offset una vez calculado este valor se le resta a todas las muestras adquiridas. El diseño de este módulo se muestra en la figura 3.7, donde el centro del proceso es un

acumulador que va sumando los datos de entrada hasta cierto número de muestras establecido por N, un contador se encarga de ir contando cada nuevo dato y cuando su cuenta es igual a N éste manda la señal de fin RDY lo cual indica que se tiene el valor del offset a lo que se tiene que responder con una señal por la línea de Captura de dato para que sea guardado en un registro, posteriormente cada muestra que entra se le realiza una resta con el valor del offset obteniendo así una señal calibrada por la línea Dato de salida. El módulo cuenta con una línea llamada Calibración que tiene la función de realizar la calibración de nuevo en caso de ser necesario y una línea llamada Nuevo dato que indica cuando capturar un dato valido.

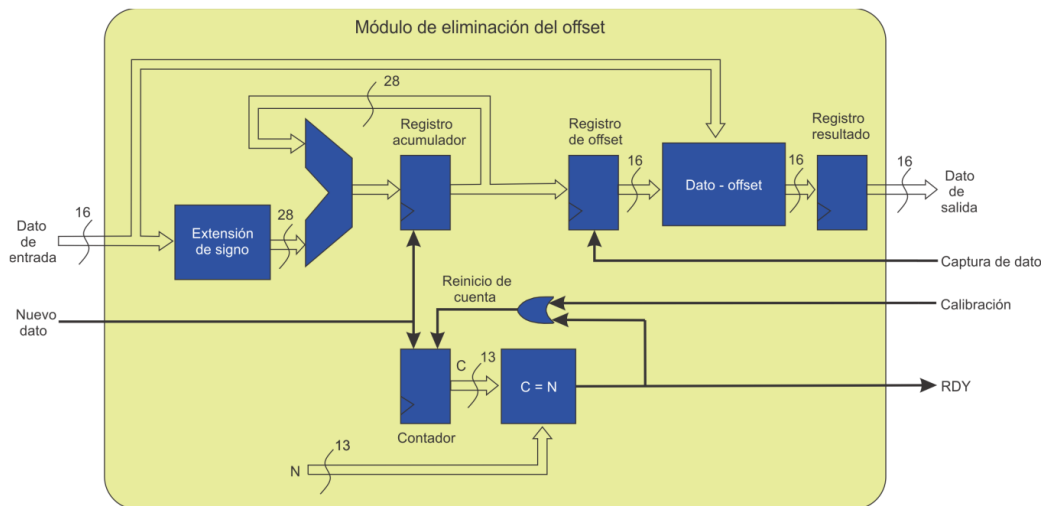


Figura 3.7: Módulo de eliminación del offset

El giroscopio entrega tres señales de velocidad en los ejes Roll, Pitch y Yaw por lo tanto es necesario calibrar cada señal por separado debido a que entregan diferentes niveles de offset, por

esta razón se requiere implementar un módulo de eliminación de offset por cada eje, conectados entre sí por las señales de Captura de dato, Calibración, Nuevo dato y RDY como se muestra en la Figura 3.8.

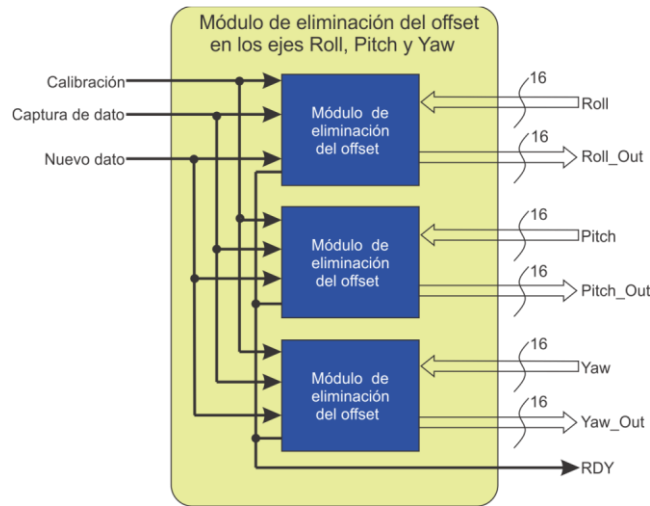


Figura 3.8: Módulo para la eliminación de offset para tres ejes independientes

Las señales del módulo de la figura anterior son generadas por una FSM, que también genera la señal STT de inicio del módulo de adquisición para iniciar una comunicación mediante SPI con el giroscopio y recibe la señal de fin de comunicación RDY del mismo módulo. El Sistema de calibración completo se encuentra en la Figura 3.9.

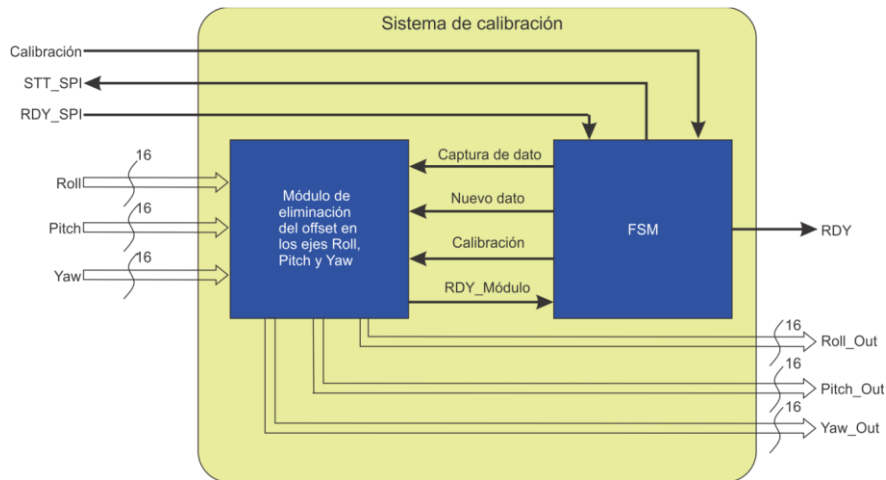


Figura 3.9: Sistema de calibración

3.5.2. Filtrado de las señales del giroscopio

El filtrado de las señales sirve para eliminar interferencias en las señales o variaciones no deseables en la medición. Para esta tarea se implementó una unidad de filtrado, que se muestra en la Figura 3.10, la cual realiza las operaciones de Diezmado, de Promediado móvil y filtrado Kalman. Los datos adquiridos por el sistema de adquisición de datos ingresan por el bus de Datos de entrada para su filtrado y salen por el bus de Combinación de filtros, la selección de los filtros que se desean utilizar se realiza mediante las líneas de Selección promedio móvil, Selector filtro Kalman y Selector Diezmado. La línea Fs es el inicio del proceso de los filtros y RDY indica el fin del proceso de filtrar los datos.

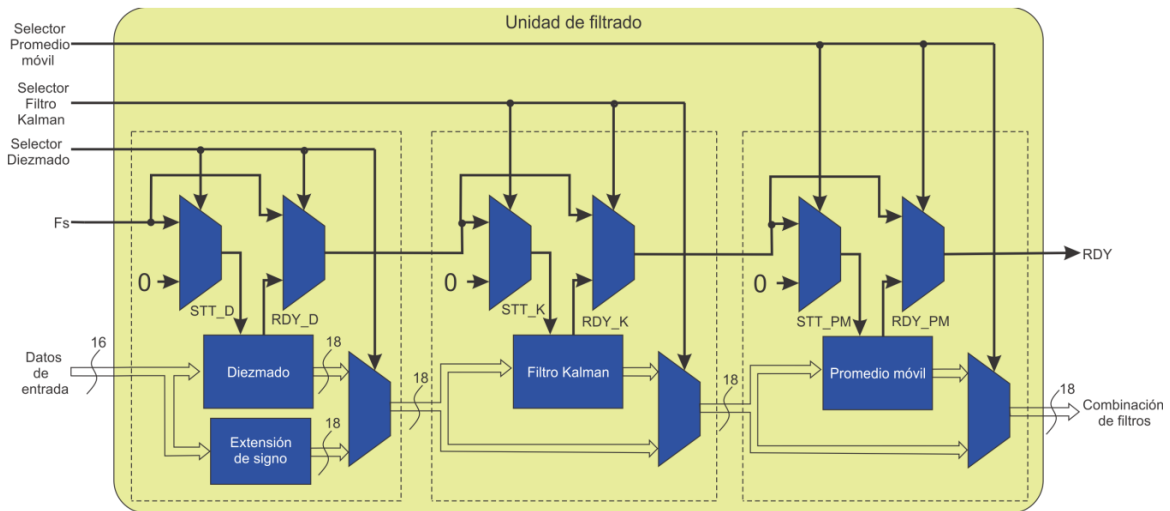


Figura 3.10: Unidad de filtrado

Para obtener las señales filtradas se implemento una unidad de filtrado para cada uno de los tres ejes del giroscopio, a esta estructura que cuenta con tres unidades de filtrado se le llamó Banco de filtros que se muestra en la figura 3.11.

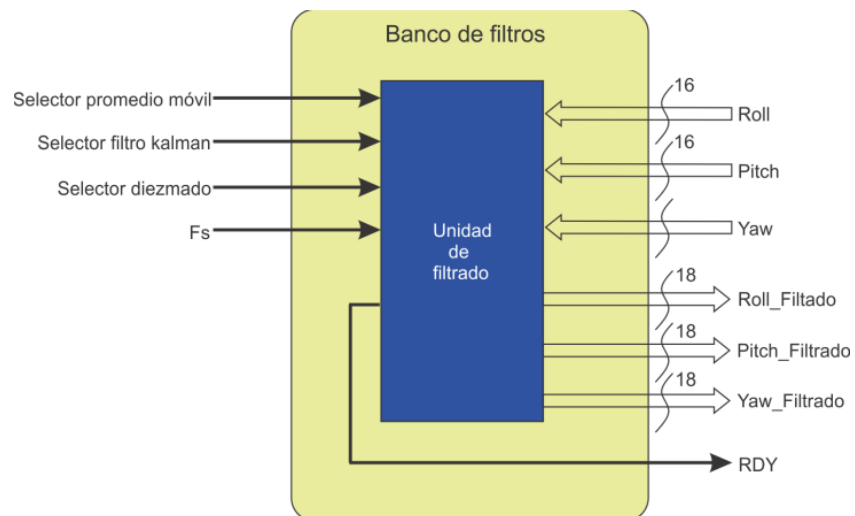


Figura 3.11: Banco de filtros

3.5.3. Sistema de acondicionamiento de señales

En este módulo se integran la estructura de eliminación del offset en los tres ejes y el banco de filtros como se ve en la figura 3.12, este sistema recibe las señales provenientes de los ejes Roll, Pitch y Yaw provenientes del sensor y entrega las señales resultantes del proceso de eliminación de offset y del filtrado. Los datos de entrada Roll, Pitch y Yaw así como las señales Calibración, STT_SPI y RDY_SPI se conectan con el modulo de adquisición, los datos de salida Roll_filtrado, Pitch_filtrado, Yaw_filtrado y la señal RDY se conectan a un bloque controlador de la memoria DRAM que guarda los datos para su posterior procesamiento. Las señales de selección de filtros (Selector promedio móvil, Selector filtro Kalman y Selector Diezmado) son configurables por el usuario y en la línea Fs se ingresa el periodo con la que llega un dato nuevo.

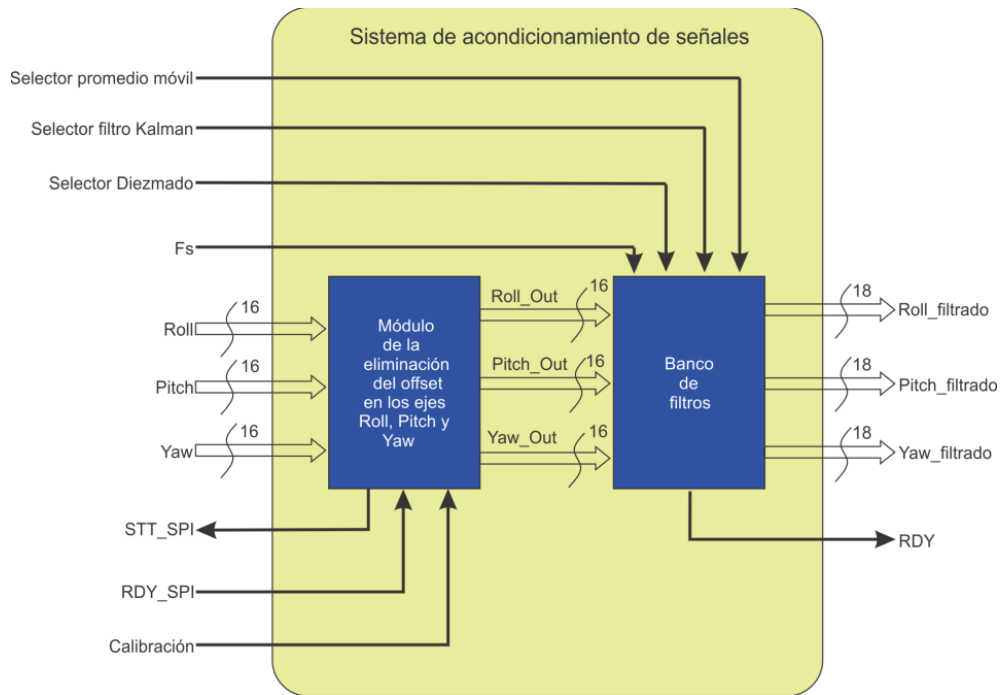


Figura 3.12: Sistema de acondicionamiento de señales

Capítulo IV

4.1. Resultados

Con el sistema desarrollado se realizaron primeramente pruebas colocando el sensor en un motor de corriente directa para obtener la velocidad angular de un eje del giroscopio, posteriormente el sensor se colocó en el órgano terminal del robot puma y se realizaron las pruebas para obtener la orientación de sus movimientos, los resultados se muestran a continuación.

4.1.2. Pruebas de velocidad angular

Para conocer la precisión y exactitud del sensor en conjunto al sistema desarrollado se realizaron pruebas de velocidad angular debido a que es la variable que mide directamente el giroscopio, se monto el sensor en el eje de un motor de corriente directa como se muestra en la Figura 4.1, este motor cuenta con un encoder acoplado a la flecha el cual permite medir la velocidad angular y poder comparar las mediciones de los dos sensores, la medición comienza con el motor a una velocidad cero que después aumenta y se mantiene en 380 grados por minuto para posteriormente disminuir a cero.

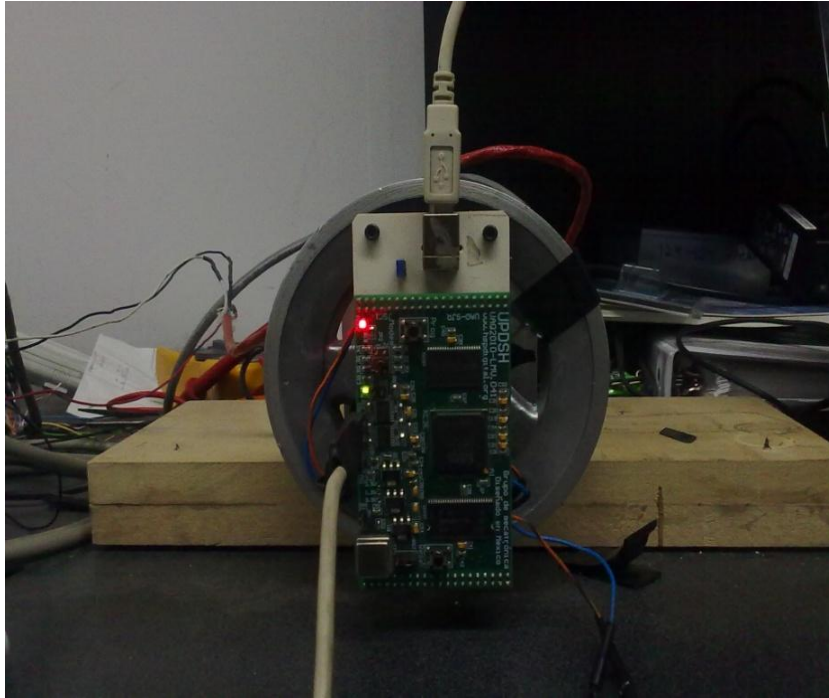


Figura 4.1: Pruebas de velocidad angular

Los resultados obtenidos en esta prueba pueden observarse en la Figura 4.2 donde la señal de color azul es la medida por el encoder y la señal de color rojo es la medida por el giroscopio, en la cual la amplitud representa la velocidad angular en grados por segundo ($^{\circ}/s$) a través del tiempo. En la imagen se puede observar una similitud en las mediciones las cuales alcanzan la misma amplitud al momento de que el motor se encuentra en su velocidad máxima, también se observa que la señal medida por el giroscopio (color rojo) presenta una gran cantidad de ruido eléctrico haciendo evidente la necesidad de utilizar el banco de filtros diseñado para el sistema. Para esta prueba solo se utilizó el eje Yaw del giroscopio.

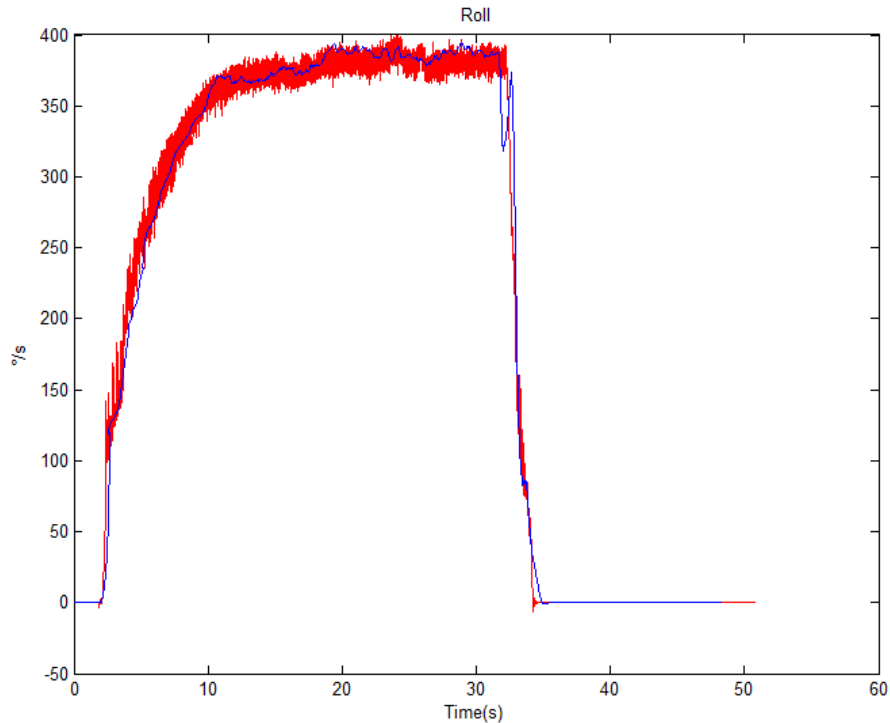


Figura 4.2: Velocidad del motor (rojo giroscopio, azul encoder)

4.1.3 Pruebas de orientación en el robot PUMA

Como se mostró en la Figura 3.2 el giroscopio junto con el sistema digital desarrollado se montaron sobre el órgano terminal del robot PUMA, de esta manera el sistema registra las velocidades del movimiento del robot en los ejes Roll, Pitch y Yaw, una vez obtenidas las velocidades en cada eje se procede a realizar un procesamiento de señales para filtrar e integrar la señal y de esta manera obtener la orientación que es la información de interés. La prueba que se realizó consistió en mover el primer eslabón del robot (que coincide con el eje Yaw del giroscopio) 90° y el segundo eslabón (que coincide con el eje Roll) 180° en un tiempo de 40 segundos, las velocidades obtenidas en los tres ejes se muestran en la Figura 4.3.

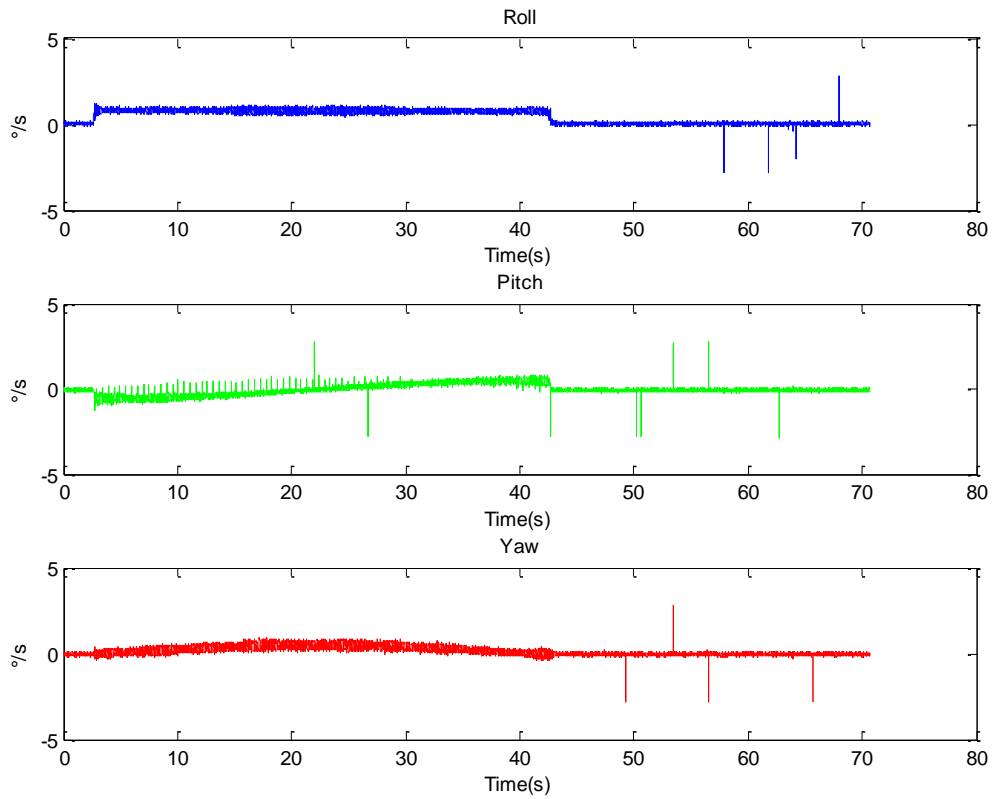


Figura 4.3: Velocidades obtenidas en los ejes Roll, Pitch y Yaw

Como se observa en la Figura 4.3 las señales de velocidad presentan un nivel de ruido no deseado que afecta la precisión y exactitud de las medidas, estas señales de velocidad fueron adquiridas sin filtrar, ahora en la Figura 4.4 se muestran las mismas señales filtradas por un filtro Butterworth, en la Figura 4.5 se utiliza un Diezmado para eliminar el ruido y en la Figura 4.6 son filtradas por un filtro Kalman.

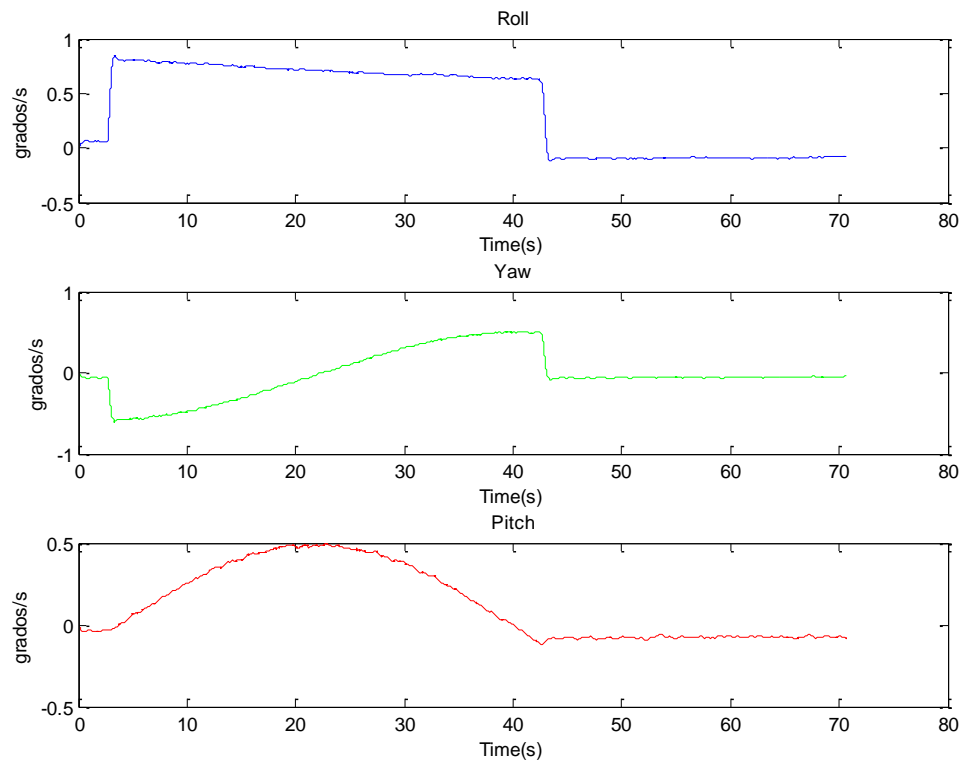


Figura 4.4: filtro Butterworth

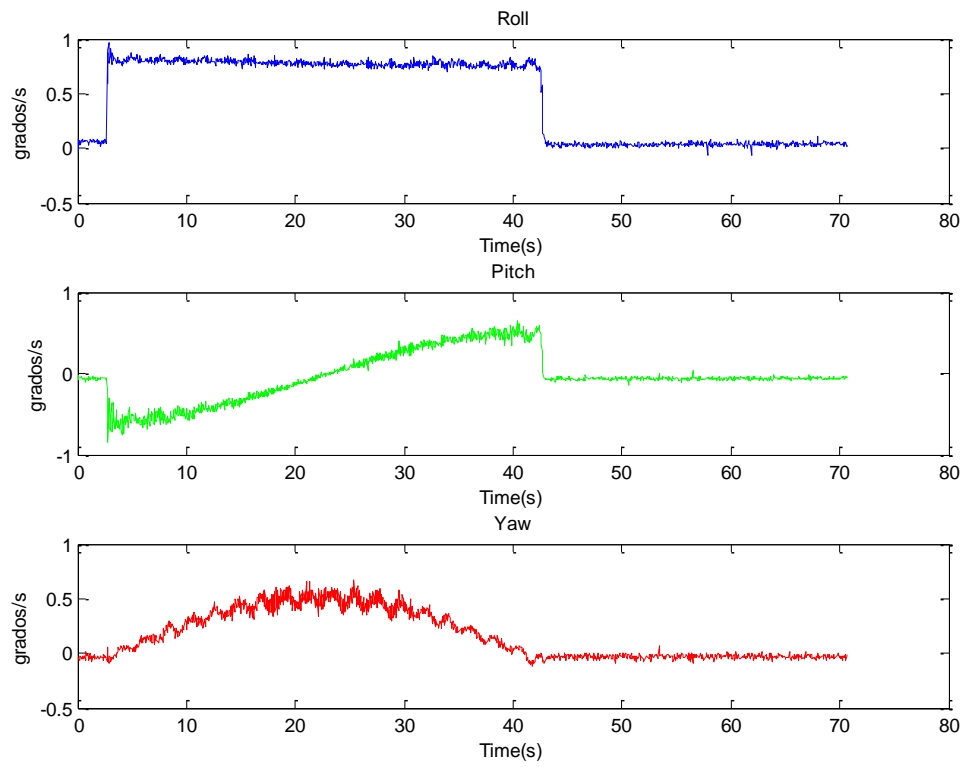


Figura 4.5: Diezmado

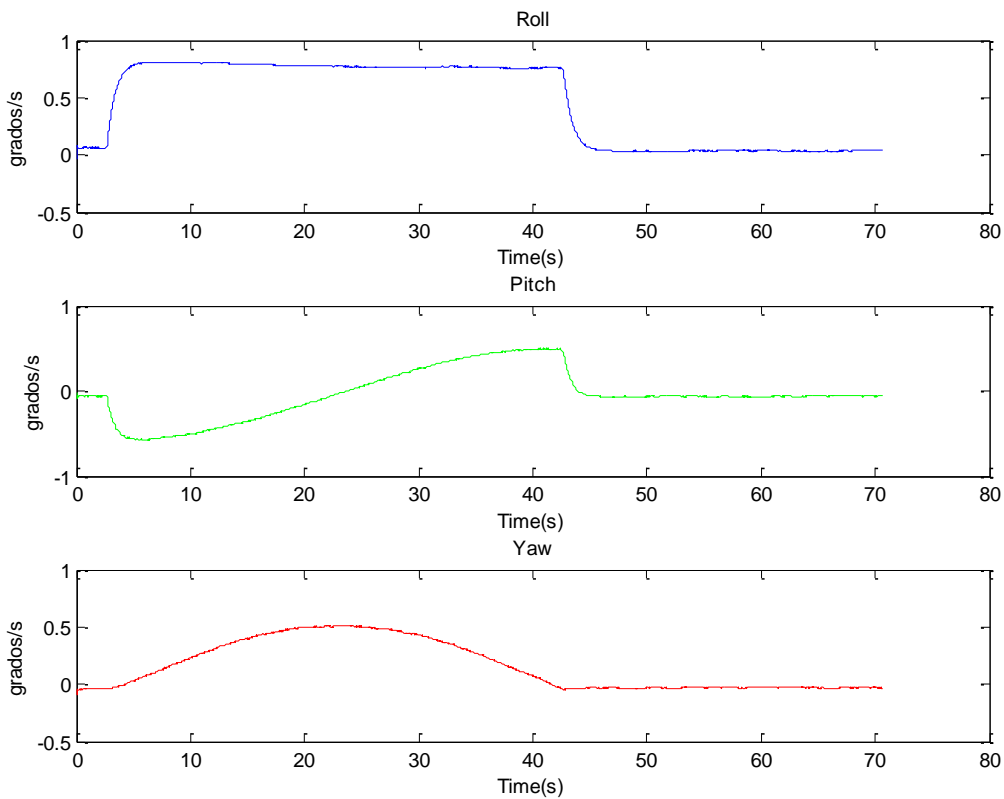


Figura 4.6: Kalman

Como se observa en las figuras anteriores el filtro butterworth y el filtro Kalman son los que mejor responden para filtrar las señales para esta aplicación en particular, otra observación es que el eje Pitch muestra la información del movimiento combinado de los ejes 1 y 2 del robot. El siguiente procesamiento que realiza es la integración de las señales para obtener la orientación, se integraron las tres señales de manera independiente y dicho proceso se realizó con los resultados de los tres filtros para poder comparar los resultados entre sí. En la Figura 4.7 se muestra la orientación del órgano terminal del robot integrando las señales de velocidad del filtro Butterworth y en la Figura 4.8 las velocidades del filtro Kalman. Se integraron estos dos casos debido a que fueron los filtros que mostraron mejores resultados en la prueba de velocidad anterior.

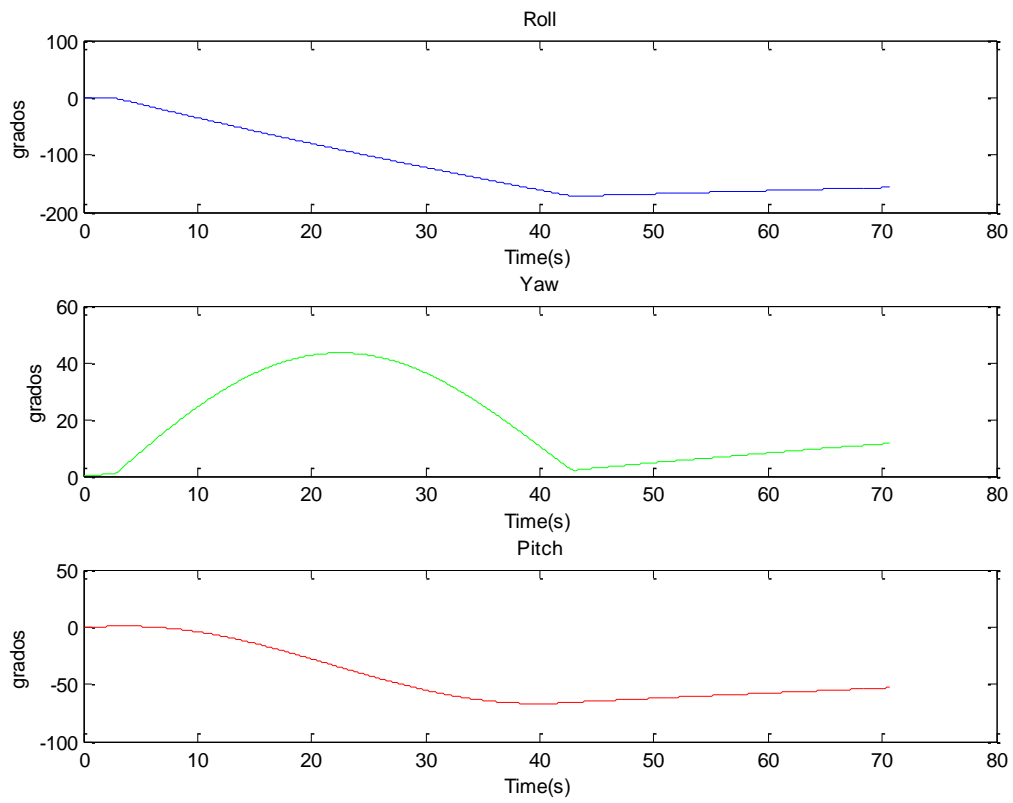


Figura 4.7: Orientación del robot utilizando un filtro Butterwork

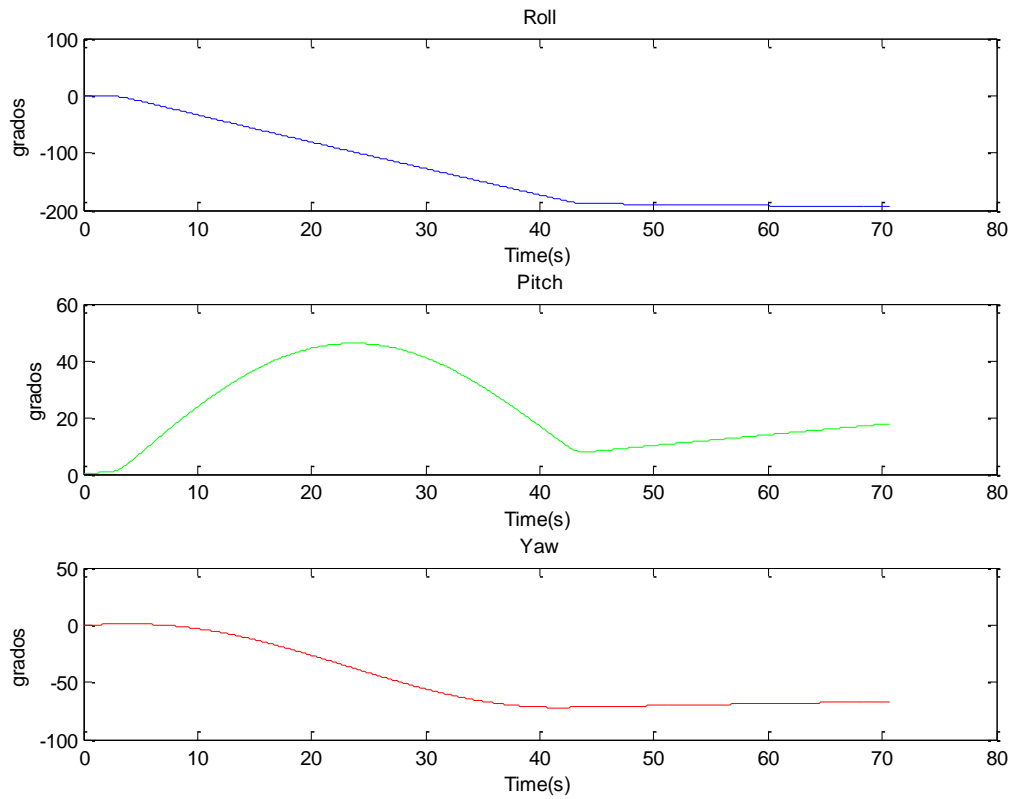


Figura 4.8: Orientación del robot utilizando filtro Kalman

Como se puede observar las dos figuras anteriores muestran buenos resultados en la obtención de la orientación, el sistema desarrollado es capaz de obtener la orientación así como mostrar el comportamiento de la misma durante un tiempo determinado.

Capítulo V

Conclusiones

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el giroscopio muestran el comportamiento de las señales en cada uno de sus tres ejes las cuales son afectadas por vibraciones mecánicas o fenómenos eléctricos externos por lo cual es indispensable realizar un pre-procesamiento de las señales antes de ser utilizadas en alguna aplicación, de esta manera se obtiene una medición más exacta y por lo tanto un error menor en las diversas aplicaciones donde se utilice el giroscopio. Se observó que el offset presente en los tres ejes no es necesariamente tiene la misma magnitud, puede ser mayor en uno de los ejes y en otros ser no significativo pero es necesario realizarlo para asegurar la exactitud en las mediciones. Los filtros son indispensables para eliminar el ruido y variaciones muy grandes como los picos presentes en las señales, se observo que con cualquiera de los dos filtros se obtienen buenos resultados pero se podría decir que el filtro Kalman es mejor debido a que elimina menos información en la señal aumentando la exactitud de la medición. Con este trabajo se consiguió una estructura digital en FPGA para acondicionar las señales y obtener la orientación de un robot de manera precisa y con un nivel de exactitud aceptable, la obtención obtenida por este sistema puede ser utilizada para el monitoreo y evaluación del desempeño de un robot o incluso como información requerida por un sistema más complejo como lo puede ser un sistema de control.

Bibliografía

Antonello, R. and Oboe, R. 2012. "Exploring the potential of MEMS gyroscopes". IEEE Industrial Electronics Magazine.

Billur Barshan. 1994. "Orientation Estimate for mobile robots using gyroscopic information". IEEE, International conference on intelligent robots and systems.

Wang, L. and Zhang, F. 2010. "Analyses on output signal of MEMS gyroscope applied to low speed rotating carrier". IEEE, International conference on information and automation.

Li, J. and Du, M. 2010. "Fuzzy modeling and compensation of scale factor for MEMS gyroscope". IEEE, International conference on digital manufacturing & automation.

Jianming Xiao, et. al. 2008. "Research on the signal of silicon micro-machined gyroscope for rotating carrier". IEEE, Pacific-Asia workshop on computational intelligence and industrial application.

Li, J. and Du, M. 2010. "Fuzzy modeling and compensation of scale factor for MEMS gyroscope". IEEE, International conference on digital manufacturing & automation.

Liu Haipeng, et. al. 2009. "Performance analysis and measurement of micro-machined gyroscope". IEEE, International conference on electronic measurement & instrument.

Rodriguez Carlos, et al. 2010. "FPGA-based fused smart sensor for dynamic and vibration parameter extraction in industrial robot links". Sensors.

Wang, L. and Zhang, F. 2010. "Analyses on output signal of MEMS gyroscope applied to low speed rotating carrier". IEEE, International conference on information and automation.

XunSheng Ji, et. al. 2006. "Application of the digital signal processing in the MEMS gyroscopes de-drift". IEEE, International conference on nano/micro engineered and molecular systems.

Proakis, G. and Manolakis, G. 2007. "Tratamiento digital de señales" 4ta Edición, Pearson. ISBN 8483223473.

ANEXO A



Unidad de pre-procesamiento en FPGA para giroscopio digital de tres ejes tipo MEMS

FPGA-Based pre-processing unit for tri-axial MEMS digital gyroscope

Uriel Lomelí Hernández¹, Carlos Rodríguez Doñate¹, Roque Alfredo Osornio Ríos¹, René de Jesús Romero Troncoso², Arturo García Pérez².

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería Campus San Juan del Río. Tel: 01(427)274 1244.

²DICIS Universidad de Guanajuato, carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5 + 1.8. Comunidad Palo Blanco, 36730 Salamanca, Guanajuato, Gto. México.

RESUMEN. Los giroscopios digitales tipo MEMS (Microelectromechanical System) son sensores electrónicos de movimiento angular los cuales se utilizan en: sistemas de orientación, video juegos, telefonía móvil, medición de velocidad angular, entre otras aplicaciones. El objetivo de este trabajo es la descripción en VHDL e implementación en FPGA de una unidad de pre-procesamiento digital capaz de disminuir el error en las mediciones realizadas por un giroscopio digital de tres ejes tipo MEMS aumentando la exactitud de éstas. Se emplearon métodos estadísticos para calcular y eliminar el nivel de offset en cada una de los ejes del giroscopio, así como las técnicas de Diezmado y filtro Kalman para eliminar el ruido eléctrico en las señales. Para la validación del sistema el giroscopio se montó en la flecha de un motor de CD con el que se realizaron pruebas de velocidad de las cuales se obtuvo como resultado una considerable reducción en la variación de alta frecuencia (ruido) en las medidas del giroscopio así como un nivel de referencia de cero en la señal gracias a la eliminación del offset. Con esta unidad de pre-procesamiento se obtiene un acondicionamiento de la señal listo para ser utilizadas por algún sistema digital que requiera la aplicación del giroscopio.

Palabras clave: giroscopio digital de tres ejes, MEMS, procesamiento de señales, FPGA.

1. INTRODUCCIÓN

Un giroscopio es cualquier cuerpo en rotación que presenta dos propiedades fundamentales: la inercia giroscópica o “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, los giroscopios tienden a mantener su orientación en el espacio siempre que permanezcan en rotación por lo que son utilizados en sistemas de orientación de barcos, aviones y vehículos. Los sensores MEMS son estructuras que cuentan con una parte electrónica y una mecánica integradas en un chip de silicio de dimensiones pequeñas, existen diversas estructuras mecánicas las cuales determinan el fenómeno físico que miden siendo generalmente aceleración, orientación y velocidad angular (acelerómetro, compas y giroscopio respectivamente). Los sensores giroscópicos se conforman de una masa que tiene intrínseca un sistema de tres coordenadas en los que se mide la velocidad angular de dicha masa sobre cada uno de ellos. Estos giroscopios tienen la ventaja de ser económicos y de dimensiones muy pequeñas ideales para una infinidad de aplicaciones. Gracias a estas características se han desarrollado trabajos para la estimación de la orientación en robots móviles (Billur Barshan. 1994). Las desventajas de este tipo de giroscopios son: el registro de movimientos que no son de interés como lo son las vibraciones en algunas aplicaciones (Wang, L. and Zhang, F. 2010), el ruido eléctrico generado por otros componentes electrónicos cercanos así como la presencia de offset en las señales generado por la misma construcción interna del sensor.

Debido a diversos factores externos al sensor que afectan la exactitud de las mediciones de los giroscopios existen diversos trabajos orientados a analizar la exactitud de las señales brindadas por estos sensores, algunos trabajos que se pueden mencionar son: un modelo de lógica difusa para corregir el factor de escala de los datos del giroscopio (Li, J. and Du, M. 2010), un análisis de las señales brindadas por giroscopios de micro escala (Jianming Xiao, et. al. 2008), análisis del rendimiento de un giroscopio de micro escala (Liu Haipeng, et. al. 2009), entre otros. Estos trabajos se realizan aplicando el procesamiento digital de señales a las mediciones entregadas por el giroscopio, por ejemplo para eliminar información no deseada como las variaciones de alta frecuencia (XunSheng Ji, et. al. 2006).

El procesamiento digital de señales consiste en aplicar un conjunto de operaciones a una señal para eliminar la información no deseada (normalmente llamada ruido) y acondicionarla para posteriormente ser utilizada por un sistema digital o PC. Aplicar el procesamiento digital de señales a la información entregada por el giroscopio MEMS permite mejorar la exactitud de los datos obtenidos, eliminando variaciones en la señal generadas por vibraciones, ruido de alta frecuencia o información no deseada, la exactitud de la medición del giroscopio depende de la calidad de las señales de éste. La calidad de las señales se refiere al nivel de ruido que contiene ésta respecto a la información deseada de la medición.

En este trabajo se diseñó e implementó en FPGA un sistema de pre-procesamiento para acondicionar las señales de un giroscopio digital de tres ejes tipo MEMS. El sistema consiste en una estructura digital conformada por: un modulo de sobre-muestreo para adquirir un número suficiente de muestras de las señales para posteriormente aplicar filtros y evitar pérdida de información, un modulo de eliminación de offset que elimina los niveles de offset presente en cada uno de los ejes de manera individual y una unidad de filtrado conformada por un sistema de Diezmado y un filtro Kalman, donde los datos de los tres ejes del giroscopio son filtrados de manera independiente. Dicho sistema consume pocos recursos del FPGA, además en la unidad de filtrado se puede seleccionar si a la señal se le aplica un determinado filtro o una combinación de filtros.

El sistema desarrollado tiene las ventajas del cálculo automático del nivel de offset, y que la etapa de filtrado es configurable seleccionando entre un proceso de diezmado, promedio móvil o un filtrado Kalman donde las ganancias y valores de cada uno de ellos también es configurable, esto para que el sistema sea adaptable a diversos tipos de aplicaciones.

2. MARCO TEÓRICO

La parte central del sistema de pre-procesamiento consiste en eliminar el offset presente en las señales de cada uno de los tres ejes del sensor y posteriormente realizar un proceso de filtrado a dichas señales. El sistema utiliza el principio de sobre muestreo para adquirir un número de muestras suficientes para que las señales no se deformen al momento de aplicar los diversos algoritmos. Para la eliminación del nivel de offset primero se calcula el promedio P de un número n de muestras m (como se muestra en la ecuación 1 (Proakis, G. and Manolakis, G. 2007)), una vez obtenido este valor es restado a cada muestra que se lee del giroscopio con lo que se obtiene una señal libre de offset.

$$P = \frac{\sum_1^n (m_1 + m_2 + \dots + m_n)}{n} \quad (1)$$

En la etapa de filtrado se utilizan dos filtros, el primero es un Diezmado que promedia una pequeña sección de la señal definida por un número n de muestras M y se obtiene un nuevo valor X (ecuación 2 (Proakis, G. and Manolakis, G. 2007)).

$$X_d[n] = X[nM] \quad (2)$$

El segundo es un filtro Kalman que es un filtro predictivo que predice el error futuro de la señal, este filtro está definido por las siguientes ecuaciones. (Ecuación 2, 3, 4, 5 y 6 (Proakis, G. and Manolakis, G. 2007)).

$$\hat{X}_t^* = A\hat{X}_{t-1} \quad (2)$$

$$P_t^* = AP_{t-1}A^T + Q \quad (3)$$

$$K_t = P_t^* H^t (HP_t^* H^t + R)^{-1} \quad (4)$$

$$\hat{X}_t = \hat{X}_t^* + K_t (Z_t - H\hat{X}_t^*) \quad (5)$$

$$P_t = (I - K_t H)P_t^* \quad (6)$$

3. METODOLOGÍA

El diagrama de la figura 1 muestra de manera general las etapas del sistema de pre-procesamiento, el giroscopio se conecta y comunica con el sistema a través del protocolo SPI, el cual obtiene los datos de los ejes Roll, Pitch y Yaw de manera independiente los cuales entran al módulo del offset donde automáticamente se calculan los valores para cada uno de los ejes. A la salida del bloque de offset se tienen los datos con un nivel de referencia de cero gracias a la eliminación de la componente de offset a las señales, estos datos entran a la etapa de filtrado donde se procesan dependiendo de los filtros que se seleccionen. A la salida del sistema se obtiene una lectura más precisa de los tres ejes del sensor para ser manipulados posteriormente o simplemente guardarlos mediante un sistema de adquisición de datos.

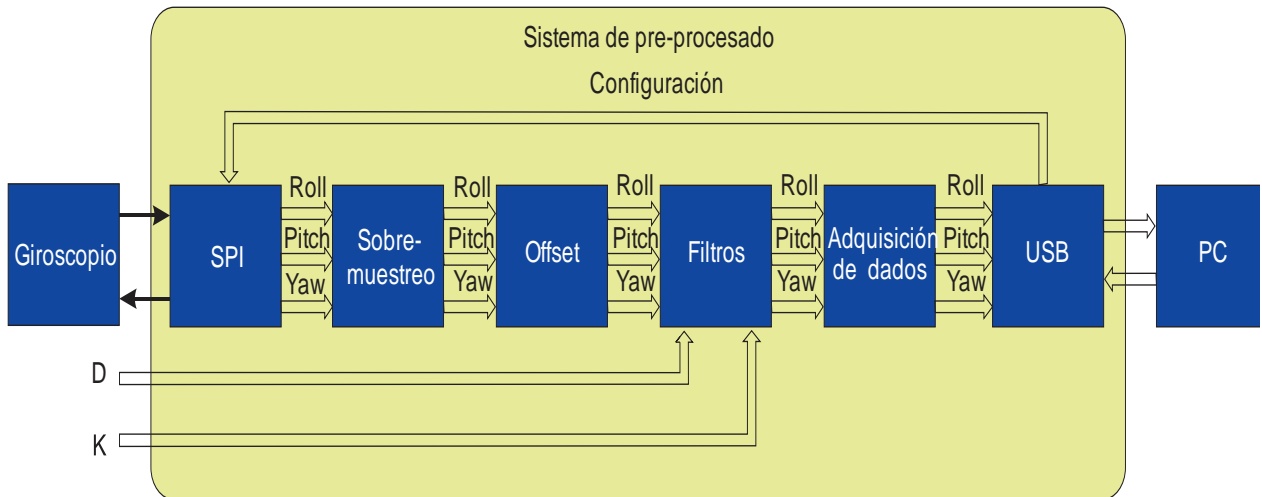


Figura 1. Diagrama general del sistema

2.1. Comunicación con sensor

El protocolo de comunicación SPI es un estándar para la transferencia de datos entre dispositivos electrónicos que consta de cuatro líneas para llevar a cabo la comunicación (Cs, SCL, SDI y SDO), para este bloque se diseñó una estructura que generara las señales necesarias respetando el diagrama de tiempos (figura 2) para lograr una exitosa comunicación con el giroscopio. A la salida de este bloque se obtienen los datos en 16 bits de los tres ejes del giroscopio.

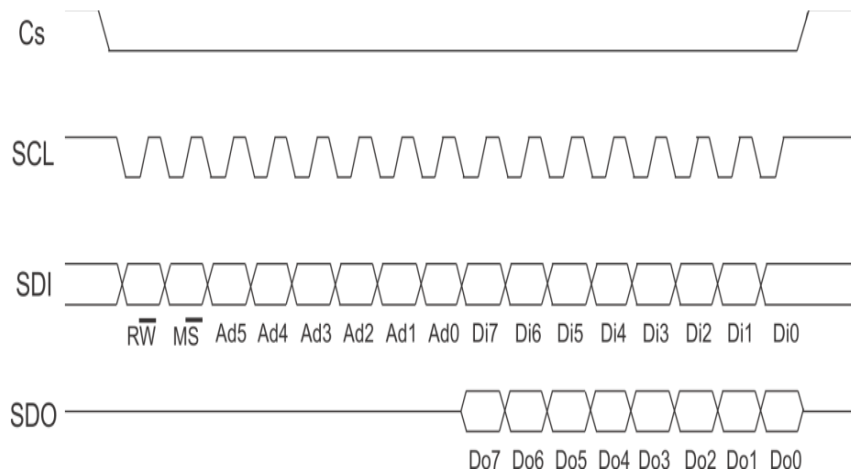


Figura 2. Diagrama de tiempos del protocolo SPI

Con el protocolo SPI se inicializa el sensor y se configuran sus características internas mediante una tabla de configuración guardada en una ROM dentro del sistema, también se registran los datos de los tres ejes del giroscopio cada vez que el sistema lo requiera. El diagrama a bloques del sistema de comunicación SPI se muestra en la figura 3.

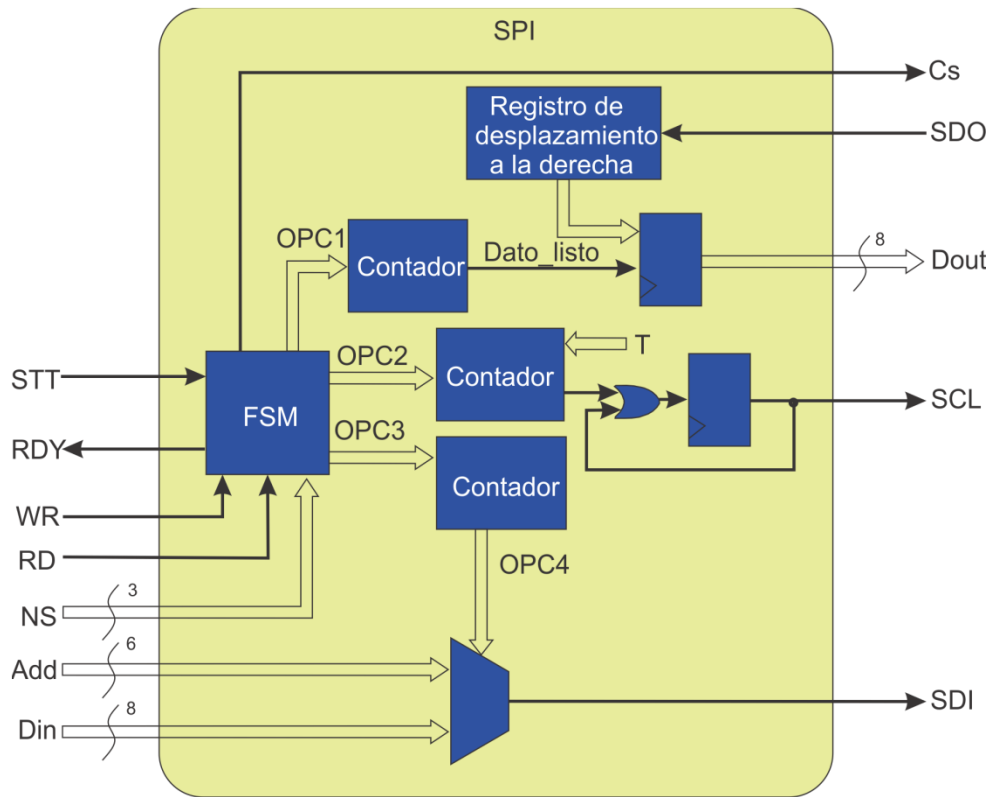
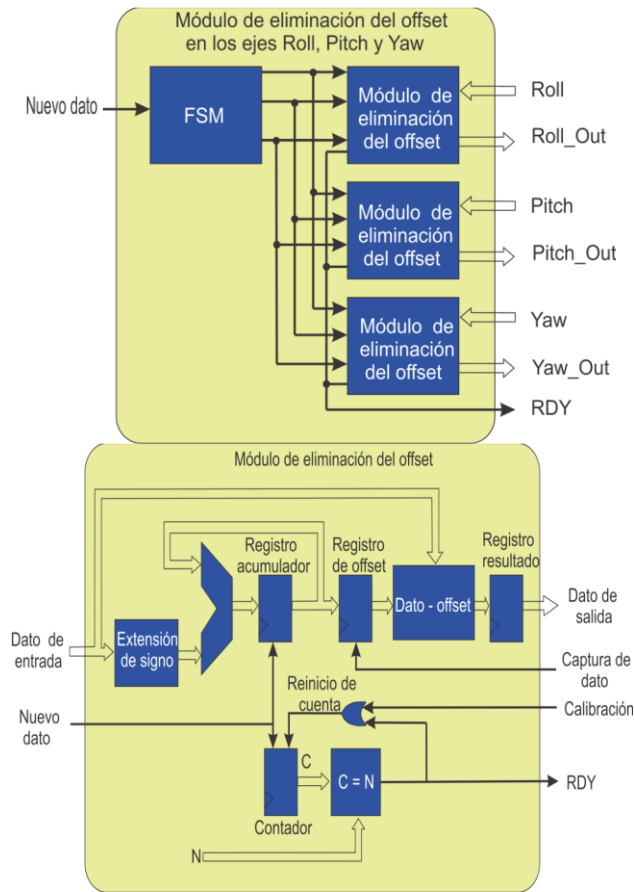


Figura 3. Sistema de comunicación PSI.

2.2. Calculo del offset

Debido a que el nivel de offset es diferente en cada uno de los ejes del sensor se requiere calcular cada uno por separado esto se realiza utilizando un módulo de eliminación del offset en cada uno de los tres ejes, éstos a su vez son controlados por una maquina de estados FSM como se ve en la figura 4,a).

La etapa de offset se muestra de manera más detallada en la figura 4.b) la cual calcula el valor del offset presente en la señal de cada uno de sus ejes, este proceso se realiza automáticamente al encender el sistema que consiste en tomar un numero de muestras preestablecido con los que se calculara el promedio de los datos, una vez calculado el valor de offset se guarda en un registro y a cada nueva muestra que entre al bloque se le resta este valor así se obtiene una señal sin offset. La estructura cuenta con un contador que incrementa con cada muestra que entra en el proceso de calcular el offset, la señal de Calibración conectada al contador permite realizar de nuevo el cálculo del offset en caso de ser necesario.



a)

b)

Figura 4. a) Módulo para la eliminación del offset en tres ejes, b) módulo de eliminación de offset.

2.3. Etapa de filtrado

Al igual que la etapa de offset el filtrado se realiza de manera independiente en cada uno de los ejes, esta estructura se llama banco de filtros la cual se observa en la figura 5,a) que a diferencia del bloque de offset esta estructura no requiere una FSM, en esta estructura se seleccionan el filtro o combinación de filtros que se requiera para una determinada aplicación.

La unidad de filtrado que se observa en la figura 5, b) muestra de manera individual los bloques que conforman el banco de filtros, la cual integra dos estructuras de filtrado como son el Diezmado y filtro Kalman. En la estructura Unidad de filtrado se encuentran los filtros y también una serie de multiplexores que interconectan los datos, señales de inicio y fin de los filtros, esto permite seleccionar que filtros usar, cuales no usar o incluso una combinación de ellos. Al igual que el bloque para calcular el offset se requiere una Unidad de filtrado para cada uno de los ejes del giroscopio.

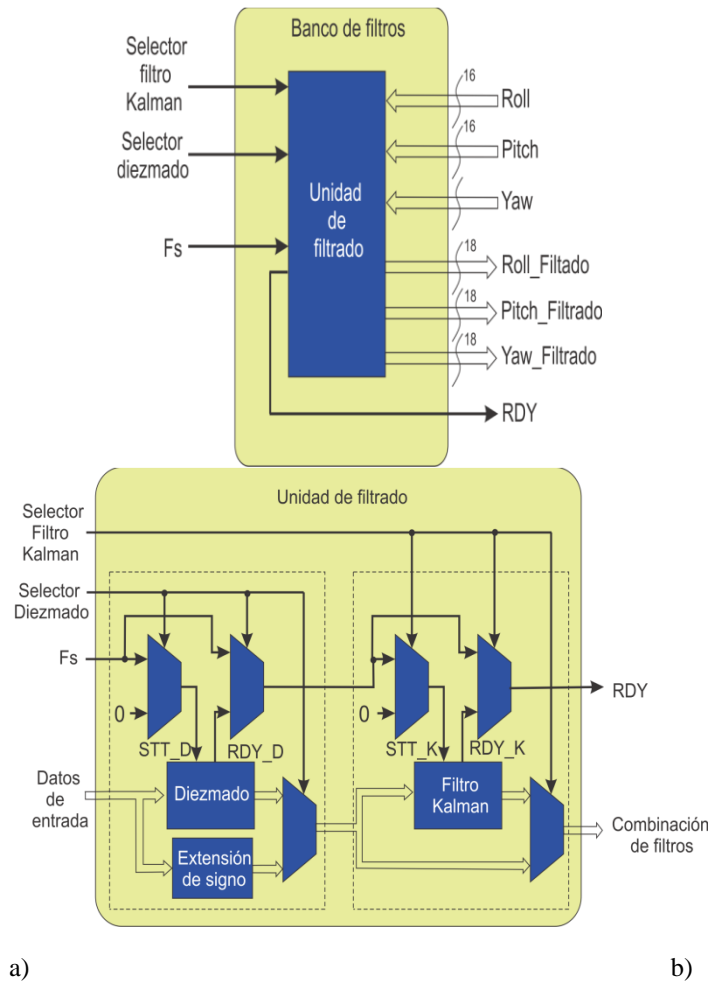


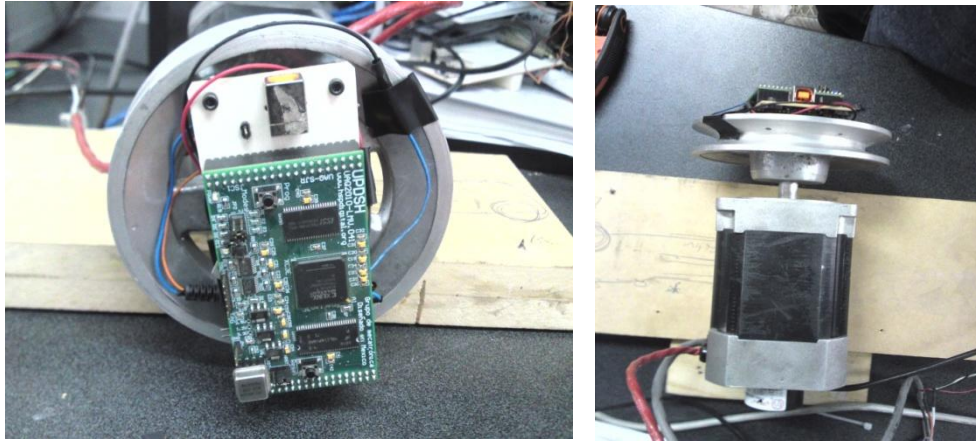
Figura 5. a) Banco de filtros, b) Unidad de filtrado.

La etapa de filtrado es la etapa final del sistema, la cual entrega los datos que posteriormente se procesaran por otro sistema o unidad.

4. EXPERIMENTACIÓN

El sensor utilizado en este trabajo es el L3G4200D de ST, este es un giroscopio que mide velocidades angulares en tres ejes independientes llamados Roll, Pitch y Yaw. El sensor tiene un voltaje de alimentación de 2.4V a 3.6V, rango de temperatura de trabajo de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$, escala de medición seleccionable de 250dsp, 500dsp o 2000dps, protocolo de comunicación SPI, datos de 16 bits, una FIFO y un número de interrupciones programables.

El giroscopio se colocó en un PCB (figura 6 a)) con los componentes necesarios para su funcionamiento como lo especifica su hoja de datos (L3G4200D Datasheet) ésta a su vez se encuentra conectada a un FPGA donde se encuentra implementado el sistema digital que consta de la eliminación del offset de las señales y su respectivo filtrado, para realizar pruebas de movimiento angular se construyo un sistema mecánico (figura 5 b)) que consta de un disco colocado en el eje de un motor de corriente directa, donde se montó el PCB para obtener la medición de un solo eje y facilitar su análisis.



a) b)
Figura 6. a) PCB Giroscopio y b) estructura mecánica.

La prueba consiste en iniciar a capturar las señales del giroscopio sin movimiento, posteriormente se incrementa la velocidad hasta llegar a una velocidad constante por un tiempo determinado y la prueba termina disminuyendo la velocidad hasta llegar a cero donde el sensor queda sin movimiento, la velocidad con respecto al tiempo en la prueba se asemeja a la forma de un trapecio el cual se comprueba con los resultados obtenidos en la siguiente sección.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con las pruebas realizadas se obtuvo como resultado tres graficas que muestran la variación de la velocidad angular en cada uno de los tres ejes del giroscopio, en ellas se observa una notable variación en velocidad en el eje Yaw y una variación menor en el eje Roll por su parte en la grafica del eje Pitch no se obtuvo una variación notable. El comportamiento de las graficas presenta un incremento en la velocidad angular después de los diez segundos llegando a un nivel y manteniéndose constante hasta después del segundo cuarenta donde se presenta un decremento en la velocidad hasta llegar a cero, donde el signo positivo y negativo de las señales representa la dirección del movimiento. En el eje Roll se presentó un nivel de offset de $0.4 \text{ }^\circ/\text{s}$, por su parte los ejes Pitch y Yaw presentaron un nivel muy pequeño de offset apenas notable, con el bloque digital de eliminación de offset que se diseñó e implemento se eliminó este problema y las graficas presentaron un nivel de referencia cercano a cero como se puede apreciar en la Figura 7.

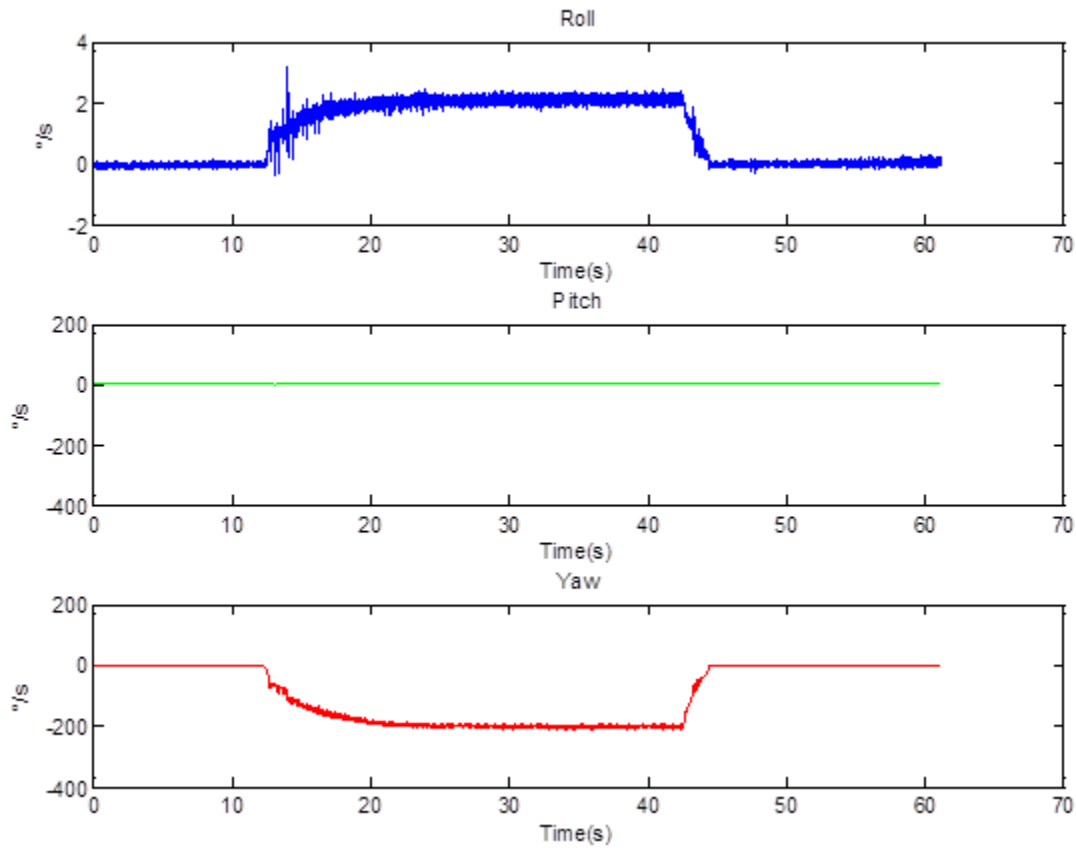


Figura 7. Señales del giroscopio sin offset.

Las graficas de velocidad presentan variaciones tienen un cierto nivel de ruido provocado por vibraciones de alta frecuencia en el sistema sobre el cual se está realizando la medición, es por esta razón que se ocupa un sistema de filtros digitales adecuado para tratar y acondicionar la señal para obtener una medición más exacta. El primer filtro utilizado para tratar la señal fue el Diezmado, como se puede apreciar en la figura 8 se eliminaron los picos más grandes de la señal y se atenuó el ruido presente en ella mas sin embargo no se elimino del todo el ruido, para poder eliminarlo completamente se requiere que el Diezmado tome un mayor número de muestras lo cual tendría como resultados no deseados la pérdida de información debido a la atenuación de la amplitud en toda la señal.

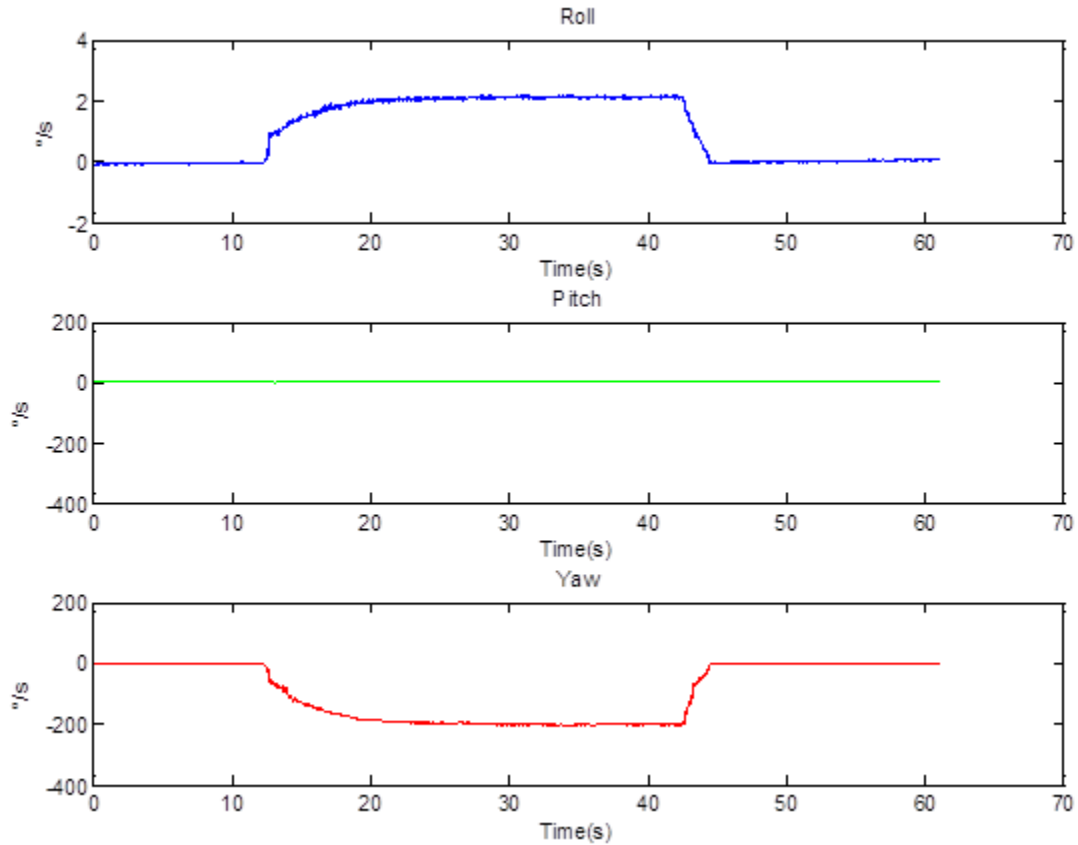


Figura 8. Diezmado de las señales.

Las señales también se trataron con un filtro Kalman obteniendo los resultados de la figura 9, como se puede observar el ruido presente también es atenuado de una mejor forma que los resultados obtenidos con el Diezmado, el filtro Kalman presenta una atenuación del ruido mayor en los cambios rápidos de la señal (generalmente ruido) y una atenuación pequeña en los cambios lentos de la señal, la diferencia entre los dos filtros es que el Diezmado promedia un cierto número de muestras modificando la señal si este es muy grande y el filtro Kalman predice el siguiente valor de la señal en base al error del valor anterior por lo cual se modifica muy poco la señal.

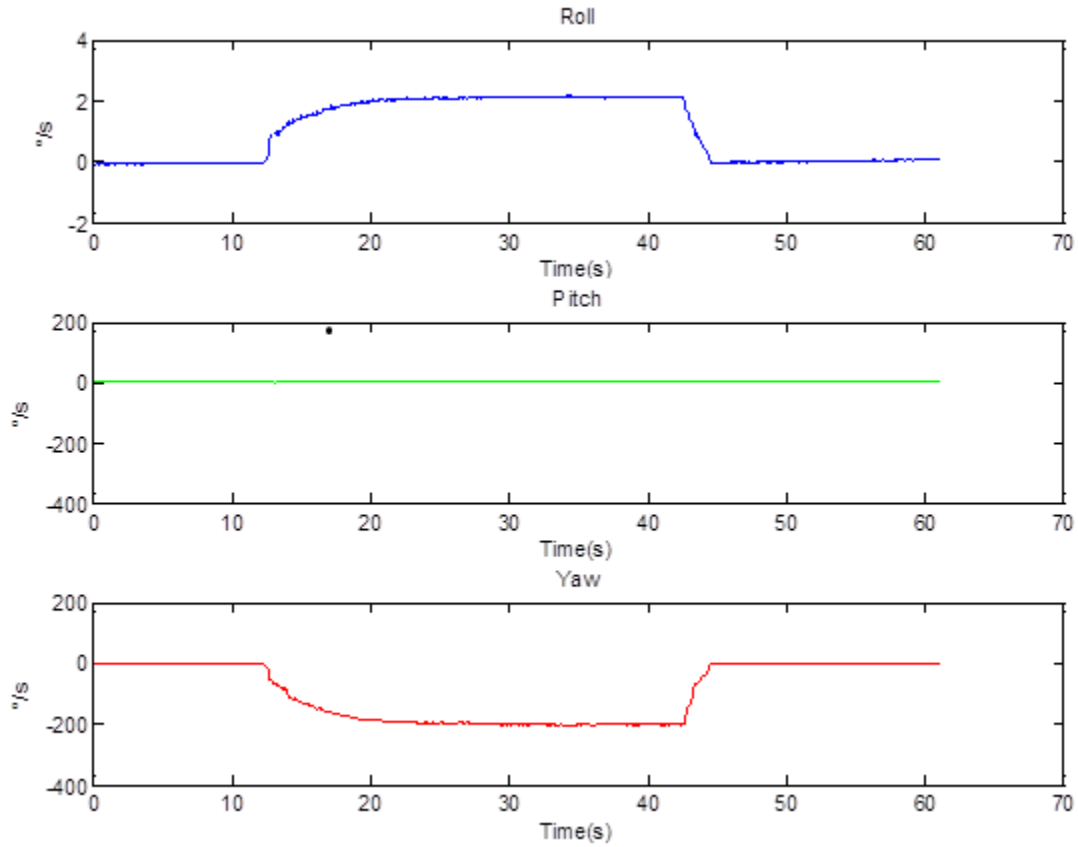


Figura 9. Filtro Kalman aplicado a las señales.

En la figura 10 se observa el resultado de aplicar la combinación del Diezmado con el filtro Kalman a las señales Roll, Pitch y Yaw, se observa que no hay una diferencia significativa respecto a aplicar cualquiera de los dos filtros por separado lo cual demuestra la efectividad de estos.

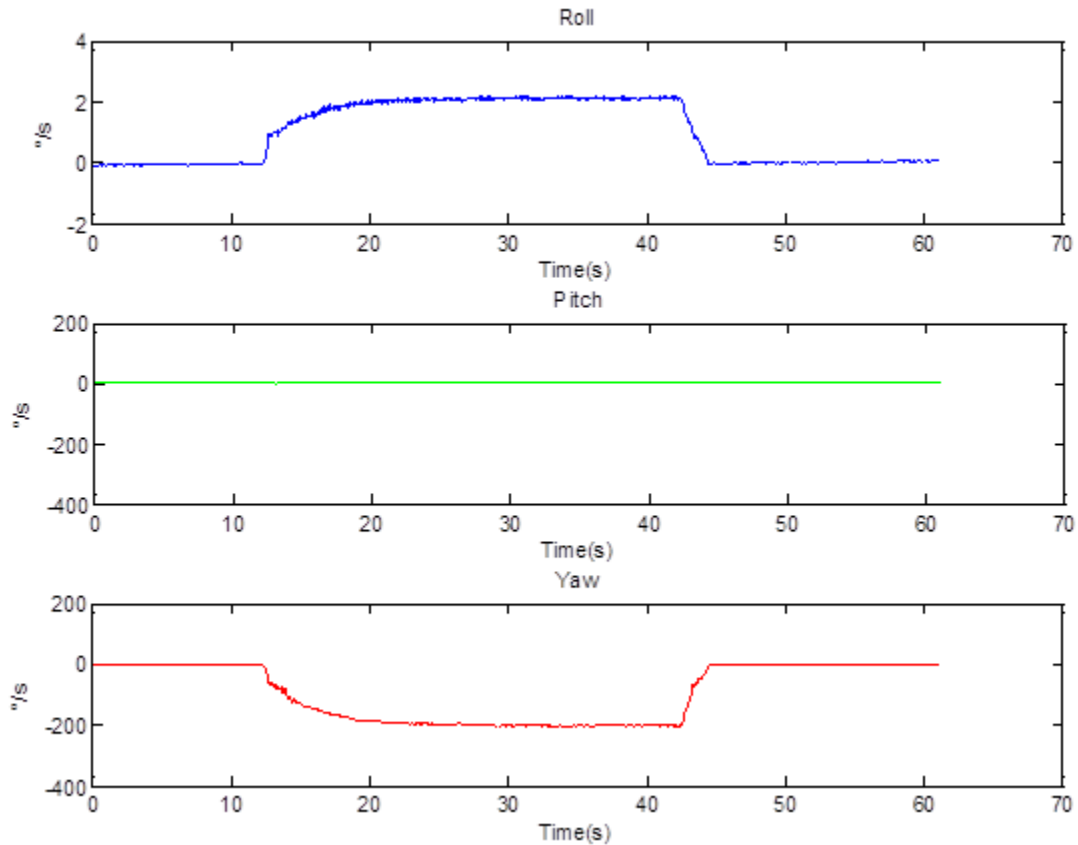


Figura 10. Combinación de Diezmado con filtro Kalman.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el giroscopio muestran el comportamiento de las señales en cada uno de sus tres ejes las cuales son afectadas por vibraciones mecánicas o fenómenos eléctricos externos por lo cual es indispensable realizar un pre-procesamiento de las señales antes de ser utilizadas en alguna aplicación, de esta manera se obtiene una medición más exacta y por lo tanto un error menor en las diversas aplicaciones donde se utilice el giroscopio. Se observó que el offset presente en los tres ejes no es necesariamente tiene la misma magnitud, puede ser mayor en uno de los ejes y en otros ser no significativo pero es necesario realizarlo para asegurar la exactitud en las mediciones. Los filtros son indispensables para eliminar el ruido y variaciones muy grandes como los picos presentes en las señales, se observó que con cualquiera de los dos filtros se obtienen buenos resultados pero se podría decir que el filtro Kalman es mejor debido a que elimina menos información en la señal aumentando la exactitud de la medición. Con este trabajo se consiguió una estructura digital en FPGA para acondicionar las señales y posteriormente utilizarlas en cualquier aplicación con la seguridad de que la señal es fiable.

7. REFERENCIAS

- Billur Barshan. 1994. "Orientation Estimate for mobile robots using gyroscopic information". IEEE, International conference on intelligent robots and systems.
- Wang, L. and Zhang, F. 2010. "Analyses on output signal of MEMS gyroscope applied to low speed rotating carrier". IEEE, International conference on information and automation.
- Li, J. and Du, M. 2010. "Fuzzy modeling and compensation of scale factor for MEMS gyroscope". IEEE, International conference on digital manufacturing & automation.

Jianming Xiao, et. al. 2008. "Research on the signal of silicon micro-machined gyroscope for rotating carrier". IEEE, Pacific-Asia workshop on computational intelligence and industrial application.

Liu Haipeng, et. al. 2009. "Performance analysis and measurement of micro-machined gyroscope". IEEE, International conference on electronic measurement & instrument.

XunSheng Ji, et. al. 2006. "Application of the digital signal processing in the MEMS gyroscopes de-drift". IEEE, International conference on nano/micro engineered and molecular systems.

Proakis, G. and Manolakis, G. 2007. "Tratamiento digital de señales" 4ta Edición, Pearson. ISBN 8483223473.

L3G4200D Datasheet