

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**RECONSTRUCCIÓN 3D:
MEDICIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO**

Tesis para optar por el título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Eduard Ernesto Aguirre Falcón

ASESOR: Roberto Lavarello Montero

**Lima – Perú
2015**

RESUMEN

El proceso de reconstrucción de volúmenes 3D a partir de un ecógrafo 2D con posicionamiento y orientación del transductor puede ser considerada en tres etapas: examinación, reconstrucción y visualización. En el primer paso, un sensor de orientación y uno de posición es anexado al transductor para medir su inclinación y traslación cada vez que toma una imagen bidimensional.

La presente tesis tiene como objetivo el diseñar e implementar un sistema de medición de orientación tridimensional de un transductor ultrasónico. El sistema cuenta con un sensor microelectromecánico que registra las rotaciones (velocidades angulares) en los tres ejes, los cuales son leídos por el microcontrolador ATMEGA8 por medio de la comunicación SPI y transmitidos a un computador a través del protocolo USB.

Se implementará un filtro para eliminar el ruido y un integrador en Matlab para obtener la posición angular con una mayor exactitud. Finalmente, se mostrará el método de calibración del sistema y los resultados de los ensayos realizados, indicando la exactitud del mismo.

ÍNDICE

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. CAPÍTULO 1: ECOGRAFÍA 3D | 2 |
| 1.1. Diagnóstico por Ultrasonido | 2 |
| 1.2. Reconstrucción Ecográfica Tridimensional | 2 |
| 1.3. Declaración de la Problemática | 3 |
| 1.4. Objetivos | 3 |
| 1.4.1. Objetivo General | 3 |
| 1.4.2. Objetivos Específicos | 3 |
| 2. CAPÍTULO 2: MEDICIÓN DE LA ORIENTACIÓN TRIDIMENSIONAL | 4 |
| 2.1. Elección de la Tecnología para la Medición de Orientación | 4 |
| 2.1.1. Tecnologías Existentes | 4 |
| 2.1.2. Comparación de Tecnologías para la Medición de la Orientación | 7 |
| 2.1.3. Características de los Sensores MEMS | 10 |
| 2.2. Filtrado de los Sensores MEMS | 13 |
| 3. CAPÍTULO 3: OBTENCIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO USANDO MEMS | 14 |
| 3.1. Consideraciones de Diseño | 14 |
| 3.2. Diagrama de Bloques | 14 |
| 3.3. Sensor de Orientación | 15 |
| 3.3.1. Requerimientos | 15 |
| 3.3.2. Empresas Fabricantes | 16 |
| 3.3.3. Elección del Sensor | 18 |
| 3.3.4. Configuración del Sensor | 19 |
| 3.4. Microcontrolador para la toma de datos | 20 |
| 3.4.1. Requerimientos | 20 |
| 3.4.2. Elección del Microcontrolador | 20 |
| 3.5. Diseño del Hardware para la Obtención de la Orientación | 22 |
| 3.5.1. Circuito de Alimentación de Energía | 22 |
| 3.5.2. Circuito de Conversión de Protocolos | 23 |
| 3.5.3. Circuito del Microcontrolador | 24 |
| 3.5.4. Circuito de Sincronización | 25 |
| 3.6. Integración de los circuitos | 26 |
| 3.7. Software de control | 28 |

| | | |
|--------|--------------------------------------------------------------|----|
| 3.7.1. | Requerimientos | 28 |
| 3.7.2. | Elección del Software | 28 |
| 3.8. | Diseño del Software para la Medición de la Orientación | 28 |
| 3.8.1. | Registros del Sensor MPU-6000..... | 28 |
| 3.8.2. | Programación del Microcontrolador | 30 |
| 3.8.3. | Programación de la Interfaz del Computador..... | 31 |
| 3.8.4. | Programación del Procesamiento de datos | 34 |
| 4. | CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y PRUEBAS FINALES..... | 35 |
| 4.1. | Simulaciones..... | 35 |
| 4.1.1. | Comunicación SPI | 35 |
| 4.2. | Reducción del Ruido | 36 |
| 4.2.1. | Error de Arrastre..... | 36 |
| 4.2.2. | Filtro Digital Externo | 37 |
| 4.3. | Prueba de Exactitud..... | 38 |
| 4.3.1. | Rotación sobre el eje X (Roll) | 41 |
| 4.3.2. | Rotación sobre el eje Y (Pitch) | 42 |
| 4.3.3. | Rotación sobre el eje Z (Yaw)..... | 43 |
| 4.4. | Exactitud en el tiempo..... | 44 |
| 4.5. | Análisis de Resultados..... | 46 |
| 5. | CONCLUSIONES | 47 |
| 6. | RECOMENDACIONES | 48 |
| 7. | BIBLIOGRAFÍA | 49 |

INTRODUCCIÓN

El ultrasonido es una modalidad económica y ampliamente usada para el diagnóstico de ciertas enfermedades. En las últimas tres décadas se ha beneficiado de los grandes avances en tecnología y se ha vuelto una modalidad de diagnóstico indispensable debido a su carácter no invasivo y su adaptabilidad [1].

El ultrasonido 3D (ecografía 3D) a mano alzada es cada vez más aplicado en el área de la salud para diagnósticos y cirugías [2]. Este tipo de ecografía, conjuntamente con la ecografía 4d permite adquirir los datos de un volumen en lugar de secciones bidimensionales [3]. Por otra parte, el costo económico de adquirir un ecógrafo con funcionalidades tridimensionales representa un obstáculo.



CAPÍTULO 1: ECOGRAFÍA 3D

1.1. Diagnóstico por Ultrasonido

En las últimas dos décadas, investigadores y compañías han obtenido mejores diagnósticos por ultrasonido gracias al desarrollo del ultrasonido tridimensional. La mayor razón para el incremento del uso de ultrasonido 3D está relacionada a las limitaciones de las vistas 2D de los cuerpos tridimensionales. Esto ocurre porque:

- Las imágenes bidimensionales de cuerpos tridimensionales obligan a que el evaluador tenga que integrar muchas imágenes en su mente.
- La ecografía 2D representa una capa delgada de algún ángulo arbitrario en el cuerpo. Es difícil localizar la imagen bidimensional y usarla después para estudios consiguientes.

El ultrasonido 3D (ecografía 3D) a mano alzada es cada vez más aplicado en el área de la salud para diagnósticos y cirugías [2]. Este tipo de ecografía, conjuntamente con la ecografía 4D permite adquirir los datos de un volumen en lugar de secciones bidimensionales [3]. Por otra parte, el costo económico de adquirir un ecógrafo con funcionalidades tridimensionales representa un obstáculo.

1.2. Reconstrucción Ecográfica Tridimensional

Un método para la reconstrucción de volúmenes tridimensionales en ecografías es el de ultrasonido a mano alzada con posicionamiento y orientación del transductor [4]. Dicho método se basa en enviar las imágenes bidimensionales de un ecógrafo 2D a un computador, cada imagen etiquetada con las mediciones de ubicación y orientación del transductor ultrasónico. En el computador se reconstruye un volumen tridimensional a partir del conjunto de imágenes planas para luego mostrarlo en la pantalla.

La medición de la posición y orientación del transductor ultrasónico se realiza anexando de manera asegurada (de ser posible permanente) un dispositivo electrónico a dicho transductor. Los sensores de orientación que existen actualmente en el mercado son variados por lo que se tiene que considerar sus características como resolución, velocidad, desempeño y costo [5].

Dado que los diagnósticos en medicina tienen que ser lo más exactos posibles, la elección de sensores óptimos en cuanto a su desempeño es un paso crítico en este proceso.

1.3. Declaración de la Problemática

Los sistemas de medición de orientación tridimensional siguen presentando precios elevados, sobre todo si se requiere implementar tal sistema para una reconstrucción de volúmenes tridimensionales de bajo costo. Por otro lado, las tecnologías existentes para la medición de orientación mejoran rápidamente sus características y aparecen nuevas tecnologías por lo que análisis actuales de ellas son necesarios para definir la que se adecúe más eficientemente a un sistema de reconstrucción 3D.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Medir la inclinación de un transductor ultrasónico perteneciente a un ecógrafo 2D y enviar de forma sincronizada esos datos a un computador.

1.4.2. Objetivos Específicos

Para cumplir con el objetivo principal, tenemos que seguir las siguientes metas puntuales:

1. Elegir el sensor adecuado para la presente investigación y definir sus parámetros de configuración de registros internos.
2. Implementar un circuito electrónico para el microcontrolador, comunicación con el sensor y comunicación con el computador.
3. Elegir y realizar la programación de un microcontrolador para la adquisición de datos.
4. Realizar un programa para la adquisición de datos, procesamiento y almacenamiento en una base de datos para el computador personal.
5. Realizar el procesamiento de los datos para obtener estimaciones de posición angular a partir de mediciones ruidosas de velocidad angular.
6. Sincronizar el envío de datos de orientación e imágenes del escáner 2D Sonix Touch.
7. Calibrar el sistema de medición de orientación.

CAPÍTULO 2:

MEDICIÓN DE LA ORIENTACIÓN TRIDIMENSIONAL

2.1. Elección de la Tecnología para la Medición de Orientación

Se realizará un análisis de tecnologías con el objetivo de comparar y decidir cuál es la más apropiada para la medición de la orientación de un transductor ultrasónico.

2.1.1. Tecnologías Existentes

Dado que el ultrasonido a mano alzada ya ha sido implementado de manera exitosa en sistemas de laboratorio y comerciales, una revisión de literatura revela diferentes estrategias para la medición de la orientación del transductor de ultrasonido. Entre las tecnologías convencionalmente usadas encontramos las siguientes: mecánica, óptica, magnética, acústica y microelectromecánica [6]. A continuación se realizará una descripción de las tecnologías mencionadas.

Tecnología Mecánica

La medición de orientación se determina mediante el movimiento de articulaciones y la información cinemática del dispositivo [4]. En el caso de equipos de ultrasonido, consiste en el transductor anexo a un brazo mecánico con articulaciones (Figura 1).

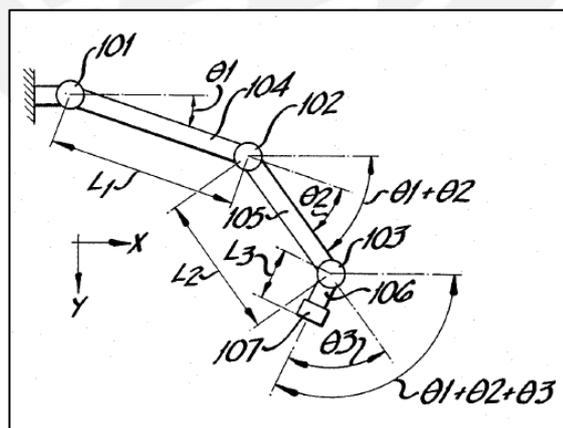


Figura 1. Dibujo de la patente de un brazo articulado para ultrasonido [7].

Las rotaciones de este brazo son procesadas en el scanner [6]. Debido a que se aplicará la medición de orientación a la ecografía a mano alzada, el uso de esta tecnología queda descartado.

Tecnología Óptica

La forma de localización espacial (posición y orientación) que usa se basa en la triangulación. El sistema de ubicación óptico requiere de una cámara, un dispositivo de rastreo y un dispositivo de referencia, éste último es el eje de coordenadas (Figura 2). Generalmente, la señal medida por la cámara es luz infrarroja y los dispositivos de rastreo y referencia son LEDs infrarrojos [2] [8] [9].

Pese a la gran exactitud que brinda, sus principales desventajas son la poca portabilidad y la dificultad de uso ya que si se obstruye el paso de luz entre los tres dispositivos que conforman este sistema, no es posible tomar mediciones [6].

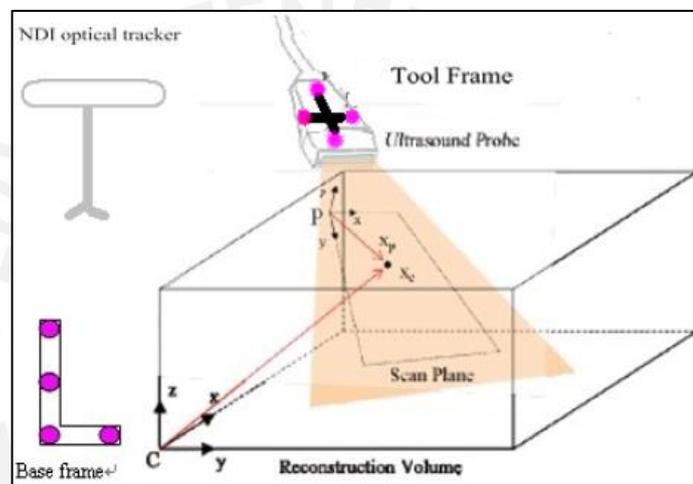


Figura 2. Rastreador Óptico NDI [2].

Tecnología Acústica

Consiste en enviar una onda de sonido y medir la distancia en base al tiempo que demora en llegar a un receptor. Tanto el transductor como el receptor son transductores electroacústicos, realizan el cambio entre electricidad y sonido. En la Figura 3 se muestra el sensor de ultrasonido comúnmente encontrado en el mercado, que consta de un emisor y un receptor ubicados en una misma tarjeta.

Para hacer posible la medición de la orientación, se necesita de cuatro receptores unidos al transductor ultrasónico en forma de cruz, de forma similar a la tecnología óptica de la Figura 2. Su exactitud se ve afectada por los cambios en las condiciones medioambientales por lo que en aplicaciones como [10] se hace referencia al uso de esta tecnología en un medio específico e idealmente invariante, como es el agua para obtener mejores resultados.



Figura 3. Emisor y receptor de pulsos ultrasónicos [11].

Tecnología Magnética

Consiste en asegurar un sensor de campo magnético (magnetómetro) al objeto del que se quiere saber su orientación y, externamente, instalar un dipolo magnético (imán) que sirva como eje de coordenadas [12] (Figura 4). El campo magnético medido es transformado en corriente eléctrica mediante bobinas y así se determina la posición y orientación del magnetómetro con respecto al imán [5].

Estos sensores son baratos, casi tan precisos como los sensores ópticos, y el espacio entre el sensor y el imán puede ser obstruido por materiales no magnéticos sin afectar la medición [6]. Sin embargo, tiene las grandes desventajas de un rango pequeño y limitado de medición, y es severamente afectado por metales ferromagnéticos cercanos [6]. El rango limitado de medición entre el sensor y el dipolo se debe a la disminución del campo magnético por distancia.

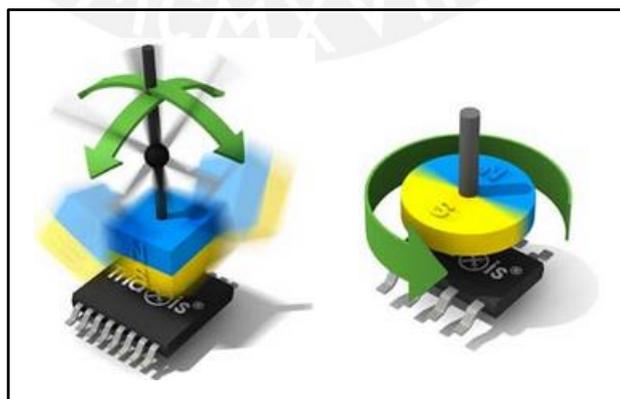


Figura 4. Sensor Magnético [13].

Sistemas Microelectromecánicos

También llamados MEMS por sus siglas en inglés. Dentro de esta tecnología encontramos a los acelerómetros y giroscopios [14] (Figura 5). El acelerómetro es un sensor de aceleración y su unidad básica es una gravedad (g) mientras que el giroscopio es un dispositivo que mide velocidad angular en uno o varios ejes.

Los giroscopios MEMS se pueden agrupar según su tecnología interna en: ópticos, vibratorios y piezoeléctricos [15]. Su gran ventaja a diferencia de las anteriores tecnologías es su portabilidad ya que el tamaño del circuito integrado que los contiene está en el orden de los milímetros. Se realizan investigaciones para la aplicación de MEMS en ecografías 3D a mano alzada por su facilidad de implementación y desempeño [6] [15].

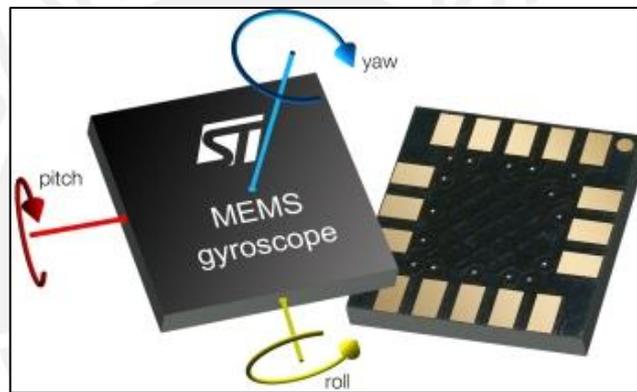


Figura 5. Giroscopio MEMS [16].

2.1.2. Comparación de Tecnologías para la Medición de la Orientación

En esta sección se compararán las cuatro tecnologías de medición de orientación antes mencionadas. Primero, se realizará una comparación en cuanto a las ventajas y desventajas intrínsecas de cada tecnología. Luego, se realizará una comparación de las características típicas de los sensores dentro de las cuatro tecnologías.

Tabla 1. Ventajas y Desventajas de los Sensores de Orientación.

| | Ventajas | Desventajas |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensores Ópticos | <ul style="list-style-type: none"> • Su tiempo de respuesta está en el orden de los microsegundos. • La luz infrarroja no afecta la toma de datos del transductor ultrasónico. • Tiene una alta exactitud. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere de un sistema externo, lo que afecta la portabilidad. • Presenta error debido a la corriente propia de los sensores fotosensibles (Corriente de Oscuridad) [17]. • Si se obstruye la luz, se pierde la medición [18]. |
| Sensores Acústicos | <ul style="list-style-type: none"> • Tienen un tamaño pequeño lo que facilita su instalación en el transductor. | <ul style="list-style-type: none"> • Presenta error en la medición en presencia de cambios físicos del aire como presión y velocidad. • La frecuencia de sonido que use puede llegar a afectar a la medición del transductor ultrasónico. • Se pierde la comunicación si se obstaculiza el medio entre el emisor y receptor. |
| Sensores Magnéticos | <ul style="list-style-type: none"> • Son muy usados en compases digitales debido a su exactitud. • No es sensible al ultrasonido del ecógrafo 2D. • Tienen comunicación digital y su pequeño tamaño lo hace portable. | <ul style="list-style-type: none"> • Necesita de un algoritmo complicado para la obtención de datos [19]. • Es afectado por metales y materiales ferromagnéticos próximos. • El dipolo usado como referencia necesita estar cerca limitando su uso. • Manipular un imán de alta potencia es delicado. |

| | | |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensores Microelectro-mecánicos (MEMS) | <ul style="list-style-type: none"> • No necesitan de una referencia externa, lo que los hace portables. • Son baratos y configurables para los parámetros requeridos. • No necesita algoritmos porque se obtienen los datos seriales directamente de su salida. | <ul style="list-style-type: none"> • Suele requerir de un sensor adicional para mejorar la exactitud [18]. • Arrastran error en largos períodos por el movimiento rotacional inicial [18]. |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Fuente: Elaboración propia.

Tanto los MEMS como los sensores magnéticos no son afectados por las condiciones medioambientales pero éste último tiene el problema de verse afectado por materiales ferromagnéticos. Además, en base al tiempo que demora en obtener datos de orientación, la tecnología magnética es la que demora más.

En cuanto a la portabilidad, los MEMS son los únicos sensores que no requieren de dispositivos externos que nos sirvan como referencia de coordenadas. De acuerdo a la comparación (Tabla 1) y los detalles mencionados en estos párrafos se determina que los sensores microelectromecánicos son los más apropiados para ser usados en la determinación de la orientación del transductor.

La siguiente comparación es en cuanto a características. Las elegidas para comparar son:

- Exactitud: Diferencia entre el valor correcto y el valor medido.
- Resolución: Cambio mínimo que puede ser detectado.
- Ancho de Banda: Cantidad de información que se puede procesar por unidad de tiempo.
- Interferencia: Fuentes de interferencia que vulneran la confiabilidad de la lectura de cada tecnología.
- Contacto: Indica si los sensores dentro de cada tecnología necesitan tener, contacto a una cierta distancia (Distante) o no necesitan contacto con ninguna referencia (Sin contacto).

Tabla 2. Comparación de características [5].

| | Óptico | Acústico | Magnético | MEMS |
|-----------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|---------------|
| Exactitud | 0.1 – 0.5 ° | < 1 ° | < 5 ° | - |
| Resolución | < 0.01 ° | < 0.1 ° | - | < 0.01° |
| Ancho de banda | 100 – 2500 Hz | 500 – 1000 Hz | 20 – 100Hz | 250 – 2000 Hz |
| Interferencia | Calor, obstrucción | Temperatura, humedad, obstrucción | Objetos ferromagnéticos, campos magnéticos | Gravedad |
| Contacto | Distante | Distante | Distante | Sin contacto |

Fuente: Elaboración propia.

De la comparación de características (Tabla 2), se destaca que los sensores ópticos y los MEMS tienen la mejor resolución y el mejor ancho de banda, con la diferencia que los sensores MEMS no necesitan un dispositivo externo de referencia y la única interferencia que lo afecta es el movimiento inicial por la fuerza de gravedad.

Para la medición de rotación, la fuerza de gravedad no representa ningún problema porque solo afecta a los acelerómetros y no a los giroscopios.

Se concluye así que para efectos del presente trabajo, el conjunto de características de los sensores MEMS, como la resolución, portabilidad, cantidad de información que puede procesar y baja vulnerabilidad frente a interferencias, los convierten en la tecnología de sensores más apropiada para ser usada en la medición de la orientación del transductor ultrasónico.

2.1.3. Características de los Sensores MEMS

El giroscopio MEMS es diseñado para resonar en su modo fundamental paralelo al plano del sustrato (Figura 6) [20].

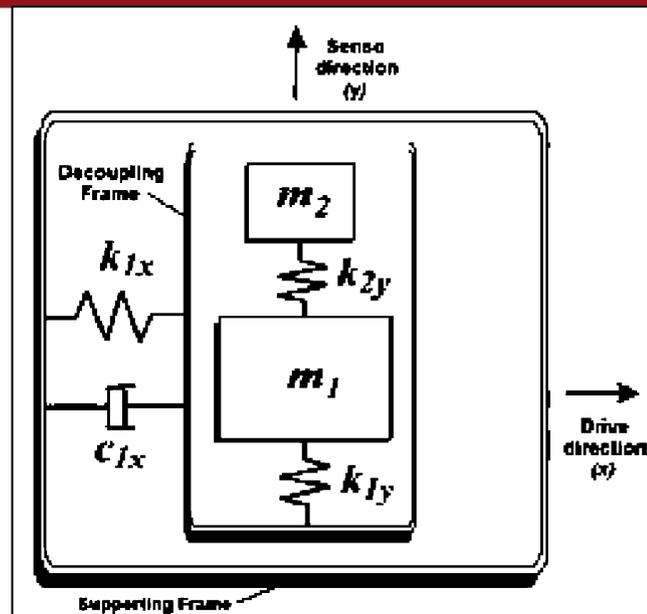


Figura 6. Modelamiento de un sensor basado en giroscopio [20].

Un sensor de rotación MEMS con tres grados de libertad posee tres giroscopios independientes, uno para cada eje. Estos giroscopios pueden ser de tipo diapasón, plato piezoeléctrico, anillo láser y vibrador [21].

La rotación angular medida por el giroscopio se puede modelar con la siguiente ecuación [22]:

$$\omega_{\text{giroscopio}} = K * \omega_{\text{rotación}} * \epsilon + \omega_{\text{arrastré}} + \omega_{\text{ruido}}$$

Donde:

- $\omega_{\text{rotación}}$ es la velocidad angular real,
- K es el factor multiplicativo definido por el fabricante,
- ϵ es el factor de escalamiento luego de la calibración,
- $\omega_{\text{arrastré}}$ es la velocidad angular medida por el sensor cuando está quieto y
- ω_{ruido} es el ruido que afecta al giroscopio.

La señal de salida del giroscopio está afectada por varios tipos de ruido [23]:

- Movimiento angular al azar: Es un ruido de alta frecuencia y puede ser observado en un corto tiempo como la variación de la señal de salida. Luego de realizar la integración, causa un error al azar en la posición angular.

- Inestabilidad del arrastre: Tiene un impacto en la estabilidad a largo plazo. Es una lenta fluctuación de la salida así que aparece como ruido de baja frecuencia.
- Velocidad angular al azar: Los cambios a largo plazo de la velocidad angular de arrastre son distribuidas al azar. Aunque la velocidad de arrastre de un sensor individual no puede ser predicha, el modelamiento de este tipo de ruido introduce la oportunidad para recalibrarlo en aplicaciones críticas que requieran un tiempo de vida extendida.
- Rampa de la velocidad de arrastre: Es un tipo de error con característica determinística. Es un cambio monótono de la salida durante un largo período de tiempo.

Para el caso del análisis por ultrasonido, la duración de la medición de orientación está en el orden de los segundos por lo que los errores que recién son apreciables a largo plazo no se considerarán en la implementación de filtros.

El error de arrastre agrega un nivel erróneo en la respuesta de salida del sensor que hace parecer que el dispositivo está rotando cuando en realidad está quieto. El resultado de la integración de este error es una acumulación constante de posición angular que es igual al producto del error de arrastre por el período de muestreo [22].

$$\Phi_{\text{arrastre}} = \int_0^{t_1} \omega_{\text{arrastre}} * dt$$

$$\Phi_{\text{arrastre}} = \omega_{\text{arrastre}} * t_1$$

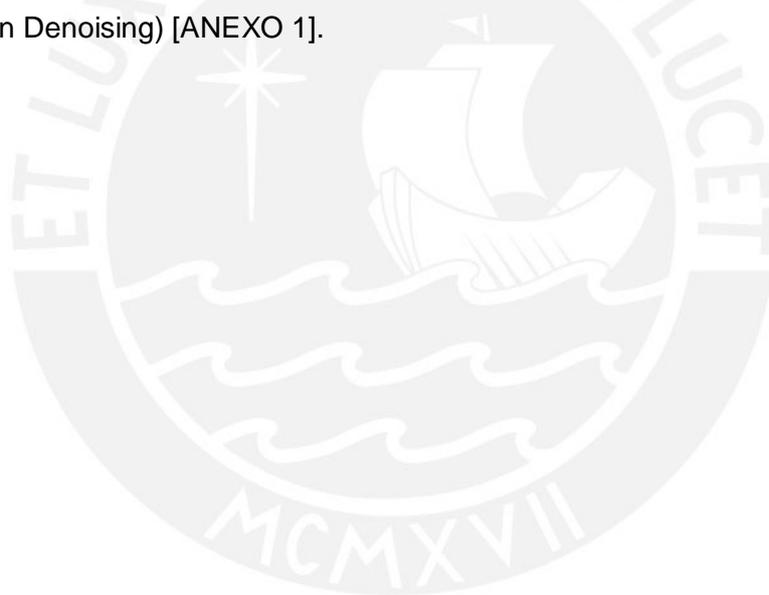
El error restante es el movimiento angular al azar, este error produce la lectura de un movimiento angular diferente al realizado. Para solucionar este error se necesita la aplicación de filtros en la lectura de datos.

2.2. Filtrado de los Sensores MEMS

Las operaciones de filtrar y suavizar tienen por objetivo reducir el ruido y los efectos espurios que se presentan en la señal de salida de los sensores a consecuencia de los procesos de medición, digitalización y transmisión [24].

Hay distintas maneras de clasificar a los filtros, pueden basarse en su linealidad, variación en el tiempo, respuesta al impulso, etc. La señal de salida del sensor MEMS, la cual será filtrada, son valores de velocidad angular a una frecuencia definida (señal discreta), por lo que se requiere un filtro digital.

Dentro de la variedad de los filtros que se aplican al tipo de señal mencionado anteriormente podemos encontrar los Filtros FIR con fase lineal, Filtros IIR (como los filtros de Butterworth, Chebyshev y Elíptico), filtros espaciales (como los filtros de media, gaussiano y de mediana) y procesos de eliminación de ruido (como Total Variation Denoising) [ANEXO 1].



CAPÍTULO 3: OBTENCIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO USANDO MEMS

3.1. Consideraciones de Diseño

Los sensores MEMS se basan en un giroscopio interno para medir velocidades angulares (rotación) de los tres ejes, por lo que requiere realizar una integración para calcular la posición angular (orientación). Dicha integración se realizará una vez que se tengan todos los datos de rotación ya que no se requiere de un sistema de medición a tiempo real.

El circuito electrónico de la tarjeta de adquisición de datos no deberá tener una base mayor a la superficie del transductor del Sonix Touch, la cual es de 5x3.5cm² para poder ser montado adecuadamente, por lo que los componentes deben ser de empaque superficial y del menor tamaño posible. Se buscará usar el tipo de comunicación más rápido para el envío de velocidades angulares ya que a mayor cantidad de datos de rotación se obtendrá una mejor aproximación de la posición angular.

3.2. Diagrama de Bloques

El circuito de alimentación proveerá el voltaje de funcionamiento para los bloques del sistema de adquisición de orientación no pertenecientes a la computadora personal (Figura 7). Se almacenarán los datos de rotación en tiempo real en la base de datos; luego de que se haya terminado de realizar la medición, los datos velocidad angular se filtrarán, integrarán y almacenarán en la base de datos de posición angular.

La señal del ecógrafo será recibido por el microcontrolador para sincronizar el sistema de adquisición de datos con el Sonix Touch.

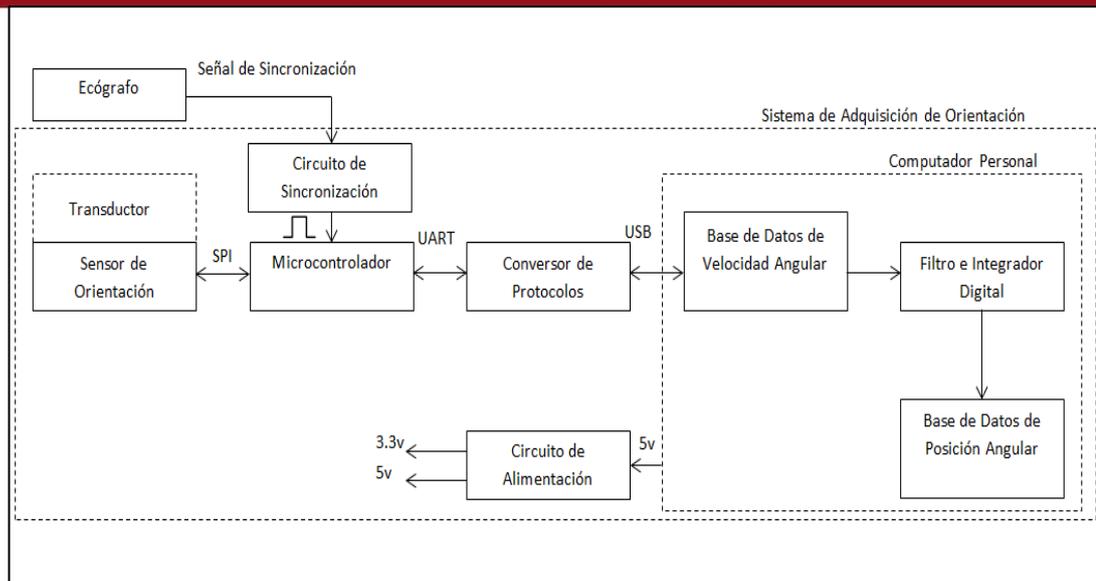


Figura 7. Diagrama de Bloques del Sistema de Medición de Orientación.

3.3. Sensor de Orientación

Se realizará la presentación de las empresas fabricantes de MEMS así como los sensores que midan rotación y desplazamiento de 3 ejes, es decir seis grados de libertad. Se tomará en cuenta que el dispositivo también contenga acelerómetros por dos motivos. El primer motivo es que el acelerómetro puede ser usado para calcular la posición del transductor, un dato fundamental para realizar la reconstrucción de volúmenes tridimensionales. Y en segundo lugar, la lectura de datos del acelerómetro puede ser usada para corregir los errores de lectura del giroscopio [25]. Por otro lado la diferencia de precio en comparación con uno sin esta funcionalidad no es significativa.

3.3.1. Requerimientos

De acuerdo al uso de sensores en diversas referencias, se buscarán sensores con los siguientes requisitos [26]:

- Grados de libertad: 6
- Exactitud recomendable: 0.5°
- Resolución recomendable: 0.1°

3.3.2. Empresas Fabricantes

Para empezar a analizar las empresas fabricantes de MEMS, tenemos que descartar algunas por superar las limitaciones de adquisición de este proyecto. Motivos como precio, área de aplicación o mínima cantidad de adquisición de los sensores.

La empresa Analog Devices produce dispositivos de rastreo inercial pero están dedicados al sector industrial y militar, por lo que venden sus sensores en cantidades de cien unidades. También tienen un costo elevado (mayor a 500 dólares) por su alto desempeño en condiciones críticas [27]. Un caso similar se presenta con la empresa EPSON, que tiene una línea de productos de MEMS específicamente orientada al mercado industrial [28].

Por otro lado, la empresa Xsens provee sistemas completos para medición de movimiento tridimensional, uno de sus sensores comerciales es el Mti con un precio aproximado de 2000 dólares [29].

Las otras dos empresas fabricantes de productos MEMS son STMicroelectronics e Invensense, a continuación las detallaremos.

- **STMicroelectronics:** Empresa fabricante de circuitos electrónicos integrados desde 1994. Presenta un área dedicada a los MEMS donde incluye acelerómetros, compases digitales y giroscopios. Los dispositivos fabricados tienen precios bastante cómodos, salida digital y rango de medición configurable.

Dentro de la variedad de productos encontrados, se destaca el módulo inercial LSM330DLC. El otro sensor, LSM330D, no se toma en cuenta en este análisis porque tiene las mismas características con la única diferencia de tener un área superficial más rectangular ($3 \times 5.5 \text{ mm}^2$) y un ligero menor precio. El LSM330DLC (Figura 8) presenta un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio tridimensional, otorgándole seis grados de libertad, tres sentidos de desplazamiento y tres de rotación.

Uno de sus grandes atractivos es que el acelerómetro y el giroscopio son independientes uno del otro, es decir, se puede apagar la señal de uno para obtener únicamente la señal del otro [30]. Particularmente, se apagaría el acelerómetro para sólo obtener la medición de la rotación y a la vez, obtenemos el beneficio de reducir la energía consumida por el sensor. [31].



Figura 8. Sensor LSM330DLC [10].

- **Invensense:** Empresa dedicada específicamente al área de dispositivos de rastreo de movimiento (desplazamiento y rotación). Produce sensores de movimiento que lideran el mercado para aplicaciones en smartphones, tablets, consolas de videojuego y smart TVs. Una de las empresas para las que fabrica componentes es Nintendo, diseña sensores para el MotionPlus (equipo electrónico que mejora la exactitud en la lectura de movimientos) del mando inalámbrico de la consola Wii, la primera consola de videojuegos basada en la detección de movimiento [32].

El MPU-6000 (Figura 9), cuenta con un giroscopio MEMS embebido de tres ejes, un acelerómetro MEMS de tres ejes y un acelerador de hardware llamado Digital Motion Processor, todo dentro del mismo empaque. Este sensor envía la medición del acelerómetro y giroscopio en una única salida de datos por medio del protocolo SPI o I2C, según se configure. También cuenta con un bloque de instrucciones de calibración para cada eje del acelerómetro y giroscopio [33]. El precio de este sensor es mayor que el precio del LSM330DLC, pero compensa el respaldo que tiene la empresa en el área de dispositivos inerciales.

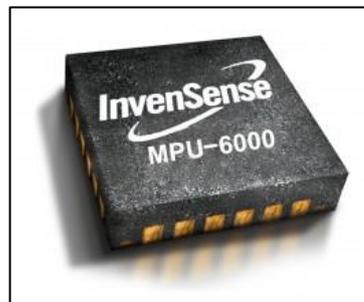


Figura 9. Sensor MPU-6000 [13].

3.3.3. Elección del Sensor

Se elige el MPU-6000 para el presente trabajo por ventajas descritas en la Tabla 3 como una baja corriente de operación, una mayor cantidad de rangos de medición configurables y una mejor sensibilidad angular. Hay dos parámetros claves que no se pueden comparar entre los dos sensores debido a la falta de información, uno es la no linealidad y el otro es el cambio del nivel Zero vs temperatura pero es probable que la diferencia no sea tan considerable.

Tabla 3. Comparación de características [31] [33].

| | LSM330DLC | MPU-6000 |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Precio (\$) | 3.2 | 15 |
| Tamaño (mm³) | 4x5x1.1 | 4x4x0.9 |
| Empaque | LGA (Land Grid Array) | QFN (Quad Flat No leads) |
| Voltaje de alimentación (v) | 2.4 – 3.6 | 2.375 – 3.46 |
| Corriente de operación (mA) | 6.1 | 3.9 |
| Rango del medición del giroscopio (grados por segundo - dps) | ±250 ±500 - | ±250 ±500 ±1000 |
| Sensibilidad angular (mdps/dígito) | ±2000 8.75 17.5 - | ±2000 7.63 15.27 30.49 |
| Sensibilidad angular versus temperatura (%/°C) | 70 ±2 | 60.98 ±2 |
| Nivel de densidad de ruido (dps/√Hz) | 0.03 | 0.005 |
| Rango de medición del acelerómetro (g) | ±2 ±4 ±8 ±16 | ±2 ±4 ±8 ±16 |
| Frecuencia máxima del reloj SPI (MHz) | 10 | 1 |

Finalmente, el nivel de densidad de ruido en el LSM330DLC es 6 veces mayor que en el MPU-6000, lo que significa que es más afectado por el ruido a medida que aumenta la frecuencia de trabajo. A consideración del presente trabajo, las ventajas mencionadas del MPU-6000 superan la desventaja de precio por lo que se elige este sensor.

La empresa Invensense ofrece dos presentaciones de este sensor, la primera es únicamente el sensor, y la segunda es el sensor ya instalado en una tarjeta electrónica (Figura 10). Se eligió comprar esta última presentación debido a limitaciones de tecnología para trabajar con dispositivos QFN.

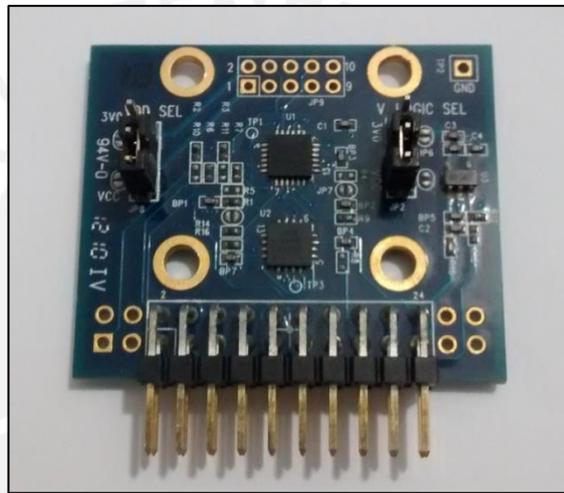


Figura 10. MPU-6000 EVB.

3.3.4. Configuración del Sensor

Se definirá la rotación alrededor del eje X como Roll, alrededor del eje Y como Pitch y alrededor del eje Z como Yaw (Figura 11), términos usados para ángulos de navegación.

Se configurará inicialmente el sensor con los siguientes parámetros:

- Rango de medición: Configurado a +/- 250 grados por segundo.
- Frecuencia del Reloj: Se usará el reloj interno siendo el giroscopio la fuente, con una frecuencia de 250Hz [33].
- Toma de datos: Se enviará datos al computador cada vez que se reciba la interrupción del ecógrafo con una velocidad de transmisión desde 1KHz.
- Resolución en 16 bits: 0.0000076 grados [Anexo 2].

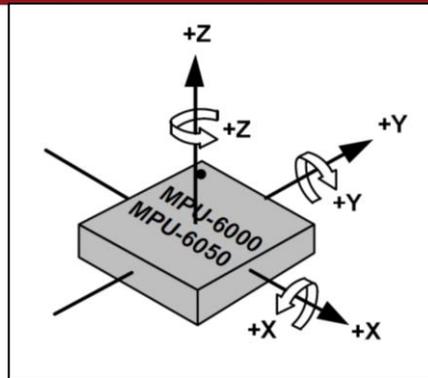


Figura 11. Ejes de Giro del Sensor MPU-6000 [33].

3.4. Microcontrolador para la toma de datos

3.4.1. Requerimientos

El microcontrolador requerirá las siguientes características:

- Protocolos de comunicación SPI e I2C independientes para dar opción a conectar un sensor de movimiento que pueda usar otro tipo de protocolo.
- Protocolo de comunicación RS232 o USB con velocidad de transferencia mayor o igual a 48 Kbps. Debido a que la frecuencia mínima de transmisión del sensor es de 1KHz y se transmitirán 16 bits por cada eje.
- Disponibilidad de adquisición en el mercado.
- Accesibilidad a herramientas de software para la escritura del código fuente y su compilación.
- Accesibilidad a hardware para su programación.
- Precio de compra no tan excesivo.
- Disponibilidad de acceso a información, hoja de datos, etc.

3.4.2. Elección del Microcontrolador

De acuerdo a los requerimientos, ya que no se realizará mayor procesamiento en el microcontrolador más que el de transferir bytes entre los protocolos será suficiente usar uno que trabaje con 8 bits.

Dentro de los microcontroladores de 8 bits destacan los de las marcas Microchip Technology y Atmel. Esto es debido a que las dos marcas tienen fuerte presencia en el mercado peruano, presentan bajo costo, gran gama de productos, software compilación gratuitos, precio barato de hardware para su programación, páginas web que brindan información actualizada sobre sus microcontroladores y foros no oficiales a donde se puede recurrir para obtener soporte rápido.

De estas dos empresas fabricantes de microcontroladores, se elige a Atmel ya que los productos de Microchip Technology no cuentan con los puertos de comunicación SPI e I2C independientes [34].

Se usará el microcontrolador de ATMEL, el ATMEGA8 para tomar los datos (Figura 12). La elección de este microcontrolador es por su fácil adquisición, bajo costo, conocimientos y trabajos previos, y por la ventaja que presenta al tener sus tres protocolos seriales independientes (I2C, SPI y USART). Los canales de comunicación cumplen con los requisitos de velocidad y de esta manera se puede implementar paralelamente un sensor de rotación en el canal SPI, un sensor de posicionamiento en el canal I2C y la conexión a una PC por el canal USART [35].

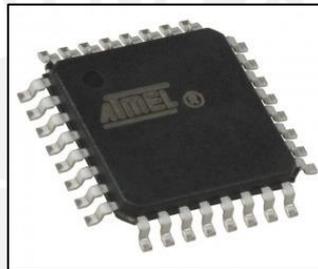


Figura 12. Microcontrolador superficial ATMEGA8.

Debido al cada vez mayor uso del protocolo de comunicación USB en vez del RS232 en computadores personales, se usará el convertor de protocolos FT232 de la empresa FTDI (Figura 13). Finalmente, el ATMEGA8 brinda la posibilidad de programarlo para que automáticamente configure los registros del sensor.

Se realizará la toma de datos del sensor usando el protocolo SPI para luego enviar estos datos por el puerto USART continua y de manera sincronizada con el ecógrafo 2D.



Figura 13. Convertor de protocolos FT232RL.

3.5. Diseño del Hardware para la Obtención de la Orientación

3.5.1. Circuito de Alimentación de Energía

La fuente de energía está establecida por los voltajes de operación de los componentes y la corriente que consumen, en la Tabla 4 se muestran estas características de los componentes principales.

Tabla 4. Características eléctricas de los componentes principales.

| Componente | Voltaje de Operación (v) | Corriente de Operación(mA) |
|--------------|--------------------------|----------------------------|
| MPU-6000 | 3.3 | 3.7 |
| ATMEGA8 | 3.3 | 5 |
| FT232RL | 5 | 15 |
| TOTAL | | 23.7 |

Fuente: Elaboración propia.

El puerto USB del computador es la fuente de alimentación más apropiada para el sistema de medición de orientación ya que provee el voltaje continuo de 5 voltios necesario para que funcionen los componentes. Además, puede entregar máximo hasta 500mA, más de 20 veces la corriente requerida [36].

Dado que el voltaje de operación del microcontrolador y del sensor de rotación es de 3.3v (Tabla 4), se usará el convertor de voltaje LM1117-3.3v (Figura 14). Este convertor de voltaje entrega 3.3 voltios con una entrada entre 4.75v hasta 5.25v y trabaja hasta con 800mA [37].

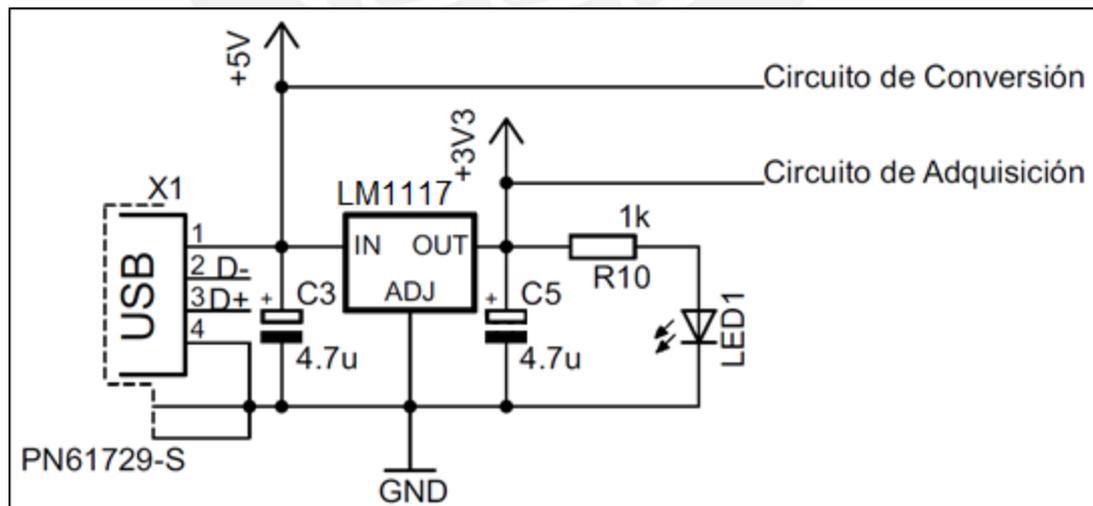


Figura 14. Diagrama Esquemático del Circuito de Alimentación de Voltaje.

El FT232RL brinda también una fuente de 3.3v por medio de un pin de salida. La razón por la que no se usa esta fuente es debido a que la corriente máxima que soporta es de 50mA, es suficiente para cumplir con la corriente típica de operación pero si se desea aumentar la frecuencia de trabajo, usar otro sensor de orientación, incluir un sensor de posición o implementar un filtro, se superará o se trabajará al máximo de la corriente [38].

3.5.2. Circuito de Conversión de Protocolos

Se convertirá el protocolo RS232 a USB por medio del FT232RL (Figura 15). Este conversor trabajará con su oscilador interno de 12MHz. Los valores de los condensadores son propuestos por el fabricante para este tipo de configuración.

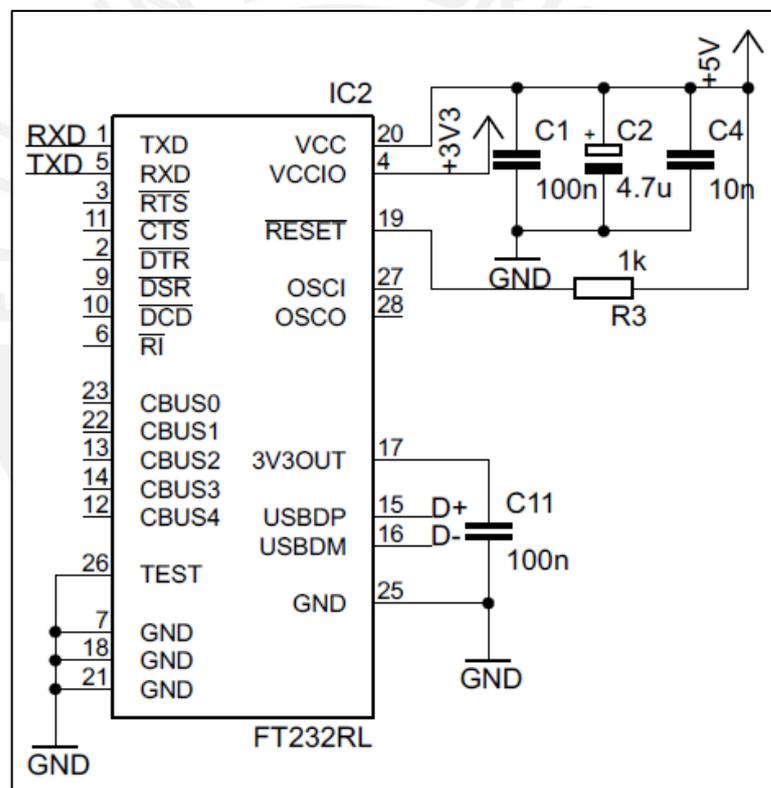


Figura 15. Diagrama Esquemático del Circuito de Conversión de Protocolos.

Se usará 5v para alimentar a este componente, pero el valor del voltaje de comunicación se define por medio del pin VCCIO que será de 3.3v haciéndolo la comunicación compatible con el ATMEGA8. Además, la comunicación serial se realizará solo con los dos canales principales: transmisión y recepción.

3.5.3. Circuito del Microcontrolador

La frecuencia máxima a la que puede trabajar el microcontrolador, con voltaje de operación de 3.3v, es de 8MHz. Se usará un cristal oscilador externo de 7.3728MHz porque a esta frecuencia, el error de transmisión de datos hacia el computador es de 0% [35].

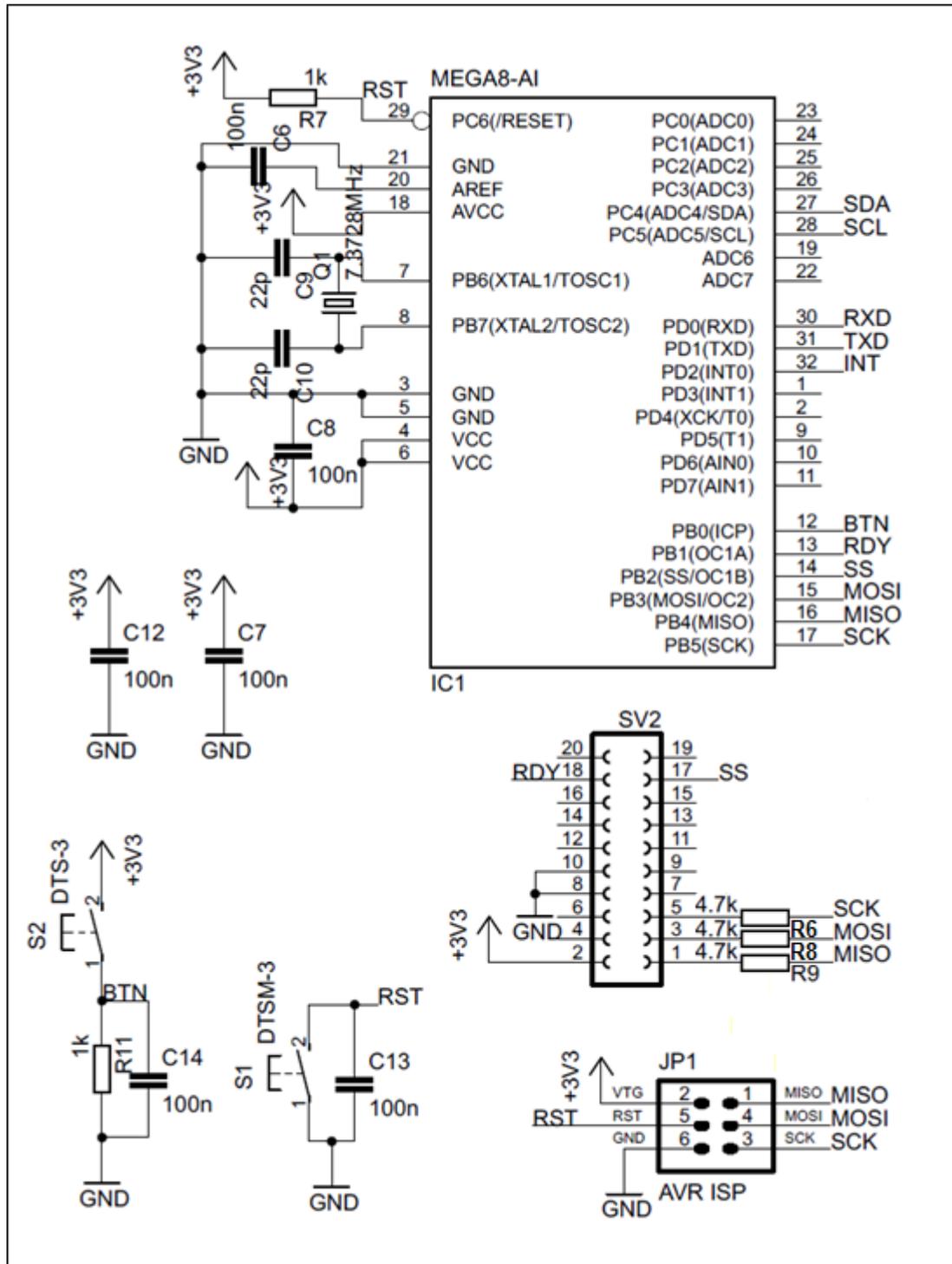


Figura 16. Diagrama Esquemático del Circuito de Adquisición de datos.

La comunicación con el sensor se realizará por medio del conector SV2 usando el protocolo SPI (Figura 16). Se usan resistencias en los canales SCK, MOSI y MISO para evitar problemas eléctricos ya que se programará al microcontrolador por el mismo protocolo [39]. La señal RDY proviene del sensor y se activa en alta cada vez que existen datos nuevos en sus registros [40]. Esta señal se usará para efectuar la lectura de la rotación y su transmisión hacia el computador.

Adicionalmente se incluirá un pulsador de reseteo del microcontrolador (RST) y otro pulsador para la adquisición de datos (BTN). Este último servirá para iniciar y finalizar la medición de la rotación luego de que el sensor sea calibrado.

3.5.4. Circuito de Sincronización

La señal de sincronización es enviada por el ecógrafo a través del conector BNC número 2 del mismo. Cada vez que el ecógrafo termina de obtener una imagen, genera un pulso de aproximadamente 1v pico a pico (Figura 17). Esta señal es recibida por el terminal SL1, luego pasa hacia un comparador analógico de 0.3v para obtener una señal cuadrada de amplitud 3.3v (INT) (Figura 18). Dicha señal será recibida por el microprocesador, el cual generará una bandera con el fin de obtener la posición angular para cada imagen del ecógrafo.

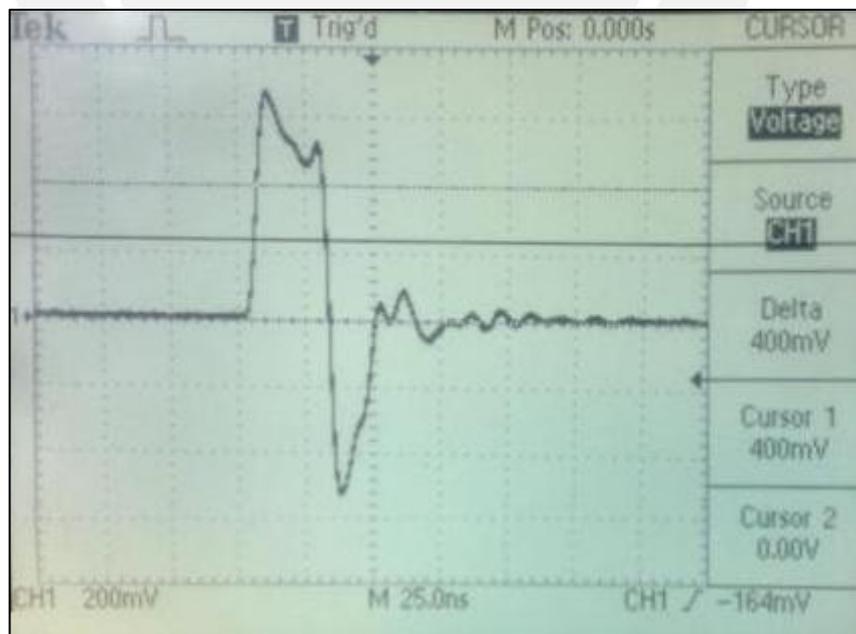


Figura 17. Señal de Interrupción del Ecógrafo Sonix Touch.

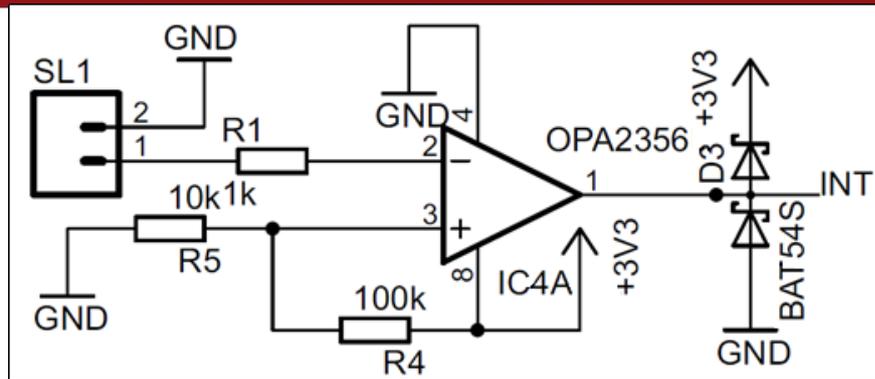


Figura 18. Diagrama Esquemático del Circuito de Sincronización.

3.6. Integración de los circuitos

Se realizará el diseño de los circuitos en una tarjeta de doble capa, con instalación superficial para ocupar el menor espacio posible.

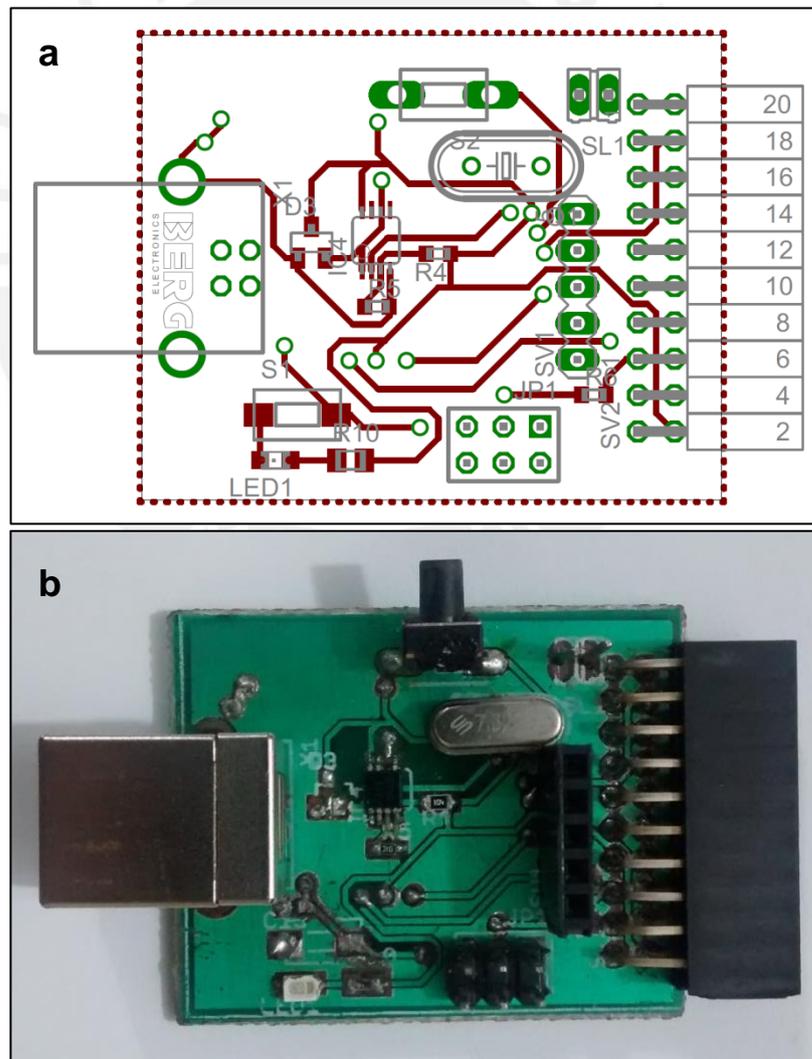


Figura 19. Capa superior del hardware para la obtención de datos: **a.** Diseño; **b.** Implementación

En la capa superior tendremos principalmente el circuito de sincronización (IC4) y las interfaces físicas de comunicación con: el ecógrafo (SL1), la tarjeta del sensor MPU-6000 (SV2), la computadora personal (X1) y el programador del microcontrolador (JP1) (Figura 19). En esta capa se encuentra también la interfaz con el usuario, la cual consiste en un led que indica estado de encendido (LED1) y el pulsador para la adquisición de datos (S2) descrito en la sección 3.5.3.

En la capa inferior se encuentran: el circuito de alimentación de energía (C5), el circuito del microcontrolador (IC1) y el circuito de conversión de protocolos (IC2) (Figura 20).

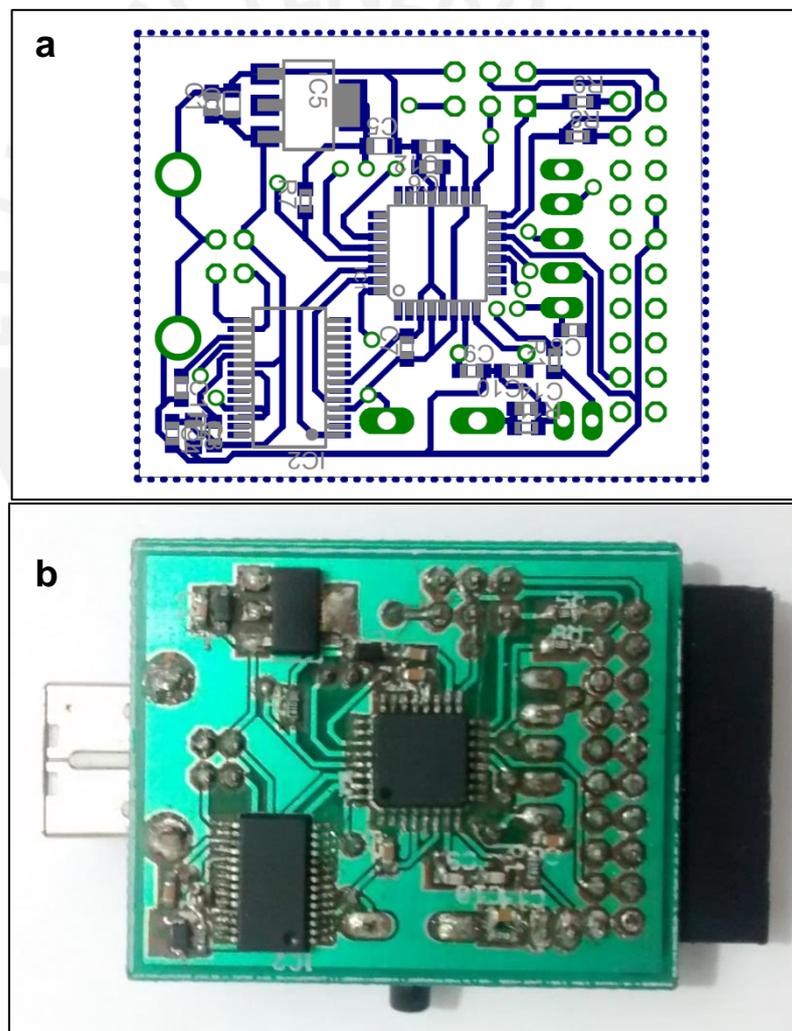


Figura 20. Capa inferior del hardware para la obtención de datos: **a.** Diseño; **b.** Implementación

3.7. Software de control

3.7.1. Requerimientos

El software de control necesitará las siguientes características:

- Compatibilidad para comunicación USB.
- Interfaz interactiva con el usuario.
- Capacidad de conexión con una base de datos.
- Multiplataforma.
- Libre distribución

3.7.2. Elección del Software

Dentro de la gama de softwares de programación se encuentran php, c++, java, y visual basic; los cuales cumplen con los requerimientos descritos en la sección 3.7.1 excepto visual basic que no es multiplataforma ni tiene libre distribución. Para el presente trabajo, el software que se usará será Java, de la empresa ORACLE, por poseer conocimientos previos además de lo antes descrito.

La IDE de programación a usar será NetBeans v7.2 de 32 bits en conjunto con una base de datos en MySQL. El procesamiento de datos, aplicación de un filtro e integración se realizará mediante un ejecutable compilado desde la programación en el software MATLAB.

3.8. Diseño del Software para la Medición de la Orientación

3.8.1. Registros del Sensor MPU-6000

Se trabajará solamente con los registros que impliquen modificaciones en el funcionamiento del giroscopio del MPU-6000 y la comunicación SPI. Se dividirán los registros en dos grupos, los que podrán ser modificados por el usuario para cada toma de datos, y el grupo de registros que tendrán valores fijos permanentes para la comunicación entre el sensor y el microcontrolador.

De acuerdo a la información de registros proporcionada por la empresa Invensense [40], se desprende la Tabla 5 referente a los registros que podrán ser modificados mediante el programa de interfaz con el usuario.

Internamente se configurarán los siguientes registros pero no se habilitarán para ser modificados mediante el programa del computador (Tabla 6).

Tabla 5. Registros Modificables del Sensor.

| Registro | Característica | Descripción |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frecuencia de muestreo | Divisor | Divisor de la frecuencia de salida del giroscopio para obtener la frecuencia de muestreo. |
| Configuración | Frecuencia del giroscopio | Define la frecuencia de muestreo del giroscopio. |
| | Filtro digital pasa bajos | Define el ancho de banda del filtro interno que se aplicará a la salida del giroscopio. |
| Configuración del giroscopio | Rango de escala del giroscopio | Define el rango de sensibilidad de los giroscopios. |
| Manejo de la alimentación | Habilitador de la temperatura | Permite habilitar la lectura de temperatura del sensor. |
| | Selector de reloj | Define la fuente del reloj del giroscopio. |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Registros Configurados no Modificables del Sensor.

| Registro | Característica | Descripción |
|-----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Configuración de la interrupción | Nivel de Interrupción | Se definirá su estado activo en alta. |
| | Tipo de pin | El pin se configurará como push-pull para que cada estado (alta y baja) tenga un transistor. |
| | Pulso de interrupción | Se mantendrá en alta hasta que la interrupción se limpie. |
| | Limpieza de la interrupción | La interrupción se limpiará con cualquier operación de lectura. |
| Habilitación de la interrupción | Habilitador de nueva data | Se activa cada vez que existen nuevos datos en los registros. |
| Estado de interrupción | Interrupción por nueva data | Registro de solo lectura para comprobar si hay nueva data. |
| Mediciones del giroscopio | Salida del giroscopio | Seis registros de lectura divididos en 3 ejes, cada eje con un tamaño de 2 bytes. |

Fuente: Elaboración propia.

3.8.2. Programación del Microcontrolador

De acuerdo a los requerimientos, la velocidad de transmisión de datos del puerto USART del ATMEGA8, se inicializará con un baud rate de 115200bps. Luego se configurarán los parámetros fijos del sensor y se esperará a que el usuario ingrese los parámetros modificables para terminar con la configuración inicial (Figura 21).

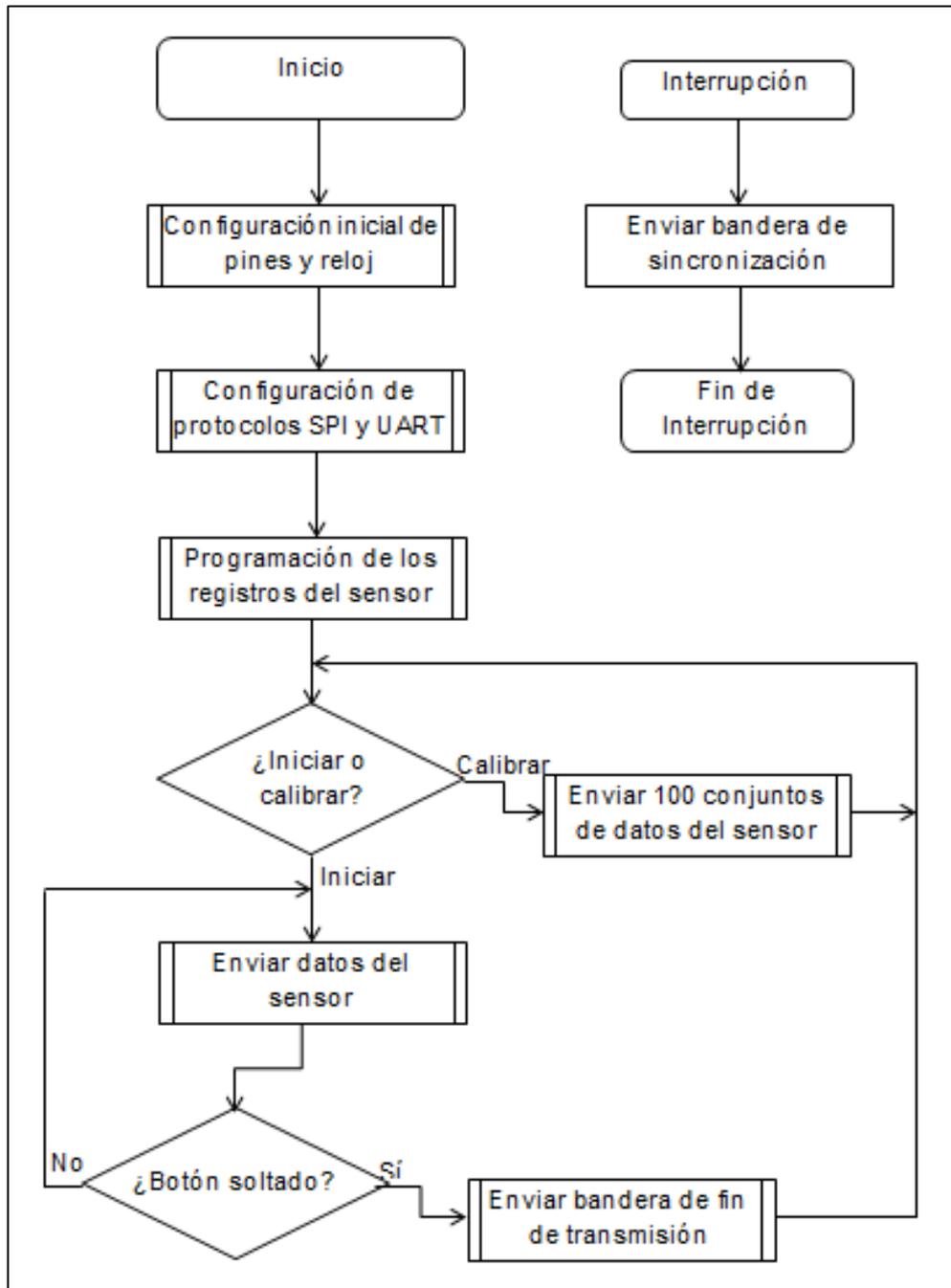


Figura 21. Diagrama de Flujo del Microcontrolador.

Una vez que la configuración esté completa, el microcontrolador esperará uno de dos eventos: pedido de calibración o inicio de toma de datos. En primer lugar, la calibración tomará los 100 primeros valores de los tres ejes (Roll, Pitch y Yaw), una vez almacenados estos datos se empezará la medición hasta que se envíe la bandera de fin de transmisión.

Adicionalmente se muestra el diagrama de flujo de la señal de interrupción generada por el ecógrafo, esta señal genera una bandera para registrar el momento en el cual el ecógrafo registró una imagen para asignarle un valor de posición angular.

En la Tabla 7 se muestran los valores de configuración para la comunicación con la computadora personal. La configuración SPI (Tabla 8), servirá tanto para la comunicación con el sensor MPU-6000 como para la programación del microcontrolador.

Tabla 7. Configuración UART.

| Descripción | Estado |
|-------------------------|-----------|
| Modo | Asíncrono |
| Paridad | No |
| Bits por segundo | 115200 |
| Bits de datos | 8 |
| Bits de parada | 1 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Configuración SPI.

| Descripción | Estado |
|--------------|--------|
| Reloj | Fck/16 |

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3. Programación de la Interfaz del Computador

En el Anexo 3 se muestran los valores de los registros del sensor.

El diagrama de flujo de la Figura 22 muestra el funcionamiento del programa usado como interfaz, en primer lugar configurará el microcontrolador para iniciar la toma de datos de calibración, luego almacenará los datos de la medición y finalmente, ejecutará la programación de MATLAB.

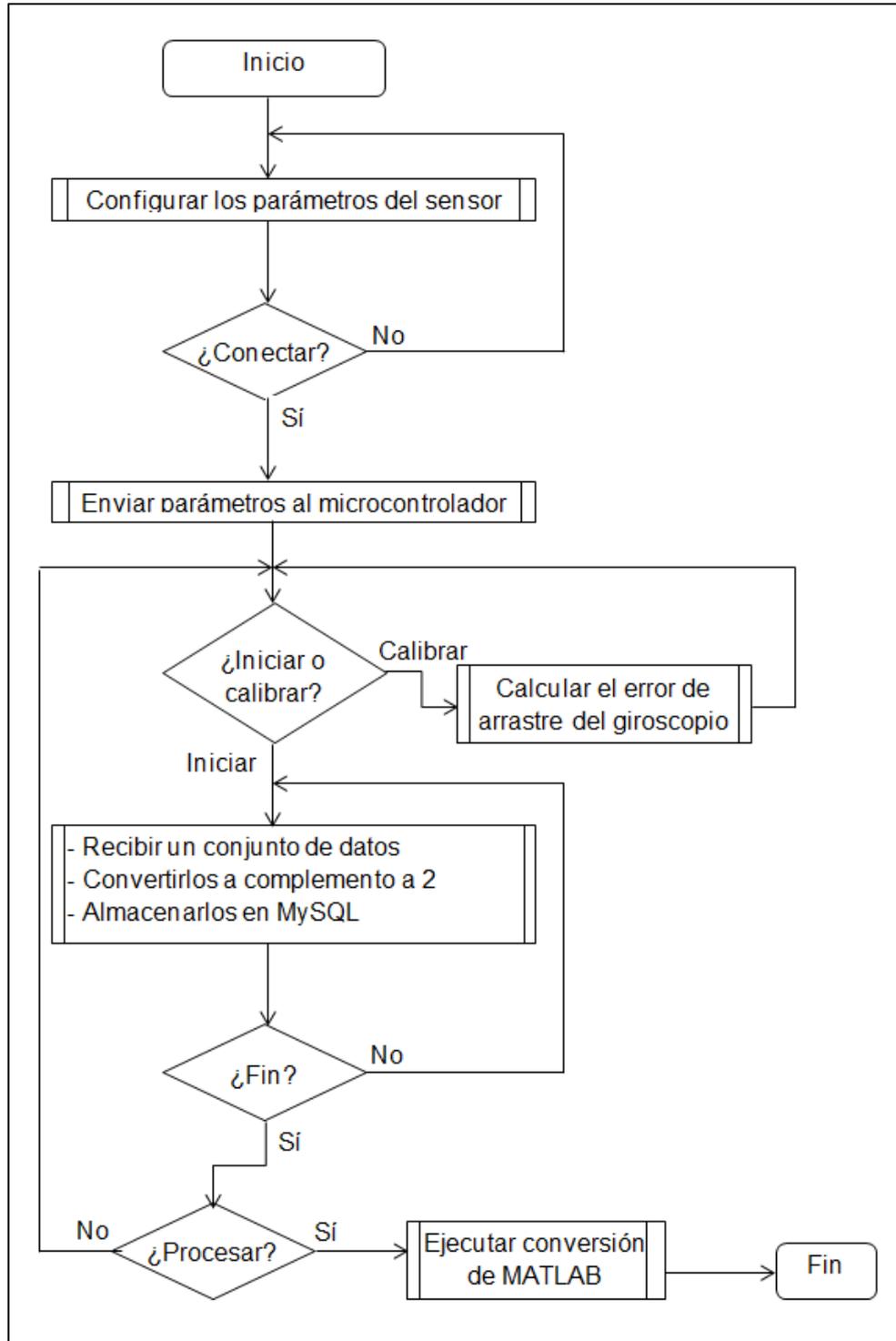


Figura 22. Diagrama de Flujo de la Interfaz.

La interfaz de adquisición de datos se muestra en la Figura 23. En primer lugar se tienen que configurar los valores del puerto USB y de registros del sensor, para esto se eligen el número del puerto serial al cual está conectado el dispositivo en la opción “Nombre De Puerto” y los valores de configuración descritos en la Tabla 5 de la sección 3.8.1.

Posteriormente a esta configuración, se activará el botón “Conectar” para establecer la comunicación USB y enviar los valores elegidos al procesador. En caso que todo sea correcto, se recibirá un mensaje de confirmación de conexión y se habilitará la opción “Calibrar”, en caso contrario se recibirá un mensaje de error de conexión para verificar que el dispositivo esté correctamente conectado al computador personal y que el número de puerto sea el correspondiente.

Cuando se active el botón “Calibrar”, el programa realizará un muestreo con el dispositivo quito para quitar el error de arrastre [22].

Una vez que se calibre el sistema se habilitará el botón “Iniciar”, el cual permitirá al usuario a tomar datos una vez que presione el botón de la tarjeta electrónica. Cuando se suelte el botón, terminará la transmisión y todos los datos recopilados serán almacenados en una base de datos de MySQL, quedando el sistema listo para realizar el procesamiento de los mismos con el botón “Procesar”.



Figura 23. Interfaz del Usuario.

3.8.4. Programación del Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizará usando la herramienta de MatLab y tendrá como entradas y salidas las bases de datos de MySQL. En este proceso se aplicará el filtrado por medio de Total Variation Denoising debido a los conocimientos obtenidos por trabajos previos. La programación descrita en el diagrama de flujo de la Figura 24 se ejecutará cuando el usuario presione el botón Procesar de la interfaz.

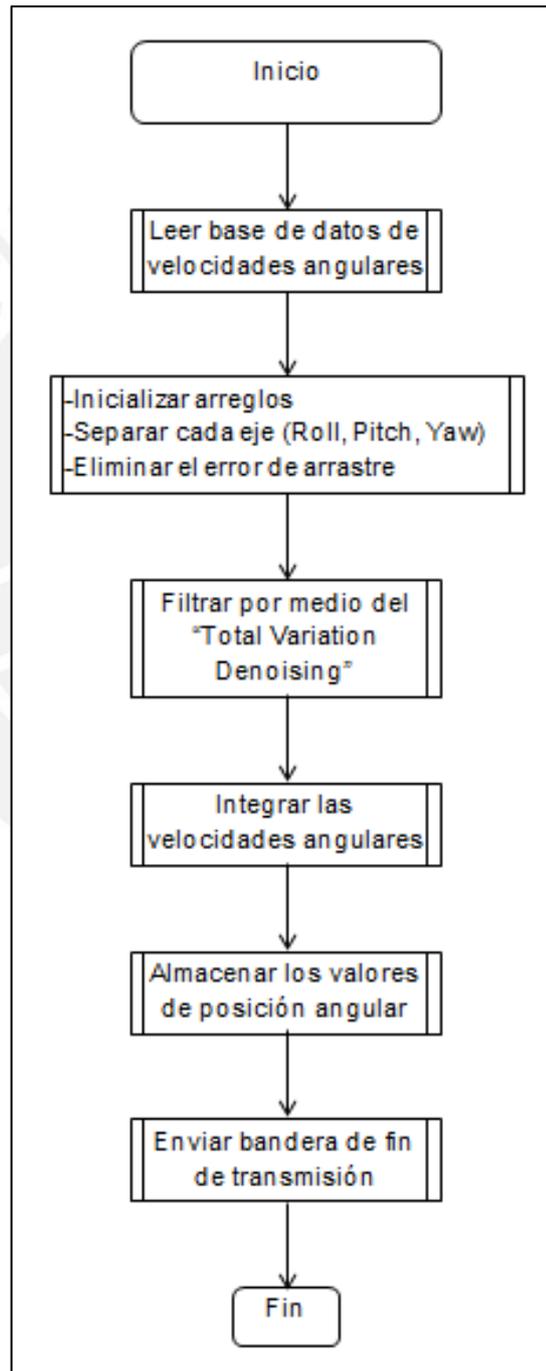


Figura 24. Diagrama de Flujo de MATLAB.

CAPÍTULO 4:
SIMULACIONES Y PRUEBAS FINALES

4.1. Simulaciones

4.1.1. Comunicación SPI

La primera simulación se realizó en el software ISIS v7.9 de la empresa Labcenter Electronics. Esta simulación ayuda a comprobar el funcionamiento del protocolo SPI mediante dos microcontroladores ATMEGA8. El primero será el SPI Maestro mientras que el segundo simulará al sensor siendo el SPI esclavo [Anexo 4].

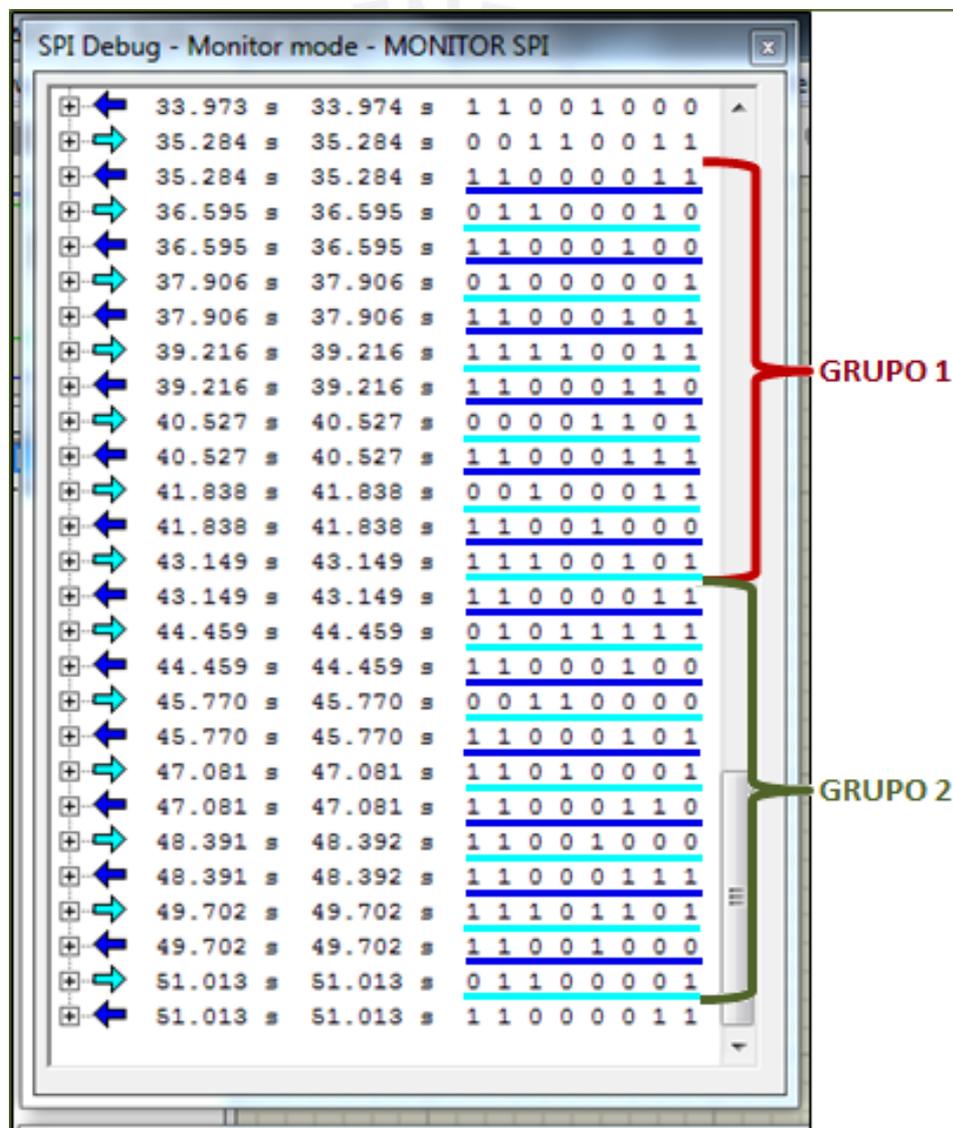


Figura 25. Simulación de Transmisión SPI.

Se tomó como ejemplo 2 grupos de datos. Los datos enviados por el maestro son los subrayados de color azul, estos representan las direcciones de los registros que se desean leer (Figura 25); para el caso de los 3 ejes del giroscopio son desde C3 hasta C8 (valores en hexadecimales). Al recibir una dirección, el esclavo le envía un valor al azar de 1 byte, estos valores son mostrados subrayados de color celeste. Cada vez que el maestro lee el valor del esclavo, envía ese dato por el puerto USART, simulando así la transmisión de datos hacia el computador (Figura 26).

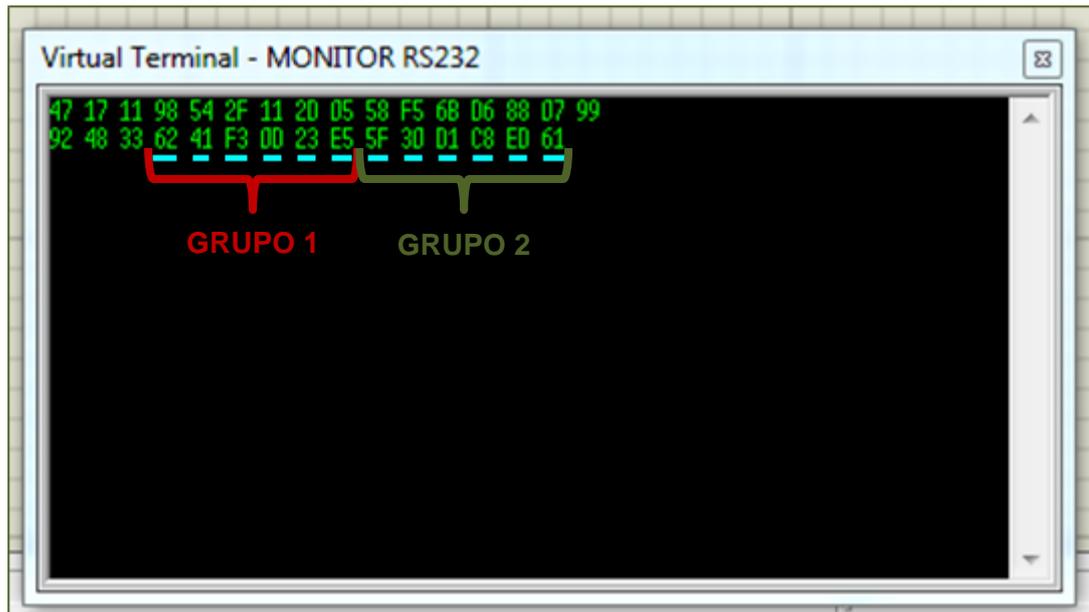


Figura 26. Simulación de Transmisión RS232.

4.2. Reducción del Ruido

En primer lugar se realizará la prueba para calcular y reducir el error de arrastre. Una vez hecho esto, se realizará el filtrado del ruido angular.

4.2.1. Error de Arrastre

Se analizarán los valores de salida de los giroscopios mientras que el sensor se encuentra en reposo para calcular el valor de arrastre (Bias) de cada eje. Este procedimiento se realizará cada vez que se inicie una medición nueva del sistema.

Para esto se tomaron 1000 datos y se promediaron los valores de cada eje por separado usando el software MATLAB (Figura 27), dando los siguientes resultados:

Error de arrastre_{Roll} = 1.3194

Error de arrastre_{Pitch} = 0.17018

Error de arrastre_{Yaw} = 2.321

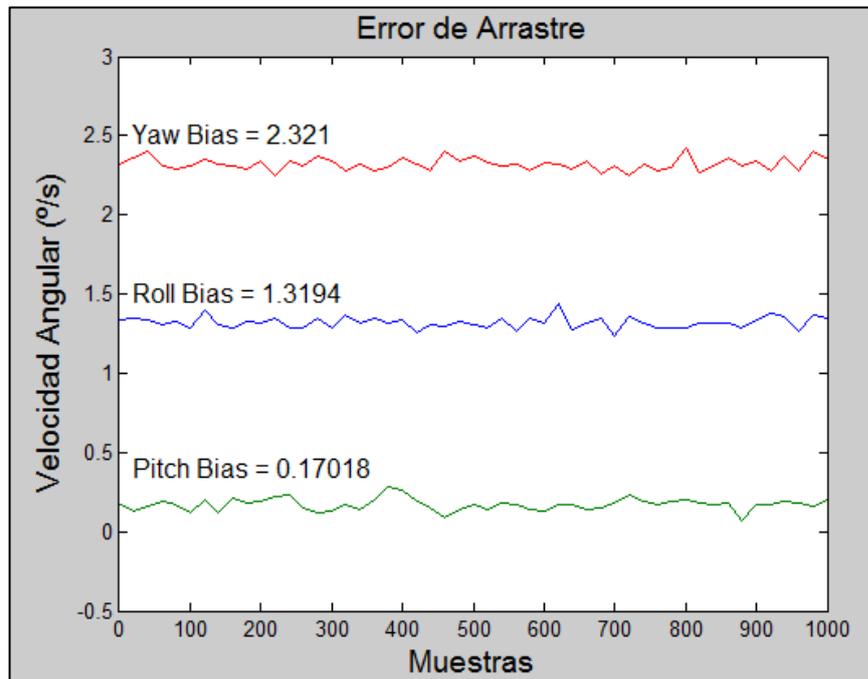


Figura 27. Medición del Error de Arrastre del MPU-6000.

4.2.2. Filtro Digital Externo

Se trabajará con la señal registrada durante el movimiento de 1.0032° (Figura 28). Primero se procederá a eliminar el error de arrastre de acuerdo a lo descrito en la sección 4.2.1. Luego de eliminar el valor erróneo producido por el arrastre, se procede a integrar los valores y se obtiene la siguiente posición final para la señal previa al filtrado (Figura 29).

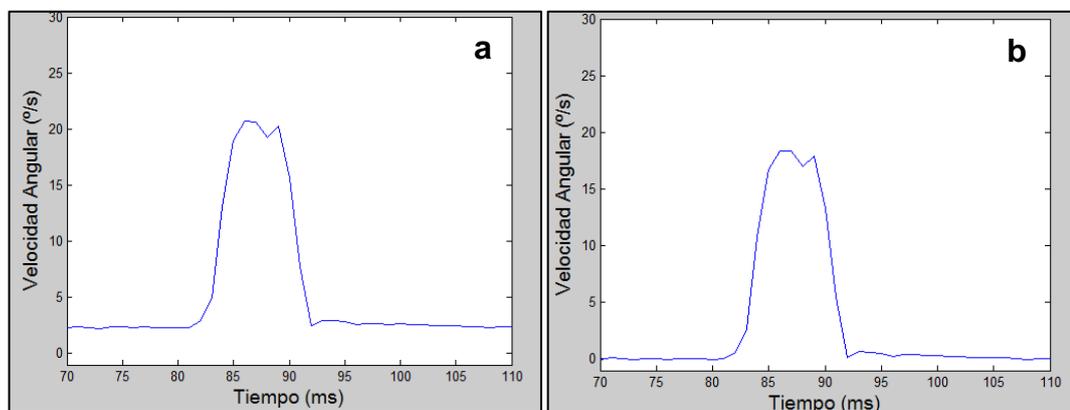


Figura 28. Respuesta obtenida del sensor: a. Con error de arrastre; b. Sin error de arrastre.

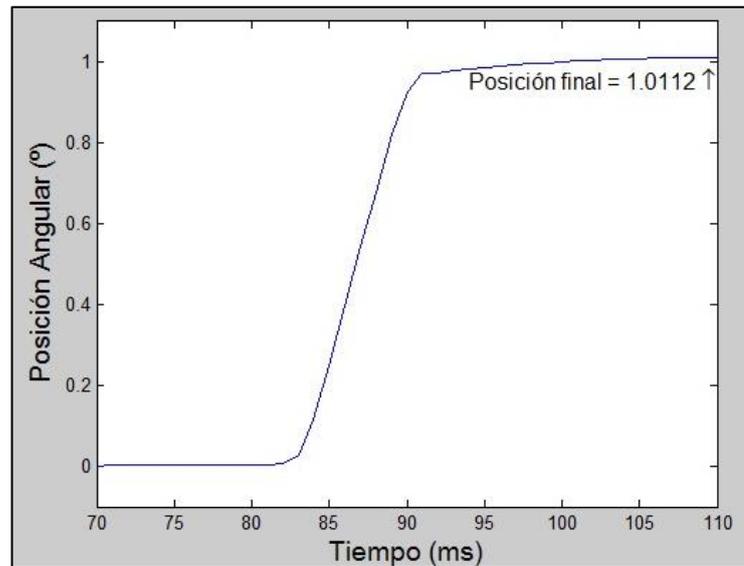


Figura 29. Respuesta luego de integrar la velocidad angular.

$$\text{Posición final}_{\text{Sin Filtro}} = 1.0112$$

Se probará la aplicación del filtro Total Variation Denoising para comparar la reducción de ruido y mejorar la exactitud del resultado. En el Anexo 5 se muestra el análisis realizado para obtener los siguientes valores para los parámetros con los que se trabajarán:

$$\text{Número de Iteraciones} = 100$$

$$\text{Parámetro de Regularización} = 1$$

El filtrado mediante Total Variation Denoising presenta buena atenuación de ruido sin llegar a distorsionar la señal deseada por lo que se procederá a aplicar este filtro en las pruebas de exactitud.

4.3. Prueba de Exactitud

Las pruebas para obtener el grado de exactitud del sensor MPU-6000 se realizaron con el brazo robótico SCORA-ER 14 (Figura 30). Presenta cuatro ejes de rotación, de los cuales se trabajará solamente con el cuarto eje, que contiene una pinza (Figura 31) [41]. Las características de este eje se muestran en la Tabla 9.

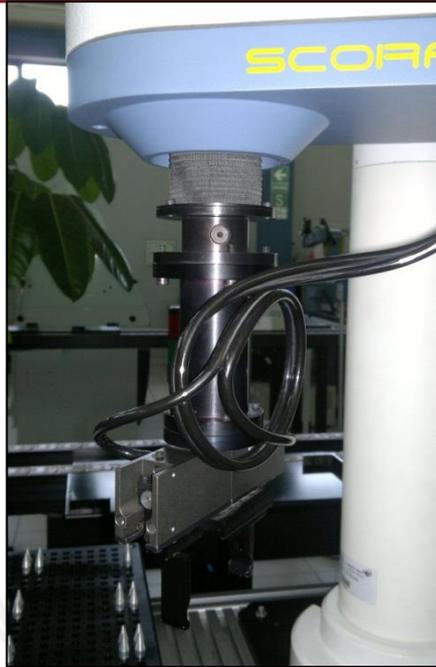


Figura 30. Brazo Robótico SCORA-ER 14

Tabla 9. Características Mecánicas del Eje de Rotación 4 [ANEXO 6].

| | Rango | Velocidad máxima | Relación de cambio | Resolución |
|--------------|-----------------|------------------|--------------------|------------|
| Eje 4 | $\pm 527^\circ$ | 370°/s | 50:1 | 0.00352 |

Fuente: Elaboración propia.

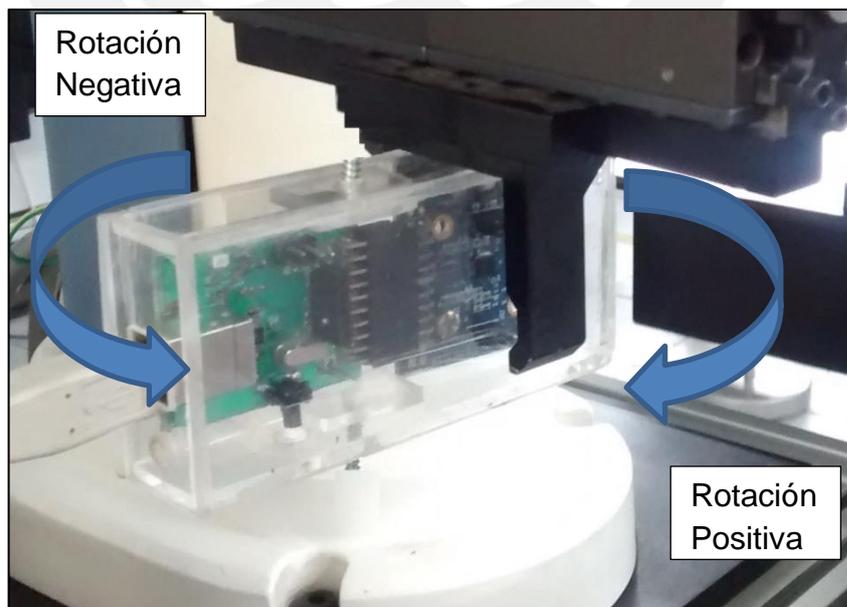


Figura 31. Módulo de Medición de Orientación.

Se realizaron pruebas para los tres ejes con el valor del codificador más cercano a seis números enteros, como se muestra en la Tabla 10. Para cada posición se tomaron 3 mediciones. En el presente capítulo, los movimientos enteros referenciarán a los grados reales, se mostrarán así las pruebas y resultados para brindar una mayor facilidad de lectura.

Tabla 10. Movimientos Angulares para las Pruebas.

| | Pasos | Movimiento | Grados Reales |
|-------------------------|--------------|-------------------|----------------------|
| Posición Inicial | 0 | 0° | 0 |
| Posición 1 | 285 | 1° | 1.0032° |
| Posición 2 | 1421 | 5° | 5.00192° |
| Posición 3 | 8523 | 30° | 30.00096° |
| Posición 4 | 14205 | 50° | 50.0016° |
| Posición 5 | 19887 | 70° | 70.00224° |
| Posición 6 | 25568 | 90° | 90.00288° |

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidas las mediciones, se calculará la exactitud mediante la ecuación de la desviación estándar del muestreo [26] [42].

$$s_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

- s_N es la exactitud.
- x_i es el valor de posición angular medido.
- \bar{x} es el valor angular fijo.
- N es la cantidad de mediciones.

Finalmente se determinará hasta qué rango de medición angular, se cumple una exactitud menor o igual a 0.5°. Las gráficas de los datos obtenidos en respuesta a los movimientos se presentan en el Anexo 7.

4.3.1. Rotación sobre el eje X (Roll)

A continuación, se muestran los resultados de las mediciones y las exactitudes para cada posición. La Tabla 11 muestra las mediciones sin filtro y la Tabla 12, las mediciones con filtro.

Tabla 11. Pruebas de Exactitud en el Eje X – Sin Filtro.

| Movimiento (°) | 1 | 5 | 30 | 50 | 70 | 90 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 (°) | 0.93 | 4.96 | 29.82 | 48.87 | 68.54 | 87.95 |
| Medición 2 (°) | 0.91 | 5.14 | 29.81 | 49.05 | 68.32 | 88.03 |
| Medición 3 (°) | 0.86 | 5.14 | 29.78 | 49.08 | 68.34 | 87.94 |
| Exactitud (°) | 0.11 | 0.12 | 0.20 | 1.01 | 1.61 | 2.03 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Pruebas de Exactitud en el Eje X – Con Filtro.

| Movimiento (°) | 1 | 5 | 30 | 50 | 70 | 90 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 (°) | 1.00 | 5.00 | 30.00 | 50.00 | 70.00 | 90.00 |
| Medición 2 (°) | 0.97 | 4.90 | 29.89 | 49.34 | 68.88 | 88.53 |
| Medición 3 (°) | 0.93 | 5.10 | 29.84 | 49.48 | 68.83 | 88.49 |
| Exactitud (°) | 0.09 | 0.09 | 0.15 | 0.56 | 1.14 | 1.38 |

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar las gráficas de los resultados de exactitud (Figura 32), se establece el rango de medición para cumplir con la exactitud recomendada.

Sin Filtro: Mov. Ang. Máx._{Roll} = $\pm 37.46^\circ$

Con Filtro: Mov. Ang. Máx._{Roll} = $\pm 47.24^\circ$

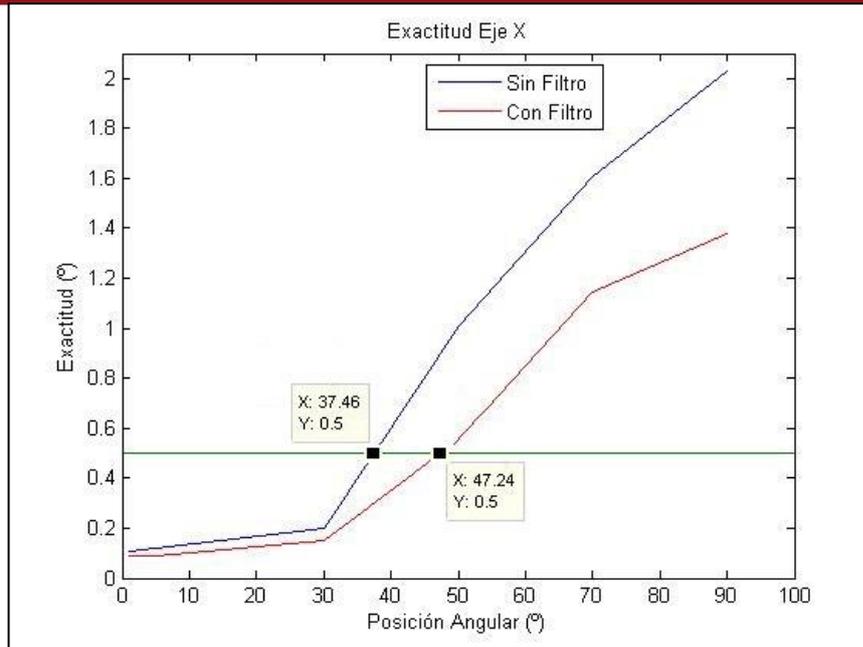


Figura 32. Gráfica de Resultados del Eje X.

4.3.2. Rotación sobre el eje Y (Pitch)

A continuación, se muestran los resultados de las mediciones y las exactitudes para cada posición. La Tabla 13 muestra las mediciones sin filtro y la Tabla 14, las mediciones con filtro.

Tabla 13. Pruebas de Exactitud en el Eje Y – Sin Filtro.

| Movimiento (°) | 1 | 5 | 30 | 50 | 70 | 90 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 (°) | 0.97 | 4.99 | 30.17 | 49.18 | 68.64 | 88.25 |
| Medición 2 (°) | 0.84 | 5.18 | 30.25 | 49.17 | 68.70 | 88.26 |
| Medición 3 (°) | 0.86 | 5.19 | 30.24 | 49.19 | 68.65 | 88.26 |
| Exactitud (°) | 0.12 | 0.15 | 0.22 | 0.82 | 1.34 | 1.75 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Pruebas de Exactitud en el Eje Y – Con Filtro.

| Movimiento (°) | 1 | 5 | 30 | 50 | 70 | 90 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 (°) | 0.98 | 5.00 | 30.18 | 49.28 | 68.80 | 88.46 |
| Medición 2 (°) | 0.85 | 5.18 | 30.17 | 49.31 | 68.85 | 88.43 |
| Medición 3 (°) | 0.87 | 5.19 | 30.23 | 49.27 | 68.79 | 88.42 |
| Exactitud (°) | 0.12 | 0.15 | 0.19 | 0.72 | 1.19 | 1.57 |

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar las gráficas de los resultados de exactitud (Figura 33), se establece el rango de medición para cumplir con la exactitud recomendada.

Sin Filtro: Mov. Ang. Máx.*pitch* = $\pm 39.32^\circ$
 Con Filtro: Mov. Ang. Máx.*pitch* = $\pm 41.73^\circ$

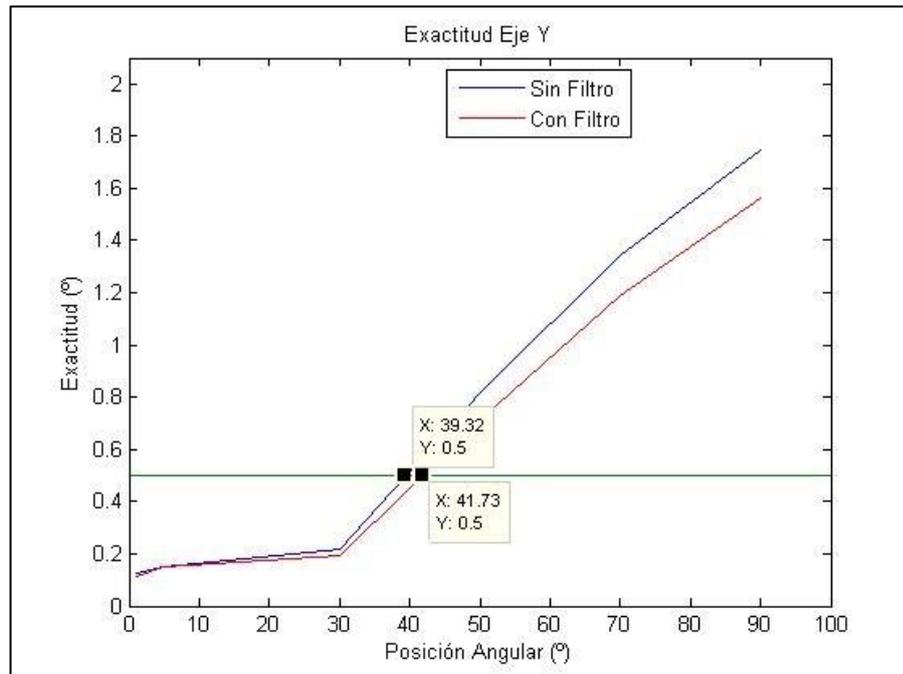


Figura 33. Gráfica de Resultados del Eje Y.

4.3.3. Rotación sobre el eje Z (Yaw)

A continuación, se muestran los resultados de las mediciones y las exactitudes para cada posición. La Tabla 15 muestra las mediciones sin filtro y la Tabla 16, las mediciones con filtro.

Tabla 15. Pruebas de Exactitud en el Eje Z – Sin Filtro.

| Movimiento (°) | 1 | 5 | 30 | 50 | 70 | 90 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 (°) | 1.01 | 5.02 | 30.19 | 49.82 | 69.44 | 89.38 |
| Medición 2 (°) | 1.04 | 4.73 | 30.19 | 49.53 | 69.43 | 89.19 |
| Medición 3 (°) | 1.03 | 5.10 | 30.19 | 49.55 | 69.49 | 89.05 |
| Exactitud (°) | 0.03 | 0.17 | 0.19 | 0.39 | 0.55 | 0.81 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Pruebas de Exactitud en el Eje Z – Con Filtro

| Movimiento (°) | 1 | 5 | 30 | 50 | 70 | 90 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 (°) | 0.99 | 5.08 | 30.18 | 49.91 | 69.58 | 89.56 |
| Medición 2 (°) | 1.03 | 4.77 | 30.16 | 49.62 | 69.56 | 89.35 |
| Medición 3 (°) | 1.02 | 5.10 | 30.18 | 49.63 | 69.58 | 89.25 |
| Exactitud (°) | 0.02 | 0.15 | 0.17 | 0.31 | 0.43 | 0.63 |

Fuente: Elaboración propia.

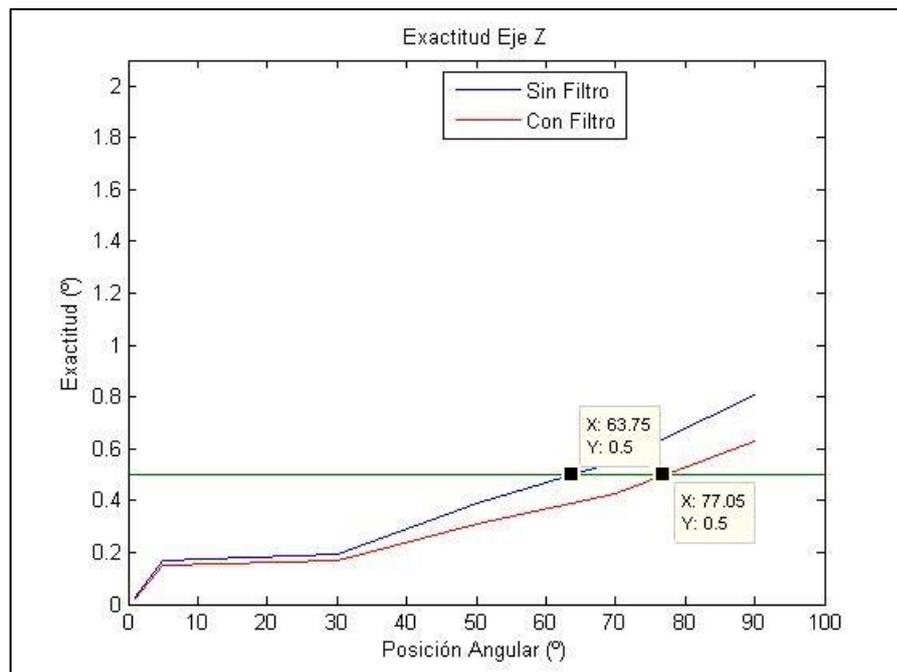


Figura 34. Gráfica de Resultados del Eje Z.

Al realizar las gráficas de los resultados de exactitud (Figura 34), se establece el rango de medición para cumplir con la exactitud recomendada.

Sin Filtro: Mov. Ang. Máx. γ_{aw} = $\pm 63.76^\circ$

Con Filtro: Mov. Ang. Máx. γ_{aw} = $\pm 77.05^\circ$

4.4. Exactitud en el tiempo

Las pruebas realizadas en el inciso 4.3 hacen referencia a movimientos de una duración menor a 2 segundos. A continuación se realizarán pruebas cualitativas para determinar la estabilidad del sistema para tiempos mayores y su exactitud.

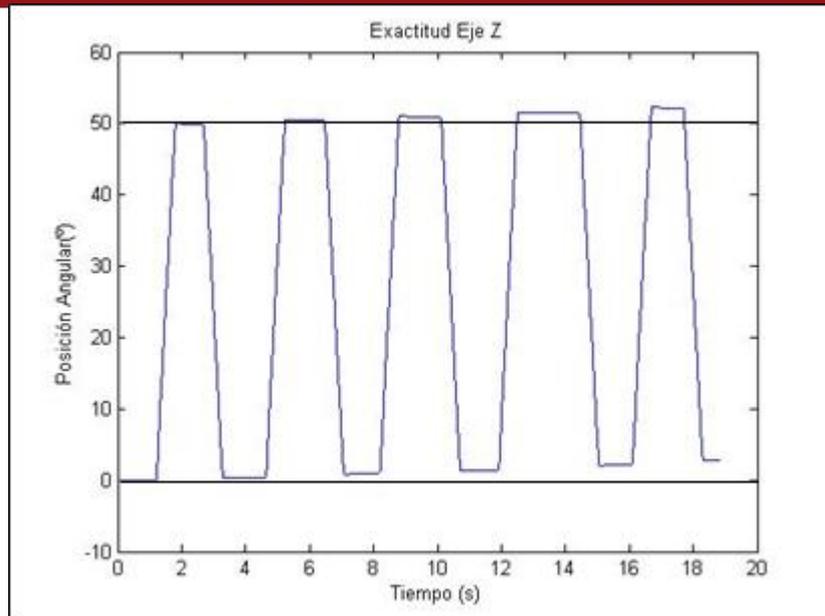


Figura 35. Movimiento repetido de 50°.

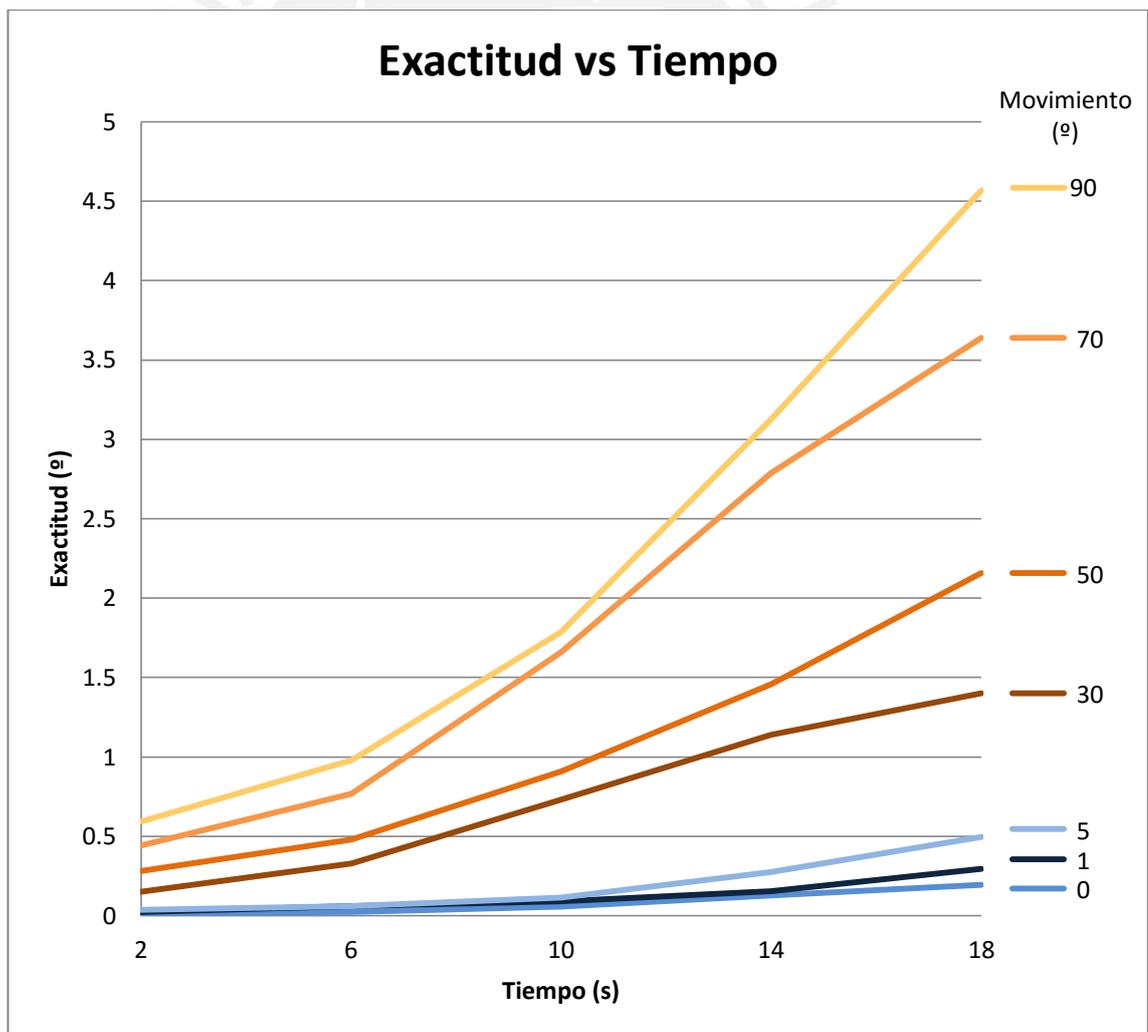


Figura 36. Exactitud vs Tiempo.

Para esta prueba se realizaron mediciones repetitivas continuas de rotaciones en el eje Z para movimientos de 1, 5, 30, 50, 70 y 90 grados, de una duración de 18 segundos cada una. En el gráfico del movimiento de 50° (Figura 35), se puede observar que a medida pasan los segundos, la señal va obteniendo un error de arrastre positivo afectando directamente a la exactitud de la medición.

Esto ocurre con las mediciones de los otros dos ejes, siendo el error de arrastre proporcional a la magnitud de movimiento angular realizado, como se aprecia en la Figura 36. Dentro de las referencias estudiadas, específicamente la [23], se puede encontrar información con respecto al ruido presente en los sistemas basados en giroscopios, donde el ruido es clasificado en 4 tipos: Angle Random Walk, Bias Instability, Rate Random Walk y/o Drift Rate Ramp. La falta de estabilidad del presente sistema puede ser causado por uno o más de los ruidos antes mencionados.

Para movimientos de 5° a menos (curvas de tonalidad azul), la exactitud aún se mantiene dentro del rango recomendado durante todo el tiempo de prueba, mientras que a partir de los movimientos de 30° (curvas de tonalidad naranja) se observa una gran pérdida de exactitud con respecto al tiempo, lo cual representa una limitación en la estabilidad del sistema.

4.5. Análisis de Resultados

Dentro del tiempo de pruebas de 2 segundos, los resultados demuestran una buena exactitud en la rotación del eje Z en comparación con la de los ejes X e Y del sensor. Se delimitan los movimientos angulares máximos para cada eje con el objetivo de cumplir con los requerimientos de exactitud expuestos en el punto 3.3.1:

Dentro de estos rangos de movimiento se confía en obtener una medición de posición angular correcta para la reconstrucción 3D por ultrasonido a mano alzada. Adicionalmente, se encontró que existe error de arrastre durante mediciones de mayor tiempo, lo cual presenta una limitación para el sistema. Para solucionar este error se requiere de un mayor estudio al ruido presente.

CONCLUSIONES

El sistema presentado en base a dispositivos MEMS sí logra cumplir los requisitos para ser implementado como sistema de medición de orientación de un transductor para la reconstrucción tridimensional a mano alzada y se logró mejorar la exactitud de las mediciones mediante la aplicación del TVD.

La configuración del sensor y programaciones del microcontrolador y el software permiten una lectura y almacenamiento de datos en tiempo real; mientras que el hardware diseñado e implementado es eficiente energicamente y solo requiere la alimentación por USB.

Los resultados son suficientemente exactos dentro de sus rangos de movimiento pero fuera de ellos, no son completamente confiables.

El rango de movimiento angular que cumple el requisito de la bibliografía para la rotación sobre el eje X (roll) es de $\pm 47.24^\circ$, sobre el eje Y (pitch) es de $\pm 41.73^\circ$ y para el eje Z (yaw) es de ± 77.05 .

Por otro lado se observó que el sistema pierde su estabilidad con el paso del tiempo, mostrado en la Figura 36. Esto significa que aún existe presencia de ruido luego del filtrado.

RECOMENDACIONES

Se recomienda usar el acelerómetro para comparar el movimiento angular y de esta manera reducir el ruido para obtener una mejor medición de la posición angular.

Se recomienda usar adicionalmente otro equipo de medición angular para comparar el ángulo medido por el giroscopio ya que los documentos técnicos del brazo robot con el que se realizaron los ensayos no brindan información sobre la repetitividad de desplazamiento angular por lo que no se puede asegurar que siempre realice el desplazamiento programado.

En cuanto al mejoramiento de la estabilidad del sistema con respecto al tiempo, se deben de estudiar los tipos de ruido mencionados en la sección 4.5 para solucionar de manera específica cada uno de acuerdo a sus orígenes y características.

Finalmente, otras recomendaciones con respecto al sistema descrito en el presente documento son la aplicación de filtros alternativos, como los mencionados en el Anexo 1, y la implementación de algoritmos para filtrar la señal en tiempo real, como por ejemplo, el Filtro de Kalman.

BIBLIOGRAFÍA

- [01] FENSTER, Aaron, Dónal B. DOWNEY y Neale H. CARDINAL.
2001 “Three-dimensional ultrasound imaging”. *Physics in Medicine and Biology*. Volumen 46, número 5, pp. 67–99.
- [02] QIU, Tao.
2011 “Freehand 3D ultrasound reconstruction for image-guided surgery”. *2011 International Symposium on Bioelectronics and Bioinformatics*. Suzhou, pp. 147-150.
- [03] DAHIYA, Nirvikar.
2010 “The basics of 3D/4D ultrasound”. *GE Healthcare*. Consulta: 06 de abril de 2012.
<http://www3.gehealthcare.com/en/support/support_documentation_library>
- [04] ROHLING, Robert, Andrew GEE y Laurence BERMAN
1999 “A comparison of freehand three-dimensional ultrasound reconstruction techniques”. *Medical Image Analysis*. Volumen 3, número 4, pp. 339–359.
- [05] D. A., Simon.
1997 “Intra-operative position sensing and tracking devices”. *Proceedings of the first joint CVRMed/MRCAS Conference*. pp. 62-64.
- [06] ASHRANI, Abdul, Yahya I., Mustaza S. M.
2008 “2D translation from a 6-DOF MEMS IMU's orientation for freehand 3D ultrasound scanning”. *IFMBE Proceedings*. Heidelberg, volumen 21, pp. 699–702.

- [07] DULAPA, Mark y William GLENN
1983 *Patente 4492119. Articulated arm ultrasound imaging systems.* Ohio.
- [08] NERNEY, Jacqueline y otros.
2000 "A real-time freehand 3D ultrasound system for image-guided surgery".
2000 IEEE Ultrasonics Symposium. California, volumen 2, pp. 1601-1604.
- [09] LIÉVIN, Mark y Erwin Keeve.
2001 "Stereoscopic augmented reality system for computer assisted surgery".
International Congress Series. Volumen 1230, pp. 107-111.
- [10] CREUZE, Vincent.
2011 "Distance and orientation measurement of a flat surface by a single underwater acoustic transducer".
2011 19th European Signal Processing Conference. Barcelona, pp. 1790-1794.
- [11] PARALLAX INC.
2012 "PING ultrasonic distance". Consulta: 02 de julio de 2012.
<<http://www.parallax.com/StoreSearchResults/tabid/768/txtSearch/ping/List/0/SortField/4/ProductID/92/Default.aspx>>
- [12] LINDSETH, Frank y otros.
2003 "Probe calibration for freehand 3-D ultrasound".
Ultrasound in Medicine & Biology. Volumen 29, número 11, pp. 1607-1623.
- [13] MELEXIS.
2012 "Triaxis general description". Consulta: 22 de junio de 2012.
<<http://www.melexis.com/triaxis>>

- [14] MIZELL, David.
2003 “Using gravity to estimate accelerometer orientation”. *Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers*. pp. 252-253.
- [15] HOUSDEN, Richard y otros.
2008 “Calibration of an orientation sensor for freehand 3D ultrasound and its use in a hybrid acquisition system”. *BioMedical Engineering OnLine*. Volumen 7, número 5, pp. 1-13.
- [16] MOUSER ELECTRONICS.
2012 “ST Microelectronics MEMS gyroscopes”. Consulta: 22 de junio de 2012. <<http://www.mouser.com/stmemsgyroscopes>>
- [17] LIU, Hongmei, Jianqi ZHANG.
2012 “Physical model for the dark current of quantum dot infrared photodetectors”. *Optics & Laser Technology*. Volumen 44, número 5, pp. 1536-1542.
- [18] GOLDSMITH, A., P. PEDERSEN y T. SZABO.
2008 “An inertial-optical tracking system for portable quantitative 3D ultrasound”. *IEEE International Ultrasonics Symposium*. Beijing, pp. 45-49.
- [19] PAPERNO, Eugene, Ichiro SACADA y Eduard LEONOVICH.
2012 “A new method for magnetic position and orientation tracking”. *IEEE Transactions on Magnetics*. Volumen 37, número 4, pp. 1938-1940.

- [20] HUANG, Xuguo, Ping SUN y Zhi WANG.
2011 “3-DOF MEMS gyroscope modeling and design”. *2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. Harbin, volumen 2, pp. 849-852.
- [21] BURG, Aaron y otros.
2011 “MEMS gyroscopes and their application”. *Introduction to Microelectromechanical System*. Harbin, pp. 1-20.
- [22] LOONEY, Mark.
2010 “A simple calibration for MEMS gyroscopes”. *EDN Network*. pp. 28-31.
Consulta: 22 de junio de 2012.
<<http://www.edn.com/design/sensors/4363439/A-simple-calibration-for-MEMS-gyroscopes>>
- [23] VAGNER, Martin.
2011 “MEMS gyroscope performance comparison using Allan variance method”. *Modern Methods and Approaches in Automation*. Brno, pp. 1-5.
- [24] UNIVERSIDAD DE JAÉN.
2005 *Área de Ingeniería de Sistemas y Automática: Curso 2005/2006. Reducción del ruido en una imagen digital*. Jaén.
- [25] CHANG, Honglong y otros.
2008 “An integrated MEMS gyroscope array with higher accuracy output”. *Sensors*. Volumen 8, número 4, pp. 2886-2899.

[26] ROHLING, Robert.

1998 *3D freehand ultrasound: reconstruction and spatial compounding.*
Disertación correspondiente al grado de Doctor de Filosofía.
Cambridge: Churchill College, Department of Engineering.

[27] ANALOG DEVICES.

2012 “MEMS inertial measurements units”. Consulta: 06 de abril de 2012.
<<http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-inertial-measurement-units/products/index>>

[28] EPSON.

2012 “New IMU ideal for embedding in industrial products”. Consulta: 06 de abril de 2012.
<http://global.epson.com/newsroom/2011/news_20110606>

[29] XSENS.

2012 “MTi”. Consulta: 06 de abril de 2012.
<<http://www.xsens.com/en/general/mti>>

[30] STMICROELECTRONICS.

2012 “LSM330DLC”. Consulta: 07 de abril de 2012.
<<http://www.st.com/internet/analog/product/252427.jsp>>

[31] STMICROELECTRONICS.

2011 *Documento ID 022162 Rev 1. LSM330DLC, iNEMO inertial module: 3D accelerometer and 3D gyroscope - preliminary data.*

[32] INVENSENSE.

2012 “MEMS gyroscopes for gaming”. Consulta: 29 de marzo de 2012.
<<http://invensense.com/mems/gaming.html>>

[33] INVENSENSE.

2011 *Documento número PS-MPU-6000A-00 Rev 3.2. MPU-6000 and MPU-6050 product specification revision. California.*

[34] MICROCHIP.

2006 *Documento número DS39630C. 8-bit PIC microcontroller solutions.*

[35] ATMEL.

2011 *Documento número Rev 2486Z-AVR-02/11. ATmega8, ATmega8L 8-bit AVR with 8Kbytes in system programmable flash.*

[36] PAN, Hu y Paul POLISHUK.

1998 "USB". *1394 Monthly Newsletter*. Volumen 2, número 4, pp. 1.

[37] TEXAS INSTRUMENTS.

2012 *Documento número 100919 SNOS412L. LM1117/LM1117I. Texas.*

[38] FTDI CHIP.

2010 *Documento número FT_000053 ver 2.10. FT232R USB UART IC. Glasgow.*

[39] KANDA.

2005 "Target circuit layouts". Consulta: 29 de marzo de 2012.
<<http://www.kanda.com/avr-isp-circuits.html>>

[40] INVENSENSE.

2011 *Documento número RM-MPU-6000A-00 Rev 3.2. MPU-6000 and MPU-6050 register map and descriptions. California.*

[41] ESHED ROBOTEC.

1999 *Documento número 100067 Rev B. SCORA-ER 14 user's manual.*

[42] WEISSTEIN, Eric.

2014 "Mathworld". *Wolfram Web*. Consulta: 14 de diciembre de 2014.
<<http://mathworld.wolfram.com/StandardDeviation.html>>

[43] OPPENHEIM, Alan, Ronald SCHAFER y Jhon BUCK.

1999 "Filter design techniques". En VITRANO, Sharyn (editor). *Discrete-Time Signal Processing*, 2da edición. New Jersey: Prentice Hall, pp. 439-540.

[44] MARTÍNEZ, M. y otros.

2009 *Filtros digitales Curso 2009-2010. Diseño de filtros FIR*. Valencia.

[45] UNIVERSIDAD DE MURCIA.

2008 "Técnicas de filtrado". Consulta: 29 de marzo de 2012.
<<http://ocw.um.es/ciencias/herramientas-de-teledeteccion-aplicadas-a-la/material-de-clase-1/tema-6-tecnicas-de-filtrado.pdf/view>>

[46] RUDIN, Leonid, Stanley OSHER y Emad FATEMI.

1992 "Nonlinear total variation based noise removal algorithms". *Physica D: Nonlinear Phenomena*. Volumen 60, número 1, pp. 259-268.

[47] GETREUER, Pascal.

2012 "Rudin-Osher-Fatemi total variation denoising using Split Bregman". *Image Processing On Line*. Volumen 2, pp. 74-95.