



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Unidad de medición inercial: estudio de  
fiabilidad y precisión.

Autor

Pablo Martínez Galindo

Director

Alfonso Blesa Gascón

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel  
2016

# **UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL: ESTUDIO DE FIABILIDAD Y PRECISIÓN**

## **RESUMEN**

El presente trabajo fin de grado constituye un estudio del funcionamiento de una unidad de medida inercial, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de los cuatro años de grado.

La unidad de medida inercial utilizada está compuesta por tres sensores: un acelerómetro, un magnetómetro y un giroscopio, los cuales vamos a utilizar para determinar ángulos de inclinación.

Con este estudio se pretende, para cada uno de los sensores, determinar los límites para un correcto funcionamiento, y establecer los rangos de operación dentro de los cuales podamos asegurar un determinado nivel de exactitud de las medidas realizadas.

Para ello ha sido necesaria la correcta calibración de cada dispositivo, utilizando diferentes métodos, para posteriormente realizar el estudio de fiabilidad de cada sensor.

Utilizando el lenguaje de programación C, y sobre una placa Raspberry Pi con su sistema operativo modificado para tener características de tiempo real gracias a la plataforma COSME, se han implementado diferentes algoritmos para la obtención de los ángulos de inclinación de la unidad inercial.

Mediante un estudio estadístico se ha obtenido para cada sensor su rango de funcionamiento óptimo, en función de la aplicación a la que esté destinado. Del mismo modo, basándose en las normas ISO 9000 para la calibración de equipos se han establecido las características que ofrecen las medidas de cada sensor.

# ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. ARQUITECTURA	3
3.1. ARQUITECTURA HARDWARE	4
3.2. ARQUITECTURA SOFTWARE	7
4. CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN	10
5. PROCESO DE MEDIDA	22
5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA	22
5.2. CÁLCULO DE ÁNGULOS	23
5.3. INSTRUMENTOS DE MEDIDA	28
6. RECOGIDA Y ANÁLISIS DE DATOS	32
6.1. ACELERÓMETRO	32
6.2. MAGNETÓMETRO	37
6.3. GIROSCOPIO	40
7. CONCLUSIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	49

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA CABLEADO RASPBERRY PI – IMU

FIGURA 2: PINES GPIO RASPBERRY PI

FIGURA 3: ESTRUCTURA SOFTWARE DEL SISTEMA

FIGURA 4: REGISTRO DATA\_FORMAT ADXL345

FIGURA 5: REGISTRO POWER\_CTL ADXL345

FIGURA 6: DECLINACIÓN MAGNÉTICA TERRESTRE TERUEL

FIGURA 7: MONTAJE CALIBRACIÓN MAGNETÓMETRO

FIGURA 8: GRÁFICO 1 CALIBRACIÓN MAGNETÓMETRO

FIGURA 9: GRÁFICO 2 CALIBRACIÓN MAGNETÓMETRO

FIGURA 10: ORIENTACIÓN EJES ADXL345

FIGURA 11: ORIENTACIÓN EJES HMC5883

FIGURA 12: ORIENTACIÓN EJES ITG3200

FIGURA 13: ESQUEMA FUERZAS GRAVEDAD

FIGURA 14: GONIÓMETRO

FIGURA 15: GONIÓMETRO 2

FIGURA 16: MONTAJE TRANSPORTADOR 1

FIGURA 17: MONTAJE TRANSPORTADOR 2

FIGURA 18: RANGO DE VALORES DE INCLINACIÓN EJE X ADXL345

FIGURA 19: RANGO DE VALORES DE INCLINACIÓN EJE Y ADXL345

FIGURA 20: GRÁFICO ÁNGULOS DE INCLINACIÓN CON INTERVALO DE

CONFIANZA EN EL EJE X ADXL345

FIGURA 21: GRÁFICO ÁNGULOS DE INCLINACIÓN CON INTERVALO DE CONFIANZA EN EL EJE Y ADXL345

FIGURA 22: GRÁFICO RANGO DE MEDIDA HMC5883

FIGURA 23: GRÁFICO ÁNGULOS DE DESVIACIÓN CON INTERVALO DE CONFIANZA HMC5883

FIGURA 24: DETALLE INTERVALO DE CONFIANZA MEDIDAS HMC5883

FIGURA 25: DERIVA EJE X ÁNGULO 90° ITG3200

FIGURA 26: DERIVA EJE Y ÁNGULO 60° ITG3200

FIGURA 27: DERIVA EJE Z ÁNGULO 60° ITG3200

FIGURA 28: DERIVA CORREGIDA EJE X ÁNGULO 90° ITG3200

FIGURA 29: DERIVA CORREGIDA EJE Y Y EJE Z ÁNGULO 60° ITG3200

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CONFIGURACIÓN RANGO MEDIDA ADXL345

TABLA 2: TAMAÑO LSB ADXL345

TABLA 3: VALORES ACELERACIONES EN POSICIÓN PERPENDICULAR

TABLA 4: VALORES OFFSET ADXL345

TABLA 5: CORRECCIÓN HARD IRON

TABLA 6: CORRECCIÓN SOFT IRON

TABLA 7: DATOS MEDIA Y VARIANZA EJE X ADXL345

TABLA 8: DATOS MEDIA Y VARIANZA EJE Y ADXL345

TABLA 9: INTERVALOS DE CONFIANZA ÁNGULOS ADXL345

TABLA 10: DATOS MEDIA Y VARIANZA HMC5883

TABLA 11: INTERVALOS DE CONFIANZA ÁNGULOS HMC5883

TABLA 12: EXPRESIONES DE LOS ÁNGULOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

ANEXO 1: CÓDIGO SENSORES ADXL345, HMC5883, ITG3200	1
ANEXO 2: VALORES DE CAMPO MAGNÉTICO CALIBRACIÓN MAGNETÓMETRO HMC5883	17
ANEXO 3: MEDIDAS ADXL 345	36
ANEXO 4: MEDIDAS HMC5883	45
ANEXO 5: MEDIDAS ITG3200	54

## 1.- INTRODUCCIÓN

En este trabajo fin de grado se va a poner en funcionamiento una unidad de medida inercial. Las unidades de medición inercial o IMU (del inglés, *Inertial Measurement Unit*) son dispositivos electrónicos cuyo objetivo es obtener mediciones de velocidad lineal, velocidad angular y aceleraciones para calcular la posición, inclinación y orientación de un objeto.

Se utilizan como componentes fundamentales en los sistemas de navegación de cualquier móvil en que sea necesario estimar estas mediciones.

En su mayoría están formadas por un conjunto de acelerómetros y giroscopios, que obtienen datos de uno o más ejes ortogonales y los envía a un sistema computarizado que realiza los cálculos necesarios para obtener las estimaciones de aceleración, velocidad y rotación requeridas.<sup>1</sup>

El objetivo del trabajo es calibrar el dispositivo y realizar un estudio sobre la fiabilidad de sus medidas, es decir, conocer los límites de cada sensor para saber en qué rangos se pueden realizar mediciones, y conocer las características de estas medidas como pueden ser la exactitud o el rango de medida.

Para ello se van a obtener los ángulos de inclinación medidos por cada sensor, los cuales se pueden comprobar y cuantificar la diferencia entre los valores medidos y los reales.

Se van a diseñar unos algoritmos, implementados en código C, que se ejecutarán sobre una Raspberry Pi Model 2 a la cual se le ha modificado el kernel de su sistema operativo y que se ejecutará sobre la plataforma Cosme para que el sistema tenga características de tiempo real.

---

1 Información extraída de <http://smartdreams.cl/unidad-de-medicion-inercial-imu/>

Con los valores obtenidos de cada sensor y mediante una serie de operaciones se calculan los ángulos de inclinación, que serán comparados con los valores reales para realizar el estudio.

Para llevar este estudio a cabo se necesita poner en práctica varias de las aptitudes adquiridas en el grado, como pueden ser los conocimientos de programación y administración avanzada de Linux para la parte software, de instrumentación electrónica y de física para la calibración de los dispositivos o estadística para realizar el estudio.

## 2.- OBJETIVOS

El objetivo del proyecto reside en calcular ángulos de inclinación a través de las medidas proporcionadas por una IMU, y determinar las características de estas medidas.

Como la IMU está formada por tres sensores diferentes, se pondrán en funcionamiento por separado para poder realizar la calibración de la manera más precisa posible.

Lo primero que se va a realizar es la puesta en marcha de los sensores, es decir, establecer comunicación con la Raspberry Pi mediante el bus I<sup>2</sup>C y leer los datos que proporciona cada sensor. El segundo paso será convertir esos datos a unidades del Sistema Internacional que puedan ser interpretadas.

Estas medidas serán: unidades de aceleración para el acelerómetro (m/s<sup>2</sup>), unidades de densidad de flujo magnético para el magnetómetro (Gauss en el Sistema Cégesimal o Tesla en el Sistema Internacional) y unidades de

velocidad angular para el giroscopio ( $^{\circ}/\text{segundo}$ ).

Posteriormente con las medidas de cada sensor en las unidades que interesan, se van a realizar una serie de cálculos para obtener los ángulos. Con el acelerómetro, en función de la aceleración en cada eje, se puede determinar la inclinación instantánea respecto de los ejes X e Y. Con el magnetómetro se calculará la desviación respecto del norte magnético en grados, en función de la densidad de flujo magnético que haya en los ejes X e Y. Por último con el giroscopio, se puede calcular en cada eje el ángulo rotado desde una posición inicial, en función de la velocidad angular de cada eje.

La segunda parte del proyecto consiste en analizar los ángulos calculados para acotar el rango de funcionamiento de cada sensor. Se ha realizado el estudio de cada sensor por separado, ya que cada uno tiene diferentes modos de configuración, y cada magnitud a medir, unas limitaciones diferentes.

Finalmente se recogerá toda esta información indicando, en función de la aplicación que se vaya a desarrollar, qué sensor utilizar, el error cometido con cada uno y el rango de medida que es capaz de medir.

### 3.- ARQUITECTURA

Se entiende por arquitectura de un sistema a la parte hardware y software de los que está compuesto éste. En el presente proyecto se utiliza una Raspberry Pi Model B+ con un sistema operativo Debian que se ha modificado, gracias a

la plataforma COSME, para que el sistema tenga características de tiempo real. La unidad inercial utilizada es la *Sparkfun SensorStick 9DOF*, compuesta por el acelerómetro *ADXL345* de *Analog Devices*, el magnetómetro *HMC5883* de *Honeywell* y el giroscopio *ITG3200* de *Invensense*.

### 3.1.- ARQUITECTURA HARDWARE

Raspberry Pi es un ordenador de placa reducida de bajo coste desarrollado en Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, con el objetivo de estimular la enseñanza de ciencias de la computación.<sup>2</sup>

El modelo utilizado es una Raspberry Pi Model B+, la cual lleva un procesador Broadcom BCM2835. Incorpora una GPU VideoCore IV. La memoria RAM es de 512 MegaByte y en lugar de disco duro almacena la información en una tarjeta microSD.

Cuenta con un puerto Ethernet RJ45 y salida de audio y video HDMI. Incorpora también cuatro puertos USB 2.0 y 40 pines en el puerto GPIO, entre los que se encuentran los puertos referentes a la comunicación I<sup>2</sup>C y los pines de 3.3V, de 5V y el GND.<sup>3</sup>

El módulo inercial es la base de este proyecto. Se trata de el *SparkFun 9DOF Sensor Stick*, un IMU de nueve grados de libertad que incorpora tres sensores, un acelerómetro, un magnetómetro y un giroscopio. La unidad inercial está montada en una tarjeta con cuatro pines, dos para la alimentación

---

2 Información extraída de [https://es.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://es.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)

3 Información extraída de [http://www.pcccomponentes.com/raspberry\\_pi\\_modelo\\_b\\_.html](http://www.pcccomponentes.com/raspberry_pi_modelo_b_.html)

(VCC y GND) y otros dos para la comunicación (SCL y SDA).<sup>4</sup>

El acelerómetro que incorpora la IMU es el ADXL345 de *Analog Devices*. Los acelerómetros son dispositivos electromecánicos que detectan las fuerzas de aceleración, ya sea estática o dinámica.

El ADXL345 es un acelerómetro digital de tres ejes, pequeño y delgado, con un consumo de energía bajo. Con una resolución de hasta 13 bits puede llegar a medir aceleraciones de  $\pm 16$  g. Esta resolución de 4 mg/LSB permite medir ángulos de inclinación de menos de 1,0º.<sup>5</sup>

El magnetómetro del que dispone esta IMU es el modelo HMC5883 del fabricante *Honeywell*. Los magnetómetros son sensores que miden la intensidad del campo magnético (en gauss) al cual son sometidos.

Este sensor de tres ejes está diseñado para la detección de campos magnéticos débiles. Con una resolución de 12 bits, presenta un rango de medida de hasta  $\pm 8$  gauss.<sup>6</sup>

El giroscopio es el último sensor que incorpora nuestra IMU. Los giroscopios o giróscopos son pequeños sensores que miden la velocidad angular de un eje en rotación.

La IMU incorpora el ITG-3200 de *InvenSense*, un giroscopio digital de tres ejes con una resolución de 16 bits que permite detectar velocidades de hasta 2000º/sec. El sensor incluye un filtro paso bajo programable.<sup>7</sup>

---

4 Información extraída de <https://www.sparkfun.com/products/10724>

5 Datasheet del sensor. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>

6 Datasheet del sensor. <https://www.seeedstudio.com/wiki/images/4/42/HMC5883.pdf>

7 Datasheet del sensor. <http://www.invensense.com/products/motion-tracking/3-axis/itg-3200/>

La comunicación con la unidad de medición inercial se realiza mediante el puerto I<sup>2</sup>C. El I<sup>2</sup>C es un bus de datos que se utiliza principalmente para la comunicación entre diferentes partes de un circuito. Está diseñado como un bus maestro-esclavo donde la transferencia de datos es siempre iniciada por el maestro y el esclavo reacciona. Utiliza dos líneas de señal, la de reloj (SCL) y la de datos (SDA), que se encuentran en los pines 5 y 3 de la Raspberry respectivamente.<sup>8</sup>

En este sistema la Raspberry Pi desempeña el papel de maestro, mientras que la unidad inercial es el esclavo. En la *Figura 1* se muestra el esquema de cableado entre la Raspberry Pi y la IMU. En la *Figura 2* se muestran detallados todos los pines del puerto GPIO.

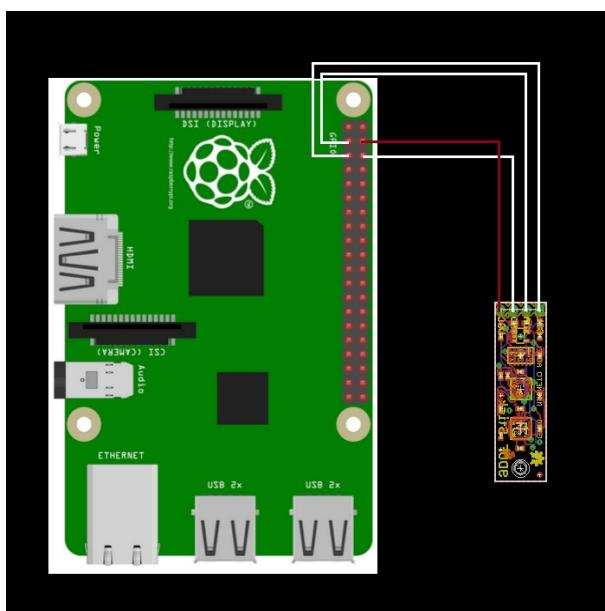


FIGURA 1

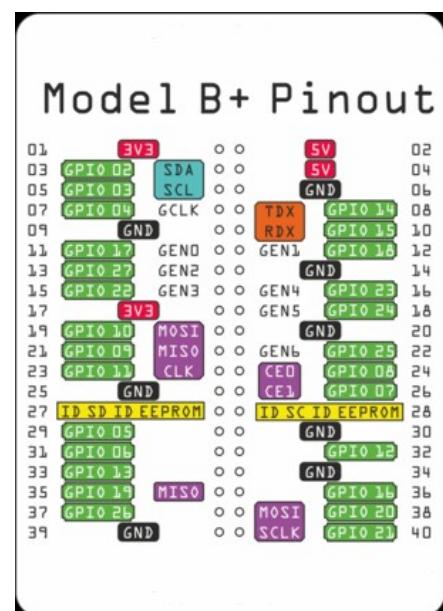


FIGURA 2<sup>9</sup>

La Raspberry Pi se encuentra a la izquierda de la *Figura 1*. En la parte inferior de la tarjeta se localizan los cuatro puertos USB y el puerto Ethernet. En la

8 Información extraída de <https://es.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>

9 Imagen extraída de <http://www.keytosmart.com/raspberry-pi-b-gpio-details-pinout/>

parte izquierda se sitúan los conectores de audio y HDMI, el puerto para la cámara y el conector de la fuente de alimentación. En la parte superior se sitúa el conector para el display LCD, y en la parte derecha los 40 pines del puerto GPIO. Únicamente se utilizan cuatro pines, los dos del bus I<sup>2</sup>C, el de 5V y el GND.

A la derecha de la imagen se encuentra el esquemático de la IMU. De derecha a izquierda, los tres cables blancos que salen de la IMU unen las salidas de datos SCL, SDA y GND con sus respectivos pines 5, 3 y 6 de la GPIO. El cable rojo une el pin de 5V de la GPIO (pin 4) con el de la IMU.

### 3.2 ARQUITECTURA SOFTWARE

El sistema operativo utilizado por la Raspberry Pi está basado en el núcleo Linux, concretamente una versión derivada de Debian denominada Raspbian, la cual está optimizada para el hardware de Raspberry Pi. Están disponibles otros sistemas operativos, pero en este proyecto se utiliza la versión Raspbian. Para el proyecto que se va a implementar sobre esta plataforma, se necesita que el sistema trabaje a tiempo real. Para ello han sido necesarias unas modificaciones sobre el sistema operativo.

El siguiente esquema muestra la estructura software del sistema:

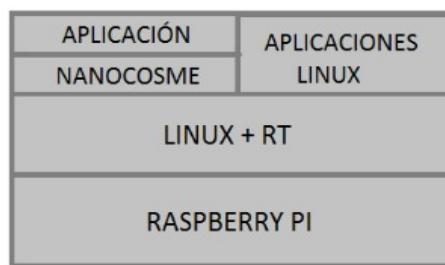


FIGURA 3

Sobre la plataforma Raspberry Pi se ejecuta un sistema operativo Linux al que se le ha modificado el kernel para tener características de tiempo real. El sistema operativo se encarga de gestionar todas las aplicaciones en funcionamiento, como pueden ser un procesador de textos o un navegador web. De forma paralela, la plataforma COSME se encarga de ejecutar la aplicación principal, garantizado el periodo de ejecución de ésta, y su prioridad sobre las demás aplicaciones del sistema. De esta forma sobre la Raspberry Pi se está ejecutando la aplicación principal con características de tiempo real, además de poder utilizar el resto de aplicaciones del sistema operativo Linux.

El software de la unidad inercial ha sido implementado en código C. La aplicación que se ejecuta sobre la plataforma COSME diferencia tres funciones principales. La función de *inicialización* se ejecuta una única vez al lanzar la aplicación. En esta función se configuran los registros de cada sensor. La función *periódica* que se ejecuta con un periodo determinado mientras la aplicación está en funcionamiento. Es en esta función donde se llama a otras funciones, encargadas de obtener los datos de los sensores, y de manipularlos. Por último la función *finalización*, que se ejecuta una vez cuando la aplicación es detenida.

Se ha implementado para cada sensor el código por separado. En el Anexo 1 está el código C para cada uno de los sensores. Cuando se ejecuta la aplicación correspondiente al acelerómetro se ejecuta en primer lugar la *funcion\_inicialización*. En esta función se configuran todos los

registros y se escoge el rango de funcionamiento del sensor con la constante *DATA\_FORMAT*.

En segundo lugar se ejecuta la *funcion\_periodica*, función que se ejecuta periódicamente con un periodo fijado por el usuario al lanzar la aplicación desde la consola de Linux. Esta función llama en primer lugar a la función *rutinaAcel*. En esta rutina se leen los datos del sensor, y se manipulan para obtener el ángulo de inclinación. Para ello se lee el valor del registro *INT\_SOURCE*, y si el valor es 131 quiere decir que ha finalizado la conversión del sensor y los datos están listos. Para cada eje el acelerómetro suministra los datos en dos registros de ocho bits, que son juntados en una sola variable. Esta variable es dividida por la sensibilidad del sensor, valor que varía en función del rango de medida. Se le aplica el filtro paso bajo, se convierte a unidades del sistema internacional y por último se calculan los ángulos. Se manipulan los valores de los ángulos para obtenerlos en un rango de 0-360º o de -180-+180º.

En segundo lugar la *funcion\_periodica* llama a la función *rutinaIntervalos*, en la cual se manipulan los valores de los ángulos para obtener una resolución de 5º o 10º.

Cuando se detiene la aplicación se ejecuta la *funcion\_finalizacion* que cierra los ficheros abiertos

La estructura del código es la misma para el giroscopio y el magnetómetro.

Para el magnetómetro se diferencian dos funciones a las cuales llama la *funcion\_periodica*. En primer lugar la función *rutinaMagne*, rutina que lee los

datos del sensor de forma análoga a cómo se hace con el acelerómetro, y calcula el *heading*. En segundo lugar está la función *rutinaAngulo* que calcula el ángulo girado.

Para el giroscopio se diferencian dos partes dentro de la *funcion\_periodica*, la parte de calibración y la parte de medida. Durante los primeros 200 periodos se llama a la función *rutinaCalibracion* que determina el offset inicial de cada eje. Posteriormente se llama a la *rutinaGyro* que lee los datos del sensor del mismo modo que se hace para los otros dos sensores y calcula el ángulo girado.

#### 4.- CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN

El acelerómetro ADXL345 presenta un amplio abanico de funciones y aplicaciones, como la detección de caída libre o la detección de actividad, pero únicamente se va a utilizar para obtener los valores de aceleraciones en los tres ejes.

El primer paso es configurar el sensor de forma que satisfaga las necesidades de la aplicación. En la página 14 del datasheet del sensor se encuentran las direcciones de memoria correspondientes a cada registro.

En la posición 0x31 se encuentra el registro *DATA\_FORMAT*. Se trata de un registro de ocho bits que permite escoger la resolución del sensor y el rango de medida, entre otros parámetros. Con el bit 3 se escoge la resolución del sensor. Si el valor de este bit es 1 el sensor está en el modo de máxima resolución, mientras que si este bit está a 0 el sensor tiene una resolución de 10 bits. Se ha configurado para que trabaje con una resolución de 10 bits.

### ***Register 0x31—DATA\_FORMAT (Read/Write)***

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SELF_TEST	SPI	INT_INVERT	0	FULL_RES	Justify	Range	

FIGURA 4

El rango de salida puede escogerse de  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$  y  $\pm 16$  g, modificando los valores de los bits 0 y 1 del registro. La siguiente tabla muestra los valores que han de asignarse a estos bits en función de la resolución deseada.

BIT 1	BIT 2	RANGO (G)
0	0	$\pm 2$
0	1	$\pm 4$
1	0	$\pm 8$
1	1	$\pm 16$

TABLA 1

En la posición 0x2D se encuentra el registro *POWER\_CTL*, un registro de ocho bits que permite configurar los modos de consumo y de medida del sensor.

### ***Register 0x2D—POWER\_CTL (Read/Write)***

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	Link	AUTO_SLEEP	Measure	Sleep	Wakeup	

FIGURA 5

Los bits 7, 6, 5, 1 y 0 se dejan con su valor por defecto. El bit 4 *AUTO\_SLEEP* está configurado con el valor 0, de manera que se encuentra deshabilitada la opción de entrar en modo reposo. El bit 3 *Measure* se configura con el valor 1, de modo que el sensor se encuentra en el modo de medida normal. El bit 2 *Sleep* se configura con el valor 0 para que el sensor este en el modo normal de

operación.

El segundo paso es obtener las medidas proporcionadas por el sensor e interpretarlas. Como el sensor se ha configurado para que la resolución siempre sea de 10 bits, en función del rango de medida se tendrá un tamaño de LSB diferente.

<b>Rango de medida</b>	<b>LSB/g</b>
$\pm 2g$	256
$\pm 4g$	128
$\pm 8g$	64
$\pm 16g$	32

\* Estos valores pueden variar. Más detalles en la página 3 del datasheet.

TABLA 2

Los valores leídos del acelerómetro, en los tres ejes, serán divididos por los valores anteriores en función del rango seleccionado. De esta forma se obtiene el valor de la aceleración en fuerzas G, que se convierte en unidades del sistema internacional multiplicándolos por el valor de la aceleración de la gravedad ( $9,80665 \text{ m/s}^2$  ).

$$\text{Aceleración en G's} = (1/\text{sensibilidad}) * \text{valor leído del sensor}$$

$$\text{Aceleración en m/s}^2 = \text{Aceleración en G's} * 9,80665$$

El sensor dispone de tres registros para su configuración inicial, los cuales sirven para compensar el offset. Los registros OFSX, OFSY y OFSZ se encuentran en las posiciones 0x1E, 0x1F y 0x20 respectivamente. Cada uno de

ellos es un registro de ocho bits, en formato de complemento a2, mediante el cual se compensa el offset inicial, con un factor de escalado de 15.6 mg/LSB.

Para cuantificar el offset inicial se coloca el sensor en una plataforma de modo que los ejes del acelerómetro queden perpendiculares a la superficie terrestre, de modo que en ese eje la aceleración debe de ser 1g. Esto se hace para las seis diferentes posiciones, es decir, se colocan los tres ejes perpendiculares a la superficie, y cada eje en sentido positivo y negativo. Se realizan 200 medidas para cada una de las seis posiciones, y se obtienen los valores medios de aceleración en fuerzas G para cada eje. La siguiente tabla muestra los resultados:

Unidades en G's	Eje X +	Eje X -	Eje Y +	Eje Y -	Eje Z +	Eje Z -
<b>Eje X</b>	1,06	-1,01	0,04	0,07	0,08	0,07
<b>Eje Y</b>	0,06	0,06	1,05	-0,97	0,03	0,03
<b>Eje Z</b>	0,08	0,09	0,09	0,06	1,05	-0,94

TABLA 3

Con estos valores se calcula el promedio del offset en cada eje, que será el valor a introducir en los registros:

Valor del offset	Eje X	Eje Y	Eje Z
G's	0,051	0,043	0,071
mG's	51	43	71
LSB	3	3	5

TABLA 4

Estos valores serán restados a los datos proporcionados por el sensor, es decir,

tendrán signo negativo en los registros, que están en formato de complemento a2:

$$OFSX = 0b11111101$$

$$OFSY = 0b11111101$$

$$OFSZ = 0b11111011$$

Una característica propia de todos los acelerómetros que no puede eliminarse, pero si corregirse, es la baja repetibilidad de medida. Consiste en que los datos proporcionados por el sensor fluctúan, por lo que es necesario aplicar un filtrado paso bajo mediante software, de forma que el valor actual sea una estimación entre los valores anteriores y el medido en ese instante.

La ecuación correspondiente al filtro software es:

$$\text{aceleración_filtrada} = \text{alpha} * \text{aceleración_leída} + (1 - \text{alpha}) * \text{aceleración_anterior}$$

Al parámetro alpha se le denomina factor de suavizado y debe estar comprendido entre 0 y 1, en función de cual sea la medida a la que se le vaya a dar mayor importancia en el filtrado. El valor utilizado es 0,35 y se consigue reducir la fluctuación en un 42%.

La configuración del magnetómetro HMC5883 es simple, no tiene demasiados registros ni opciones entre las que escoger. Dispone de tres registros para configurar el sensor en función de la aplicación. En la página 11 del datasheet aparecen las direcciones de memoria de todos los registros.

En la posición 00 se encuentra el registro *Configuration Register A*, registro de ocho bits que permite configurar la frecuencia de salida de los

datos y el modo de medida. Se ha configurado con el valor 0x08 para que la frecuencia de salida sea de 3Hz, y el modo de medida normal. En las tablas 8 y 9 del datasheet se encuentran las diferentes opciones de configuración.

En la posición 01 se encuentra el registro *Configuration Register B*, registro de ocho bits que permite seleccionar el rango de medida del sensor. Se configura con el valor 0x00 estableciendo un rango de  $\pm 0,9$  gauss. Este rango es suficiente ya que para determinar los ángulos de inclinación se van a utilizar los valores del campo magnético terrestre, que se encuentra en el rango de 0,25 – 0,65 gauss.

En la posición 02 se encuentra un registro de ocho bits, *Mode Register*, que permite seleccionar el modo de operación del sensor. Se configura en el modo de medida continua con el valor 0x00.

Un primer problema que presentan estos sensores, es que al ser sensibles a campos magnéticos tan débiles, deben estar alejados de superficies metálicas o imanes permanentes, o en caso de que vayan a operar cerca de éstos tenerlo en cuenta y compensar los efectos.

Antes de comenzar a realizar medidas, se debe llevar a cabo la calibración del sensor, lo cual engloba un proceso complejo. En primer lugar, debido a que se quiere usar el magnetómetro para medir el débil campo magnético de la Tierra deben tenerse en cuenta ciertos puntos importantes.

El vector flujo no apunta directamente al Norte, está desplazado. Dependiendo de dónde nos encontremos variará el ángulo de desviación. La

declinación magnética en un punto de la Tierra es el ángulo comprendido entre el norte magnético y el norte verdadero (geográfico). Se puede decir que la declinación magnética es la diferencia entre el norte geográfico y el indicado por una brújula. Debe tenerse en cuenta el valor de este parámetro en la zona donde se va a utilizar el magnetómetro.

El ángulo de declinación se obtiene en función de la latitud y longitud. Los valores para Teruel de Latitud y Longitud son  $40^{\circ} 24' 44''$  y  $1^{\circ} 06' 23''$  [Oeste] respectivamente, con lo que se que el ángulo de declinación es  $0^{\circ} 14'$  [Oeste]. Estos valores pueden obtenerse en la página web del instituto geográfico nacional:

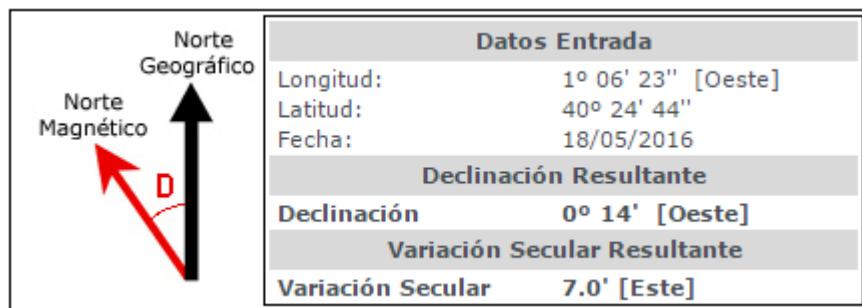


FIGURA 6

Si se hace la conversión,  $0^{\circ} 14'$  equivalen a  $0,233^{\circ}$ , o lo que es lo mismo a  $4,072$  mili radianes, valor que será sumado al “*heading*” obtenido. Se entiende como *heading* a la desviación respecto del norte magnético.

Para calcular el *heading* se utilizan los valores de campo magnético en los ejes X e Y, siendo igual al arctangente entre el valor del campo en Y y en X.

$$\text{Heading} = \text{atan2}(\text{valor campo Y}, \text{valor campo X})$$

En segundo lugar debido a las distorsiones del campo magnético terrestre, es necesario realizar lo que se denomina calibración *hard iron* y *soft iron*. Si estos efectos no aparecen, al rotar el sensor 360º y representar los valores de Y frente a los de X se debería obtener una circunferencia perfecta centrada en el origen.

Con el sensor ya en funcionamiento, se rota 360º sobre la superficie de la imagen, de forma que el eje de rotación se mantiene inmóvil.

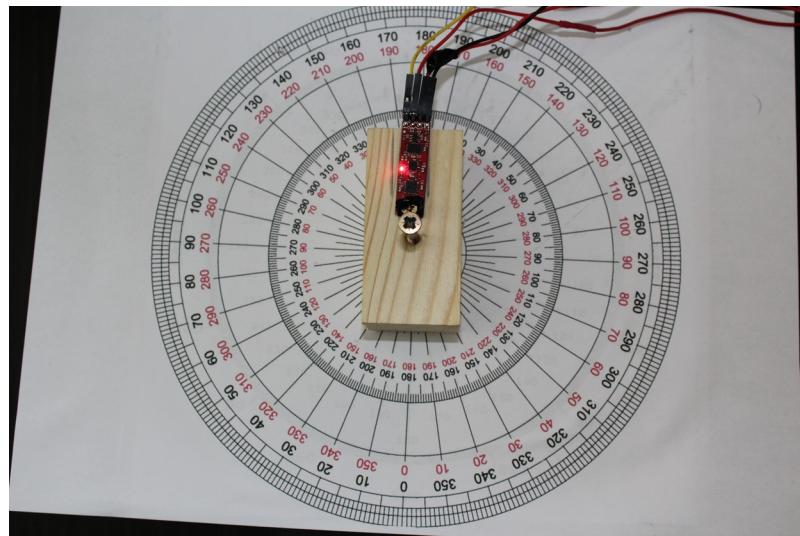


FIGURA 7

En el Anexo 2 se encuentran los valores de campo magnético en los ejes X e Y durante toda la rotación. Estos valores, son representados en un gráfico de dispersión con la intención de obtener un círculo perfecto centrado en el origen. Si no es así, se calcularán los parámetros para la corrección, y volverán a realizarse las medidas y representarse para ver si los efectos se corrigen.

Se realizan las primeras mediciones y se obtiene el siguiente gráfico:

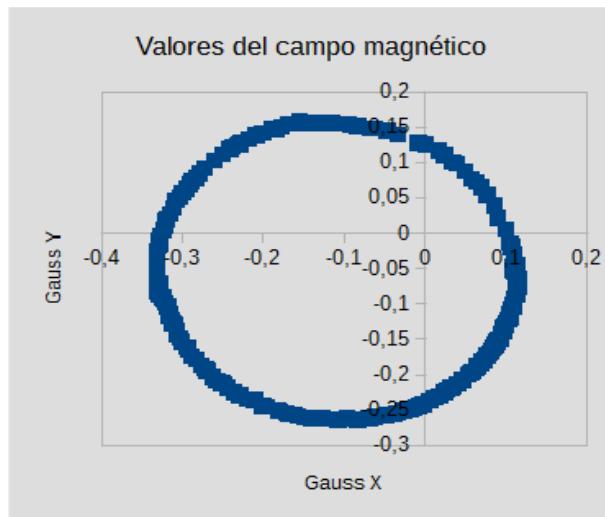


FIGURA 8

El gráfico obtenido es una elipse, y no está centrada en el origen. En primer lugar se debe conseguir que la elipse esté centrada en el origen. Esto se consigue con la denominada calibración *hard iron*. Para ello se calculan dos parámetros, *alpha* y *beta*, a partir de los valores máximos y mínimos de campo magnético en cada eje de modo que:

$$\alpha = (X_{\max} + X_{\min}) / 2$$

$$\beta = (Y_{\max} + Y_{\min}) / 2$$

### CORRECCIÓN HARD IRON

#### FACTORES DE CORRECCIÓN OBTENIDOS

X MAX	0,114579
X MIN	-0,331884

Y MAX	0,15804
Y MIN	-0,263839

ALPHA	-0,1086525
-------	------------

BETA	-0,0528995
------	------------

LOS FACTORES DE CORRECCIÓN SON RESTADOS A LOS VALORES EN GAUSS PROPORCIONADOS POR EL SENSOR

TABLA 5

Estos factores de corrección son restados a las medidas en gauss obtenidas por el sensor, de manera que el valor del campo magnético en X será igual al valor leído del magnetómetro menos el factor de corrección *alpha*, y del mismo modo para el eje Y restándole el factor de corrección *beta*.

La segunda parte de la corrección consiste en convertir la elipse en una circunferencia. Para ello se aplica la denominada calibración *soft iron*. Consiste en calcular el parámetro *sigma*, que es igual al cociente entre el radio X de la elipse y el radio Y, siendo estos las diferencias entre los valores máximos y mínimos de cada eje.

<b>CORRECCIÓN SOFT IRON</b>	
RADIO X	0,2232315
RADIO Y	0,2109395
SIGMA	1,0582726327

TABLA 6

Una vez calculado el parámetro *sigma*, al ser mayor que la unidad, se dividirán los valores de X por este valor (o multiplicar los de Y). Si fuese menor que la unidad se haría la operación inversa.

Con los valores de los parámetros *alpha*, *beta* y *sigma* calculados se introducen en el código y se vuelve a realizar el giro de 360º del sensor. Se representan de forma análoga los valores X e Y y se obtiene el siguiente gráfico:

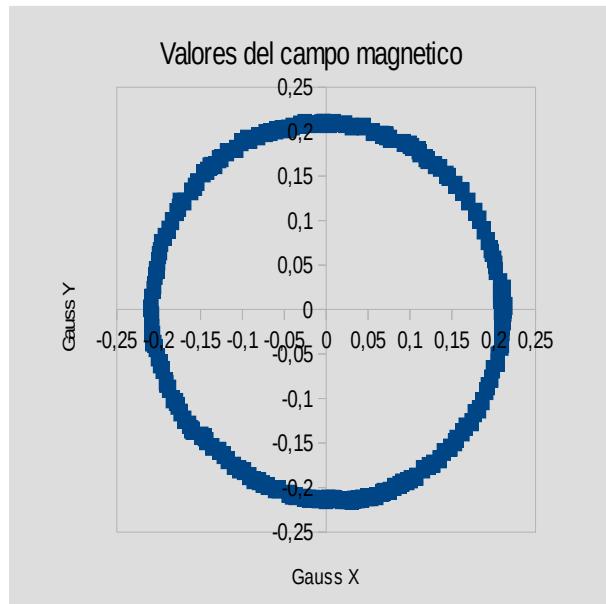


FIGURA 9

En el gráfico resultante se observa como se han corregido los problemas anteriores. La circunferencia está centrada en el origen. Tanto en el eje X como en el eje Y el valor máximo y mínimo están a la misma distancia del centro. Además ambos ejes tienen el mismo radio, lo que indica que el gráfico resultante es una circunferencia.

Hay que tener en cuenta que este proceso de calibración del magnetómetro hay que realizarlo siempre que se vaya a cambiar la zona de trabajo por posibles variaciones del campo magnético de la zona, ya que por ejemplo, en el laboratorio donde han sido realizadas las medidas la intensidad de campo magnético es ligeramente mayor .

Para la configuración inicial del giroscopio únicamente se debe seleccionar la frecuencia de muestreo y la banda de paso del filtro paso bajo. Para ello se utilizan los registros *SMPLRT\_DIV* (posición 0x15) y *DLPF\_FS*

(posición 0x16). Sendos registros se configuran con los valores 0x07 y 0x1E respectivamente, estableciendo una frecuencia de muestro de 125Hz y un banda de paso del filtro paso bajo de 5Hz.

Los giroscopios se caracterizan por ser dispositivos muy fiables. De los tres sensores de los que dispone la unidad inercial, el giroscopio es el que proporciona unas medidas mas exactas, con el inconveniente de que con el tiempo va acumulando un error. Este efecto se conoce como deriva. Si se quisiera utilizar la unidad inercial completa para estabilizar algún mecanismo o para determinar la orientación, se corregiría la deriva del giroscopio con las medidas del acelerómetro y del magnetómetro, pero en este proyecto se va a tratar de acotar el efecto de la deriva en el tiempo, es decir, determinar cómo aumenta el efecto de este fenómeno en función del tiempo.

Este sensor no ofrece la posibilidad de iniciar con unos valores de offset como el acelerómetro, por lo que ese offset inicial tiene que ser determinado.

Para ello, cuando se ejecuta el programa, el sensor calcula la media de las 200 primeras medidas para los tres ejes. Estos valores los almacena como valores de offset iniciales, que serán restados a las medidas obtenidas durante la ejecución de la aplicación. Cada vez que se ejecute la aplicación realizará este proceso, y para que los valores obtenidos sean útiles el sensor debe estar lo mas quieto posible, sin detectar ningún tipo de rotación en ningún eje.

Es un proceso análogo al del acelerómetro, con la diferencia de que en el acelerómetro se realiza una vez y se configuran los registros de offset, y con el giroscopio, como no dispone de registros de offset, se calcula este offset en la rutina de inicialización y se guardan como variables del sistema.

## 5.- PROCESO DE MEDIDA

En este apartado se va a explicar qué ángulos se calculan con cada sensor, y qué método se va a utilizar para calcularlos. Tiene que tenerse en cuenta que la intención del proyecto es, mediante los ángulos que se obtienen, realizar un estudio sobre el funcionamiento de cada sensor.

### 5.1.- CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA

Cuando se realiza la calibración de cualquier equipo de medida, debe llevarse a cabo según unas directrices y establecer ciertos parámetros que garanticen la calidad de ese equipo de medida. Es la norma ISO 9000, que se encarga de establecer los sistemas de gestión de calidad, la que regula estos procesos de calibración. Cuando se calibra un instrumento de medida, se deben determinar ciertos parámetros que aseguren la calidad de la medida.

Se van a incluir en este estudio algunos de estos parámetros, mediante los cuales se puede determinar la calidad de las medidas obtenidas con los sensores.

- Rango de medida (range): el rango define los valores mínimo y máximo de lectura.
- Exactitud (accuracy): es la capacidad de un instrumento de acercarse al valor de la magnitud real. Para expresar esto, se indica el intervalo dentro del cual puede recaer el valor real del mensurando.
- Zona muerta (dead space): la zona muerta de un instrumento se define como el rango de entrada para el cual no se obtiene lectura en la salida.

Estos son los parámetros que interesan para caracterizar las medidas de los ángulos obtenidos con cada sensor. Hay que tener en cuenta que los sensores con los que se trabaja ya vienen calibrados por el fabricante, pero dan información sobre las magnitudes que están midiendo, no sobre los ángulos que se van a calcular a partir de estas magnitudes.<sup>10</sup>

## 5.2.- CÁLCULO DE ÁNGULOS

Con el acelerómetro se van a calcular los ángulos de inclinación respecto del eje X e Y de este sensor. Se ha realizado un montaje donde se pondrá el acelerómetro para poder medir dichos ángulos. En la siguiente imagen se muestran los ejes del acelerómetro:

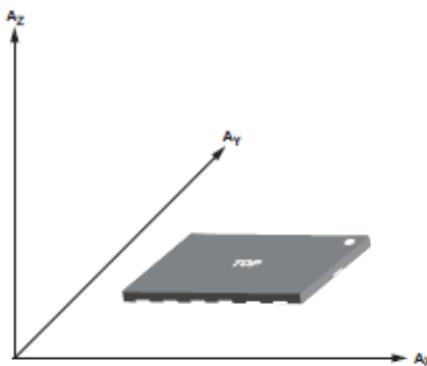


FIGURA 10

Por lo tanto, el sensor se colocará en una posición inicial con un ángulo de inclinación nulo, es decir, paralelo a la superficie, y se irá inclinando respecto a uno de los dos ejes.

El magnetómetro se utiliza para determinar el ángulo girado, respecto de la posición inicial, en el eje Z, es decir, el eje perpendicular a la superficie. Los

---

10 Información extraída de <http://www.eni.es/wp-content/uploads/items/6-Calibraci%C3%B3n%20equipos%20de%20medida%20seg%C3%BAn%20ISO%209000.pdf>

ejes del magnetómetro están dispuestos de la siguiente forma:

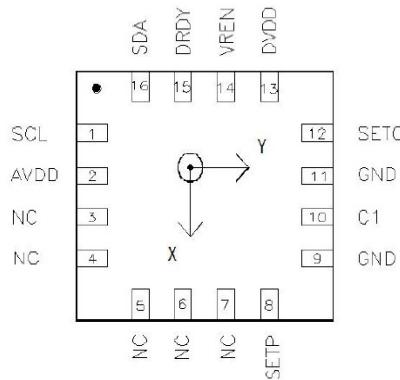


FIGURA 11

Por último con el giroscopio se miden los ángulos girados en un determinado instante por el sensor. Este sensor lo qué mide es velocidad angular, por lo tanto, conociendo la posición inicial y la velocidad angular en cada periodo se calcula el ángulo girado en cada instante, pudiendo determinar la inclinación del sensor, respecto de los tres ejes.

Este sensor presenta el inconveniente de la deriva, de modo que en función del tiempo que lleve el sensor realizando medidas, la precisión de los ángulos medidos irá variando. Esto no ocurre con los otros dos sensores, de modo que a la hora de realizar el estudio tendremos que tener un especial cuidado con este. Los ejes de rotación del giroscopio son estos:

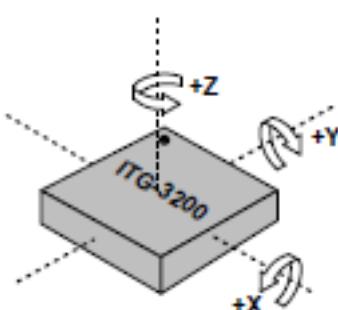


FIGURA 12

Como cada sensor mide una magnitud diferente, van a tener que utilizarse diferentes algoritmos para calcular los ángulos.

Con el acelerómetro se van a calcular los ángulos de inclinación respecto de los ejes X e Y. El acelerómetro lo que mide son aceleraciones en cada eje. Para que el acelerómetro detecte una aceleración, tiene que haber una fuerza que la produzca. Esta fuerza puede ser representada como un vector. Si el acelerómetro está quieto, la única aceleración que detectará es la de la gravedad, de modo que si conocemos su dirección, podremos obtener el ángulo de inclinación haciendo uso de la trigonometría.

Supongamos un sistema donde el sensor está inclinado 45 grados respecto del eje Y. La fuerza de la gravedad se repartirá de igual forma en los ejes X y Z del sensor.

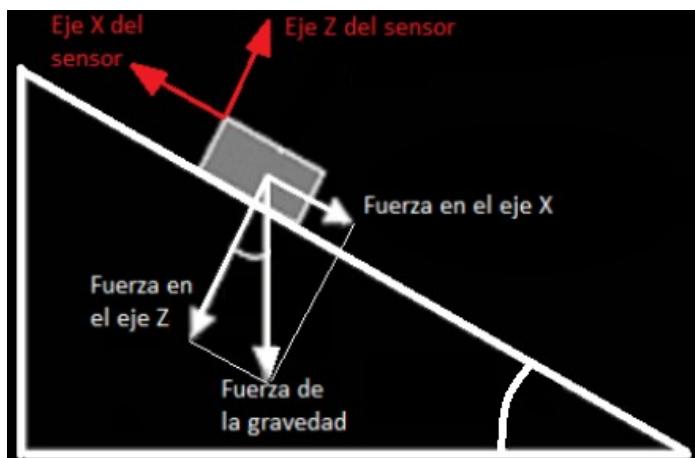


FIGURA 13

El ángulo formado entre las dos componentes de la fuerza de la gravedad, en los ejes X y Z, será igual al ángulo de inclinación respecto del eje Y. De modo que para obtener el ángulo de inclinación respecto del eje Y del sensor, se tiene

que calcular el arcotangente entre el valor de la aceleración en el eje X y en el eje Z.

Para calcular el ángulo de inclinación respecto del eje X se hace de la misma manera, quedando:

$$\text{Ángulo de inclinación eje X} = \text{atan} (\text{AceleraciónEjeY} / \text{AceleraciónEjeZ})$$

$$\text{Ángulo de inclinación eje Y} = \text{atan} (\text{AceleraciónEjeX} / \text{AceleraciónEjeZ})$$

Si el sensor solo se moviera en dos ejes, con esto sería mas que suficiente, pero se tiene que tener en cuenta que se puede mover en las tres dimensiones, y por tanto estar inclinado respecto de dos ejes o tres. Para solucionar esto se debe incluir la componente de la gravedad en el tercer eje, entendiendo el tercer eje como aquel respecto del que se quiere medir la inclinación, quedando las fórmulas del siguiente modo:

$$\text{Ángulo eje X} = \text{atan} [\text{AceleraciónEjeY} / \sqrt{(\text{AceleraciónEjeZ}^2 + \text{AceleraciónEjeX}^2)}]$$

$$\text{Ángulo eje Y} = \text{atan} [\text{AceleraciónEjeX} / \sqrt{(\text{AceleraciónEjeZ}^2 + \text{AceleraciónEjeY}^2)}]$$

Aplicando estas fórmulas, si el sensor está inclinado únicamente respecto del eje X, la componente de la aceleración de la gravedad en el eje X será nula, y la expresión será igual a las anteriores.

De esta manera, conociendo los valores de las aceleraciones en los tres ejes, se calculan los ángulos de inclinación respecto de los ejes X e Y aplicando una simple fórmula, en la que no se introduce ningún error, si no se

desperdicia información de las medidas. Esto significa, que los ángulos obtenidos solo dependen del valor de las aceleraciones, por lo que pueden utilizarse estos ángulos para valorar la calidad de las mediciones proporcionadas por el acelerómetro.

Con el magnetómetro se va a calcular el ángulo que ha girado el sensor en el eje Z respecto de la posición inicial.

En este caso es mucho más simple que con el acelerómetro. Con el magnetómetro se obtiene el *heading*. Para obtener el ángulo que se ha girado respecto del eje Z, simplemente hay que restar el *heading* actual del *heading* que hemos obtenido con el sensor en reposo. Es decir, el ángulo girado será igual a la diferencia entre la desviación actual respecto del norte magnético, y la desviación inicial.

Para calcular los ángulos con el acelerómetro y el magnetómetro, no existe ninguna limitación por parte de las magnitudes que estos miden, aceleraciones e intensidad de campo magnético respectivamente, ya que los valores a medir nunca se van a salir del rango de funcionamiento de estos sensores. El problema aparece con el giroscopio, que para calcular el ángulo hay que utilizar la velocidad angular. El sensor trabaja en un rango de  $\pm 2000^\circ/\text{segundo}$ , por lo tanto, si la velocidad de rotación de la plataforma donde está colocada la IMU es mayor de  $2000^\circ/\text{segundo}$  no pueden calcularse los ángulos.

Respetando este rango de funcionamiento, para calcular los ángulos con el giroscopio, simplemente hay que conocer el periodo de muestreo, es decir, el

tiempo que transcurre entre medida y medida. Gracias al sistema operativo en tiempo real y a la plataforma COSME, se puede garantizar la duración de cada periodo, en este caso de 0,1 segundos. De este modo, conociendo la velocidad angular del sensor, durante un determinado periodo de tiempo, se calcula el ángulo girado:

$$\text{ángulo girado} = \text{velocidad angular} * \text{periodo}$$

En este proceso el ángulo calculado también depende solamente de la velocidad medida por el sensor, por lo que puede utilizarse el ángulo calculado para determinar la exactitud de las medidas que realiza el sensor.

### 5.3.- INSTRUMENTOS DE MEDIDA

En todo proceso de calibración, para determinar las características de las medidas, se necesita otro instrumento de mayor calidad que proporcione los valores reales de la magnitud a medir. En este caso, como se van a medir ángulos con tres determinados sensores, se precisa otro instrumento de mayor calidad con el que poder comparar los datos de las medidas.

Existen diferentes dispositivos para la medición de ángulos. Uno de ellos es la regla o mesa de senos, que sirve para obtener medidas indirectas de ángulos, o para la formación de patrones. Probablemente sería el instrumento más adecuado para este proyecto, ya que sus medidas son muy exactas, y montando encima de éste el sensor se podría analizar la diferencia entre los valores suministrados por el sensor y los que proporciona la regla de senos. El inconveniente es que este instrumento tiene un precio elevado y no se dispone de ninguno para poder utilizar.

Otro instrumento muy utilizado y fiable para medir ángulos es el goniómetro. Se trata de un instrumento de medición que consta de un círculo graduado de  $180^\circ$  o  $360^\circ$ , el cual lleva incorporado un dial giratorio sobre su eje de simetría, para poder medir cualquier variación angular.



FIGURA 14



FIGURA 15

Lamentablemente tampoco se dispone de un goniómetro, por lo que se ha tenido que realizar un montaje propio para realizar las medidas de los ángulos, evidentemente muchos menos fiable que cualquiera de estos dos instrumentos. Con ayuda de un transportador de ángulos se ha realizado el montaje de las imágenes.

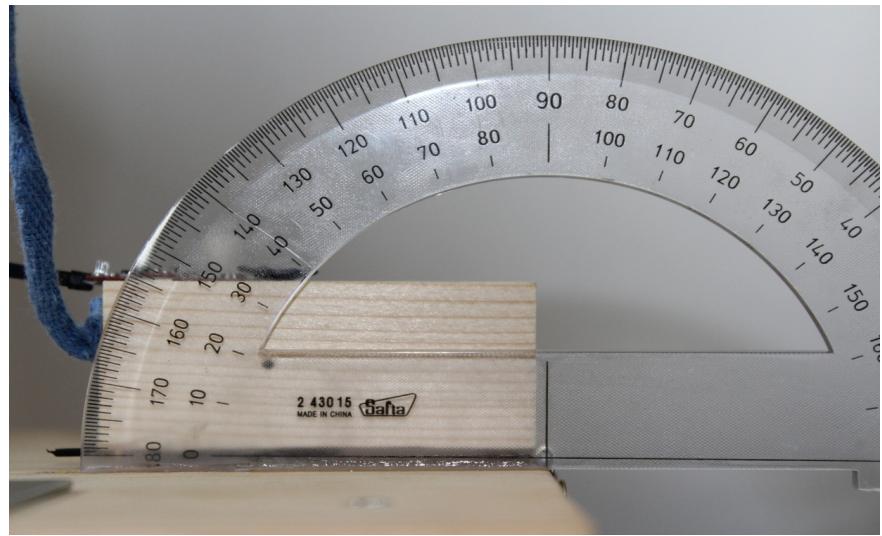


FIGURA 16

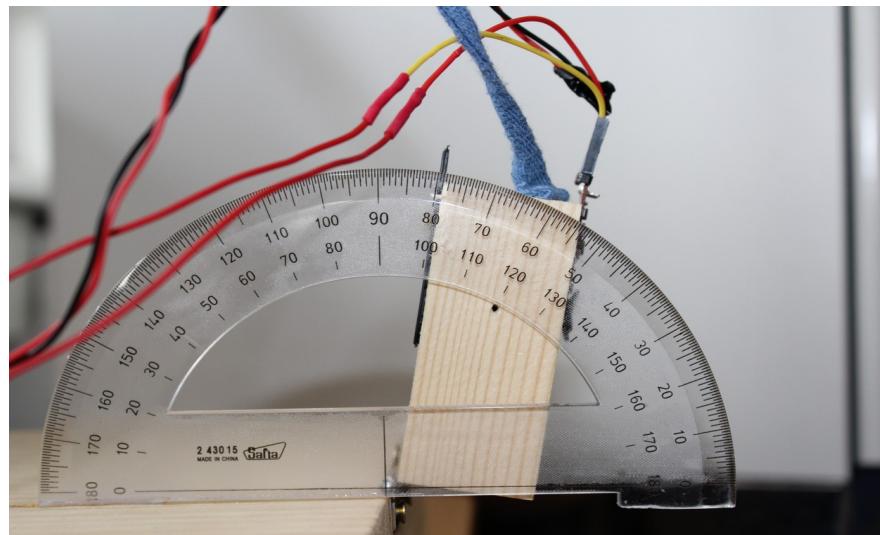


FIGURA 17

El transportador de ángulos está colocado paralelo a los ejes del sensor, y el eje de giro de la plataforma donde va montado el sensor coincide con el centro del transportador de ángulos. Son muchos los factores que pueden crear error en la medida, el propio transportador, la bisagra que permite la rotación de la plataforma o simplemente el ojo humano. De todas formas, es bastante fiable y el mejor modo del que se dispone para medir los ángulos.

Se utiliza para comparar los ángulos que se medirán con el acelerómetro y el giroscopio. El sensor se puede poner en la plataforma de tal forma que se produzca rotación en los tres ejes.

Con el acelerómetro el proceso que se realiza consiste en fijar la plataforma en una posición determinada, ejecutar el programa y tomar una serie de medidas para analizarlas y poder determinar la calidad de las medidas. Estas pueden ser estáticas o dinámicas, es decir, se puede colocar la plataforma con una determinada inclinación, realizar las medidas y parar la aplicación, o ir variando la inclinación de forma dinámica.

Con el giroscopio lo que se hace es colocar la plataforma paralela a la superficie de manera que el ángulo de inclinación es cero. Se ejecuta la aplicación y se deja que el sensor se auto-calibre eliminando el offset inicial, para después girar la plataforma hasta otra posición. La plataforma indicará el ángulo girado, ya que se conoce el ángulo inicial y final de inclinación, y es comparado con el ángulo leído del sensor.

Como el giroscopio es un sensor con determinadas limitaciones, se tienen que tener en cuenta. La velocidad angular máxima no puede sobrepasarse a la hora de realizar los giros, ni tampoco ser inferior a un determinado valor que el sensor no pueda detectar. Además se debe realizar las medidas en diferentes períodos de tiempo para comprobar el efecto de la deriva.

Con el transportador de ángulos se pueden medir variaciones angulares de hasta 0,5º siendo suficiente para este proyecto, ya que con los sensores no se pueden detectar variaciones tan pequeñas.

Para medir los ángulos rotados por el magnetómetro este montaje no sirve, ya que como trabajamos con el eje Z la rotación debe ser sobre este eje. Para ello se ha colocado una circunferencia graduada<sup>11</sup> sobre una superficie plana, y en el origen de la circunferencia se sitúa el eje de rotación de la plataforma donde se encuentra el sensor (Figura 7).

De esta forma se puede comparar el ángulo rotado por la plataforma con el leído del magnetómetro.

## 6.- RECOGIDA Y ANÁLISIS DE DATOS

La toma de datos es el proceso más delicado y debe realizarse con cuidado, prestando atención a todos factores que puedan afectar a las medidas, para que estas se realicen en las mismas condiciones.

Como de cada sensor interesa una información, no todos los tipos de medidas serán los mismos. Lo primero es determinar que características se quieren conocer de cada sensor, y después desarrollar las pruebas necesarias para cada una de esas características.

En una hoja de cálculo se realizarán los cálculos y gráficos necesarios.

### 6.1.- ACELERÓMETRO

En primer lugar se va a determinar el rango de medida que puede obtenerse. Para ello se rota el acelerómetro 360º en los dos ejes y se comprueba si los valores calculados indican que se han rotado 360º.

---

11 Imagen extraída de <http://lamaneta.com/news/blog/2013/05/16/sector-graduado-para-ducati/>

La plataforma del sensor se coloca sobre un cilindro y se hace rotar con velocidad constante. Los datos de los ángulos son almacenados en un fichero de texto.

Una vez realizadas las medidas, se exportan los datos del fichero de texto, se ordenan y se introducen en un gráfico. Para cada uno de los ejes X e Y estos son los valores obtenidos tras rotar el sensor  $360^\circ$ .

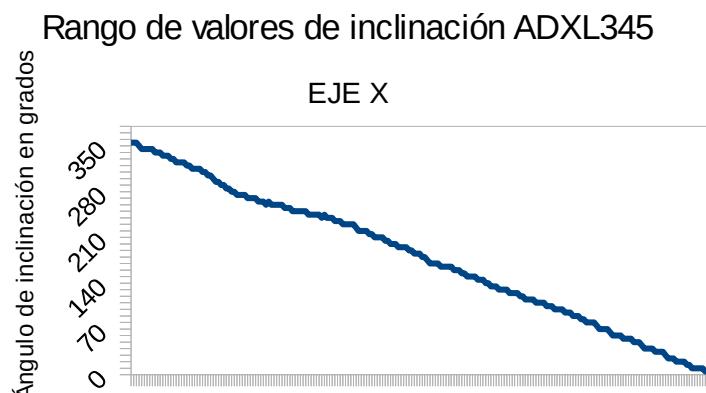


FIGURA 18

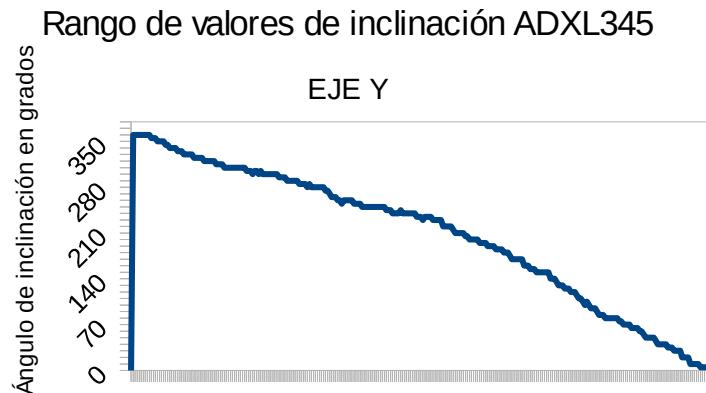


FIGURA 19

En ambos ejes el rango de medida va desde los  $0^\circ$  hasta los  $360^\circ$ . También se puede obtener el rango expresado entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ .

Otro parámetro a determinar será la exactitud de la medida. Se colocará

la plataforma en el montaje realizado con el transportador de ángulos. La plataforma se colocará en diferentes en ángulos de inclinación y para cada valor se realizan 100 lecturas que son almacenadas en un fichero de texto.

Para el eje X, se coloca la plataforma con una inclinación de  $0^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-40^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,  $-80^\circ$ ,  $-100^\circ$ ,  $-120^\circ$ ,  $-130^\circ$ ,  $-140^\circ$ ,  $-145^\circ$ ,  $-150^\circ$ ,  $-155^\circ$  y  $-160^\circ$ . Del mismo modo, los ángulos a medir en el eje Y han sido  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $145^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $155^\circ$  y  $160^\circ$ .

Como el número de medidas realizadas es mayor que 30, la distribución se puede considerar una distribución gaussiana. Esto implica, que las medidas obtenidas se pueden incluir dentro de un intervalo de confianza. Para calcular este intervalo de confianza se calcula la media y la varianza de las medidas. En las siguientes tablas se recoge la información sobre los valores medios y de varianza.

EJE X									
ÁNGULO	$0^\circ$	$-5^\circ$	$-10^\circ$	$-15^\circ$	$-20^\circ$	$-30^\circ$	$-40^\circ$	$-60^\circ$	$-80^\circ$
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	-0,020	-5,465	-10,182	-15,505	-20,879	-31,020	-40,202	-60,949	-79,778
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,585	0,915	0,674	0,977	1,157	0,666	1,474	0,513	0,415
ÁNGULO	$-100^\circ$	$-120^\circ$	$-130^\circ$	$-140^\circ$	$-145^\circ$	$-150^\circ$	$-155^\circ$	$-160^\circ$	
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	-99,687	-119,889	-129,566	-139,343	-144,051	-149,929	-154,970	-160,586	
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,740	1,473	1,155	0,771	0,997	0,167	1,140	1,212	

TABLA 7

EJE Y									
ÁNGULO	$0^\circ$	$-5^\circ$	$-10^\circ$	$-15^\circ$	$-20^\circ$	$-30^\circ$	$-40^\circ$	$-60^\circ$	$-80^\circ$
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	0,354	5,101	10,040	14,768	19,657	29,434	40,717	59,909	79,303
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,471	0,333	0,564	0,219	0,630	0,609	0,748	0,891	0,413
ÁNGULO	$-100^\circ$	$-120^\circ$	$-130^\circ$	$-140^\circ$	$-145^\circ$	$-150^\circ$	$-155^\circ$	$-160^\circ$	
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	100,596	119,737	130,465	139,646	144,495	150,697	155,242	160,576	
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,382	0,335	0,289	0,269	0,250	0,292	0,285	0,264	

TABLA 8

El intervalo de confianza se define como el intervalo de valores en el cual se encuentra una medida. El tamaño del intervalo depende de la probabilidad de que esta medida se encuentre en ese intervalo. En función de esta probabilidad se diferencian tres tamaños de intervalos:

$$68\% \rightarrow \text{intervalo} = \mu \pm \sigma$$

$$95\% \rightarrow \text{intervalo} = \mu \pm 2\sigma$$

$$99,7\% \rightarrow \text{intervalo} = \mu \pm 3\sigma$$

De esta forma se garantiza con una determinada probabilidad que las medidas realizadas con cada sensor están acotadas en un rango de valores concreto.

Para cada uno de los ejes se toma el valor más alto de la varianza, ya que es el que proporciona un intervalo más grande, de modo que los demás valores caerán dentro de ese intervalo. La siguiente tabla muestra, para cada eje el intervalo de valores entre los que se puede encontrar la medida, con una determinada probabilidad:

EJE X	PROBABILIDAD DE QUE EL VALOR SE ENCUENTRE EN EL INTERVALO	
	95,00%	99,70%
INTERVALO EN EL QUE SE ENCUENTRA LA MEDIDA	VALOR MEDIDO $\pm 2,948$	VALOR MEDIDO $\pm 4,422$

EJE Y	PROBABILIDAD DE QUE EL VALOR SE ENCUENTRE EN EL INTERVALO	
	95,00%	99,70%
INTERVALO EN EL QUE SE ENCUENTRA LA MEDIDA	VALOR MEDIDO $\pm 1,780$	VALOR MEDIDO $\pm 2,670$

TABLA 9

Esta tabla puede ser interpretada, de modo que cada valor medido en el eje X, con un 95% de probabilidad el máximo error cometido será de  $2,948^\circ$  y  $4,422^\circ$  con un 99,7% de probabilidad. Para el eje Y el máximo error cometido será de  $1,78^\circ$  con un 95% de probabilidad y de  $2,67^\circ$  con un 99,7% de probabilidad.

Conociendo este error máximo, se van a tomar medidas continuamente mientras el acelerómetro se rota  $90^\circ$ . En los gráficos siguientes se muestran los resultados:

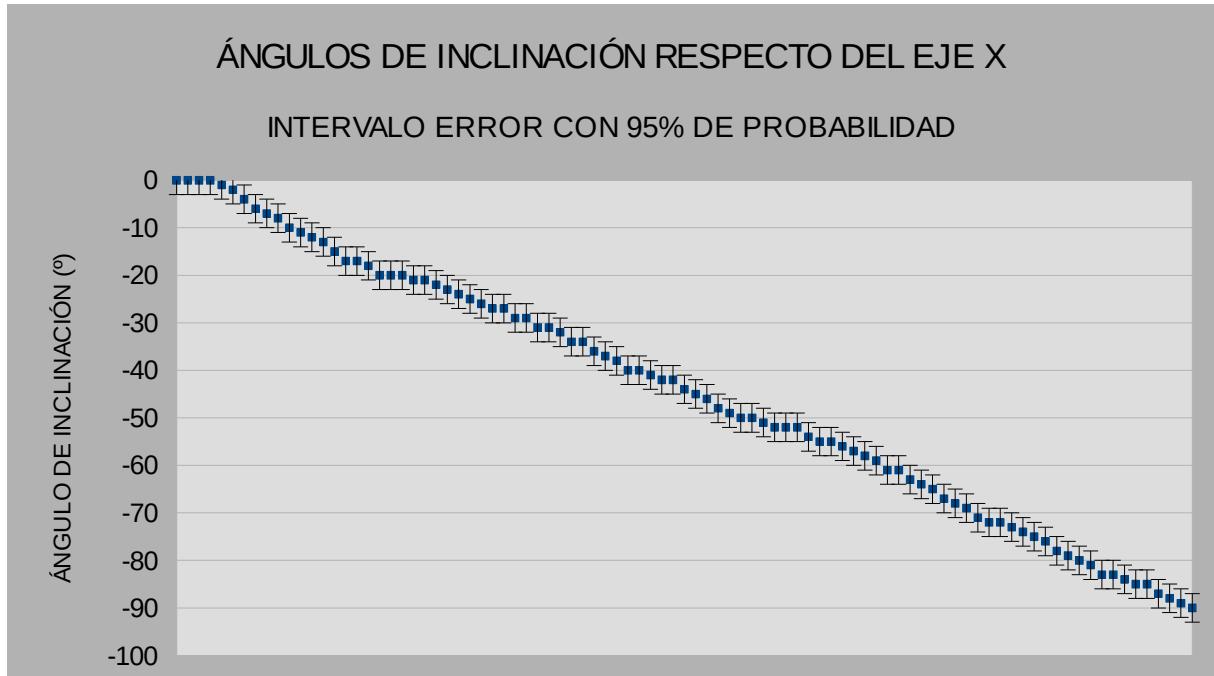


FIGURA 20

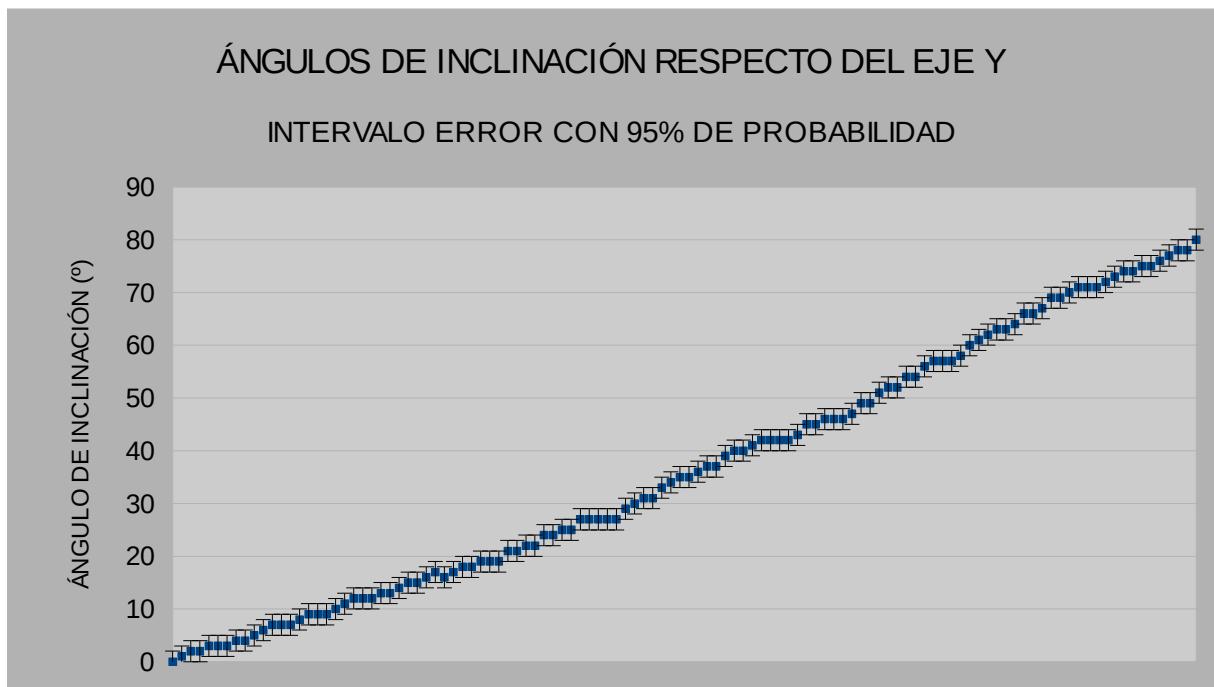


FIGURA 21

Los puntos azules representan el valor del ángulo calculado. Cada punto tiene una barra por encima y otra por debajo que representan el intervalo dentro del cual se encuentra el valor real del ángulo con un 95% de probabilidad.

Todas las medidas realizadas se recogen en el Anexo 3.

## 6.2.- MAGNETÓMETRO

De forma análoga a cómo se ha hecho para el acelerómetro va a determinarse el rango de medida. Se rota el sensor  $360^{\circ}$  y se representan en el siguiente gráfico los resultados:

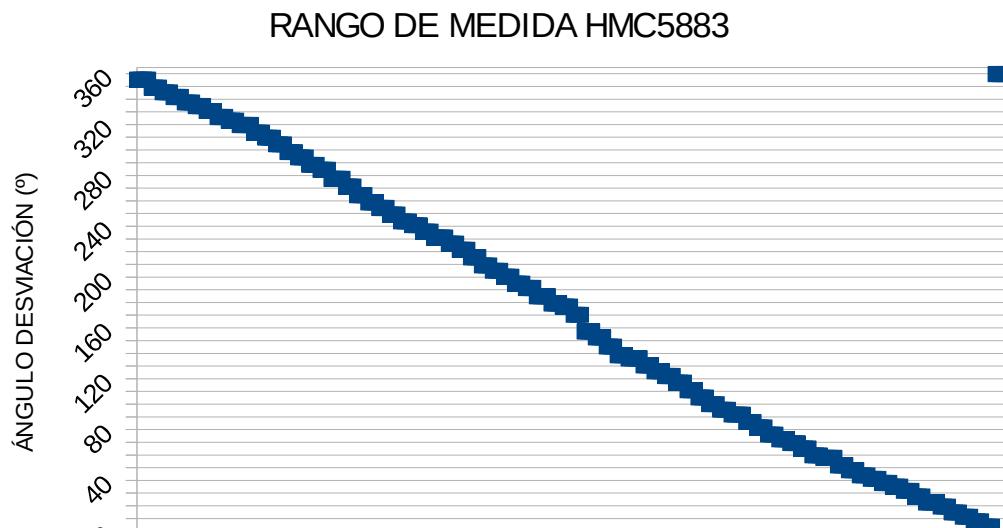


FIGURA 22

El rango de escala va de 0 a  $360^{\circ}$ . En el Anexo 4 se encuentran todos los valores medidos.

Para determinar la exactitud de medida, se define un ángulo de

desviación inicial, y cada diez segundos se hace rotar la plataforma 10º. Los datos se recogen en un fichero de texto. Posteriormente esos datos se introducen en una hoja de cálculo, donde se eliminarán los valores correspondientes a las transiciones y se determinará el intervalo de confianza de forma análoga al acelerómetro. Para cada ángulo se van a utilizar 100 valores para determinar la varianza de las medidas. En la siguiente tabla se muestran los resultados:

<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	352,494	341,326	331,939	322,350	311,906	302,196
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,042	0,066	0,044	0,066	0,033	0,041
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	289,769	280,289	269,954	259,895	249,904	239,283
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,065	<b>0,079</b>	0,041	0,061	0,063	0,039
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	229,408	219,029	208,281	197,326	188,040	178,020
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,061	0,053	0,071	0,048	0,054	0,060
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	167,614	0,736	11,134	20,471	31,100	40,033
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,042	0,053	0,031	0,051	0,061	0,044
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	52,063	62,032	71,066	82,504	92,136	102,098
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,054	0,048	0,054	0,051	0,030	0,055
<b>MEDIA(<math>\mu</math>)</b>	111,628	121,752	131,115	140,376	150,598	160,038
<b>VARIANZA(<math>\sigma</math>)</b>	0,064	0,066	0,033	0,040	0,045	0,055

TABLA 10

En la tabla está resaltado el valor máximo de la varianza. Conociendo este valor ya pueden definirse los intervalos de confianza en función del porcentaje de probabilidad de que la medida se encuentre en ese intervalo:

HMC5883	PROBABILIDAD DE QUE EL VALOR SE ENCUENTRE EN EL INTERVALO	
	95,00%	99,70%
INTERVALO EN EL QUE SE ENCUENTRA LA MEDIDA	VALOR MEDIDO $\pm 0,1576^\circ$	VALOR MEDIDO $\pm 0,2364^\circ$

TABLA 11

Los resultados indican que el 99,7% de las medidas realizadas con el magnetómetro no cometerán un error superior a 0,236º.

En el siguiente gráfico se representan las medidas tomadas durante un

periodo de tiempo en el que se ha rotado el magnetómetro  $90^\circ$ .

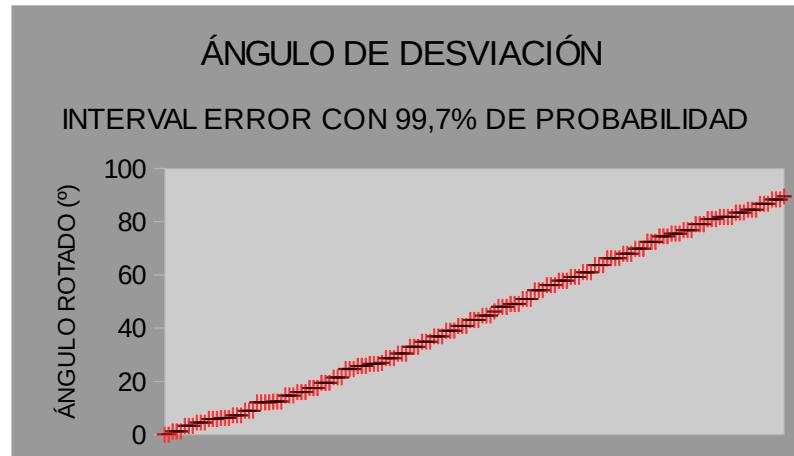


FIGURA 23

Las cruces rojas representan el valor del ángulo, y las barras negras el intervalo dentro del cual hay un 99,7% de probabilidad de que se encuentre el ángulo real. El intervalo es tan pequeño que no se puede apreciar. La siguiente imagen muestra un intervalo ampliado:

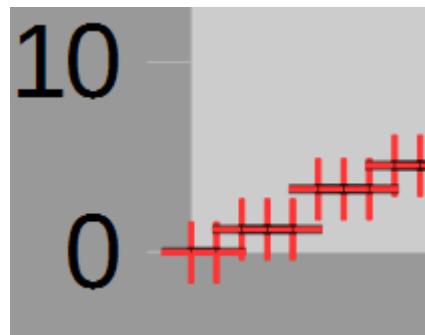


FIGURA 24

Se puede apreciar que el intervalo es tan pequeño que con la resolución del transportador de ángulos ( $0,5^\circ$ ) no podría determinarse.

### 6.3.- GIROSCOPIO

Lo primero que debe hacerse con el giroscopio es acotar el rango de velocidades angulares para las cuales las medidas son válidas. El fabricante indica que el rango de velocidades angulares es de  $\pm 2000^\circ/\text{segundo}$ , es decir, si la velocidad angular del sensor no está comprendida en ese rango no se podrán calcular ángulos con este sensor. Por otro lado, si la velocidad angular no es superior a un determinado valor el sensor no la detectará.

El sensor tiene una sensibilidad de  $14.375 \text{ LSB}/(^{\circ}/\text{seg})$ , lo que significa que puede detectar  $0,07^\circ/\text{segundo}$  por cada LSB. Si la velocidad angular del sensor está comprendida en un rango de  $-0,07:0,07^\circ/\text{segundo}$  el sensor no detecta movimiento. Este intervalo se denomina zona muerta del sensor.

En el giroscopio no interesa determinar la exactitud de la medida, de hecho, es el sensor mas exacto de los tres. Lo que interesa es determinar cómo disminuye esa exactitud en función del tiempo, es decir, determinar el efecto de la deriva.

Para ello se va a colocar el sensor en determinados ángulos de inclinación iniciales y se llevará a la posición de reposo (inclinación nula). Se dejará el sensor un durante 1000 periodos de 0,1 segundos en esa posición y se recogerán los valores del ángulo calculado.

En el eje X se colocará la plataforma con ángulos de  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ , y para el eje Y y el eje Z solo se realizará el proceso para un ángulo de  $60^\circ$ . Se realizarán cinco medidas para cada ángulo. Como la plataforma se lleva de forma manual a la posición inicial no todos los ángulos son iguales, pero lo que interesa es determinar el valor de la deriva en función del tiempo. Los gráficos siguientes representan el valor del ángulo en función del tiempo para 5

repeticiones. Este ángulo debería ser siempre de 90º, pero debido al efecto de la deriva va disminuyendo. En el Anexo 5 se encuentran todos los gráficos y medidas realizadas.

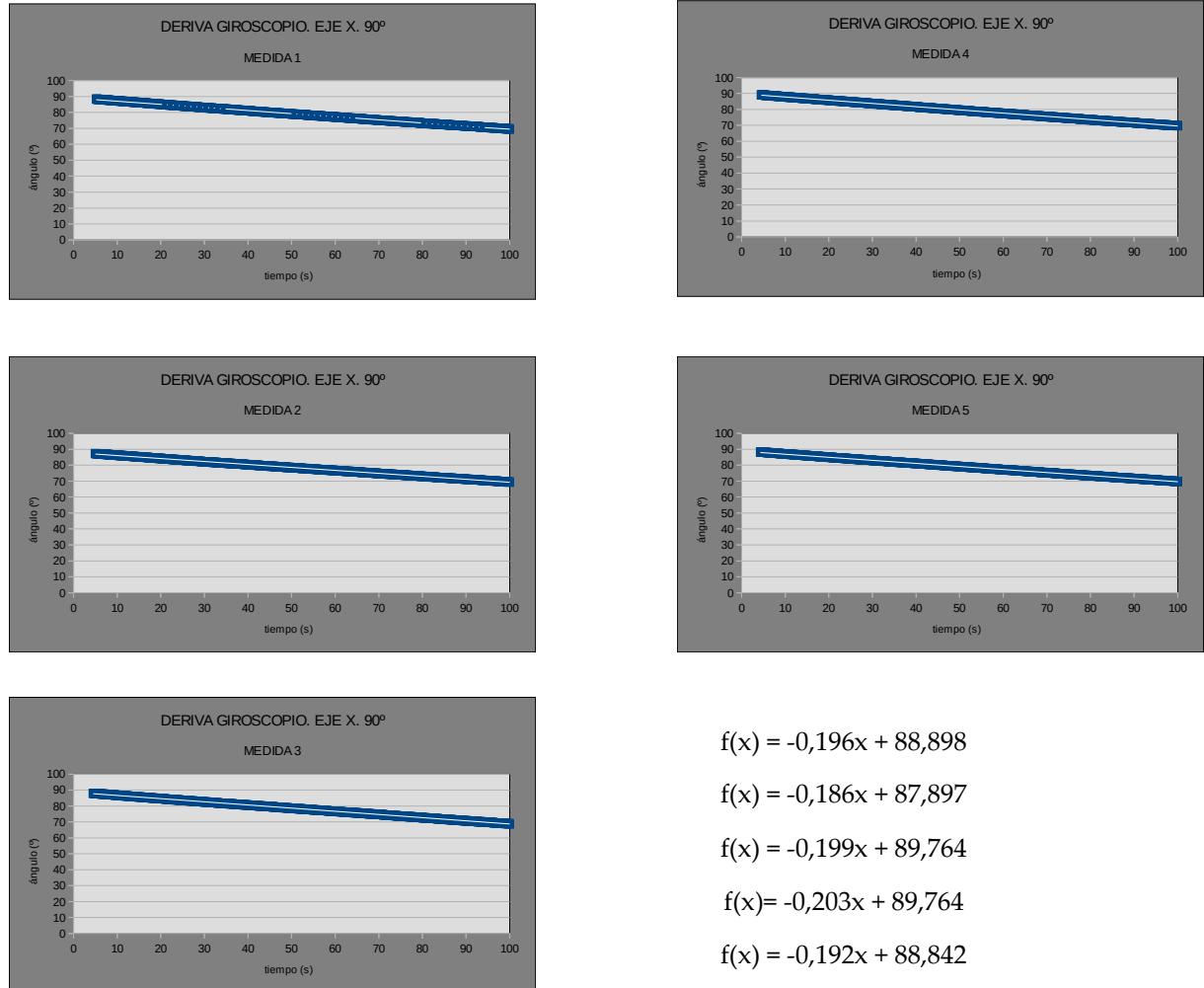


FIGURA 25

Las funciones representan para cada una de las veces que se ha realizado el proceso, el valor del ángulo en función del tiempo. Si se redondea se puede decir que:

$$\text{ángulo\_rotado}(t) = -0,2 * t + \text{ángulo\_rotado\_real}$$

Para los ejes Y y Z se obtienen los siguientes gráficos:

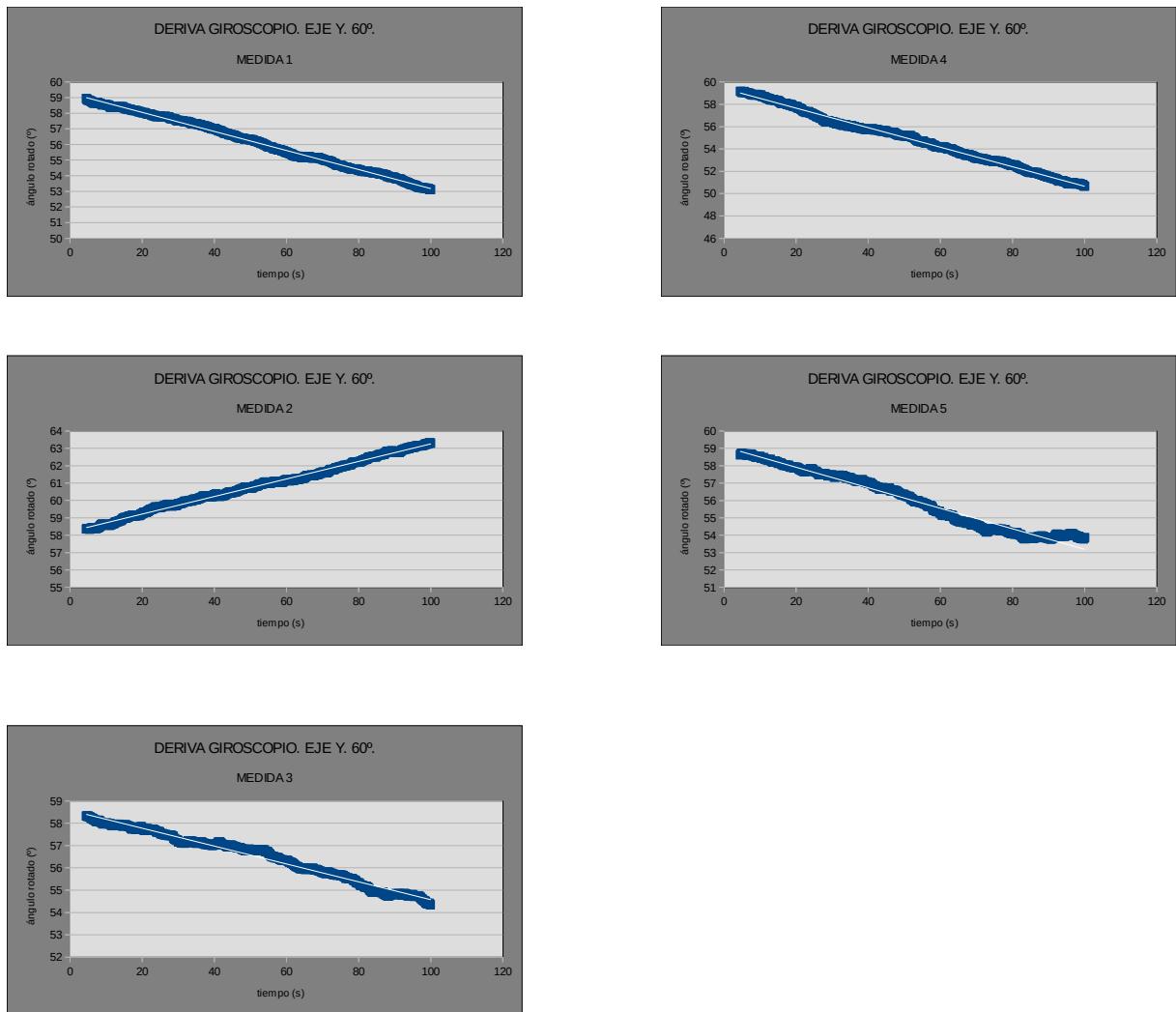


FIGURA 26

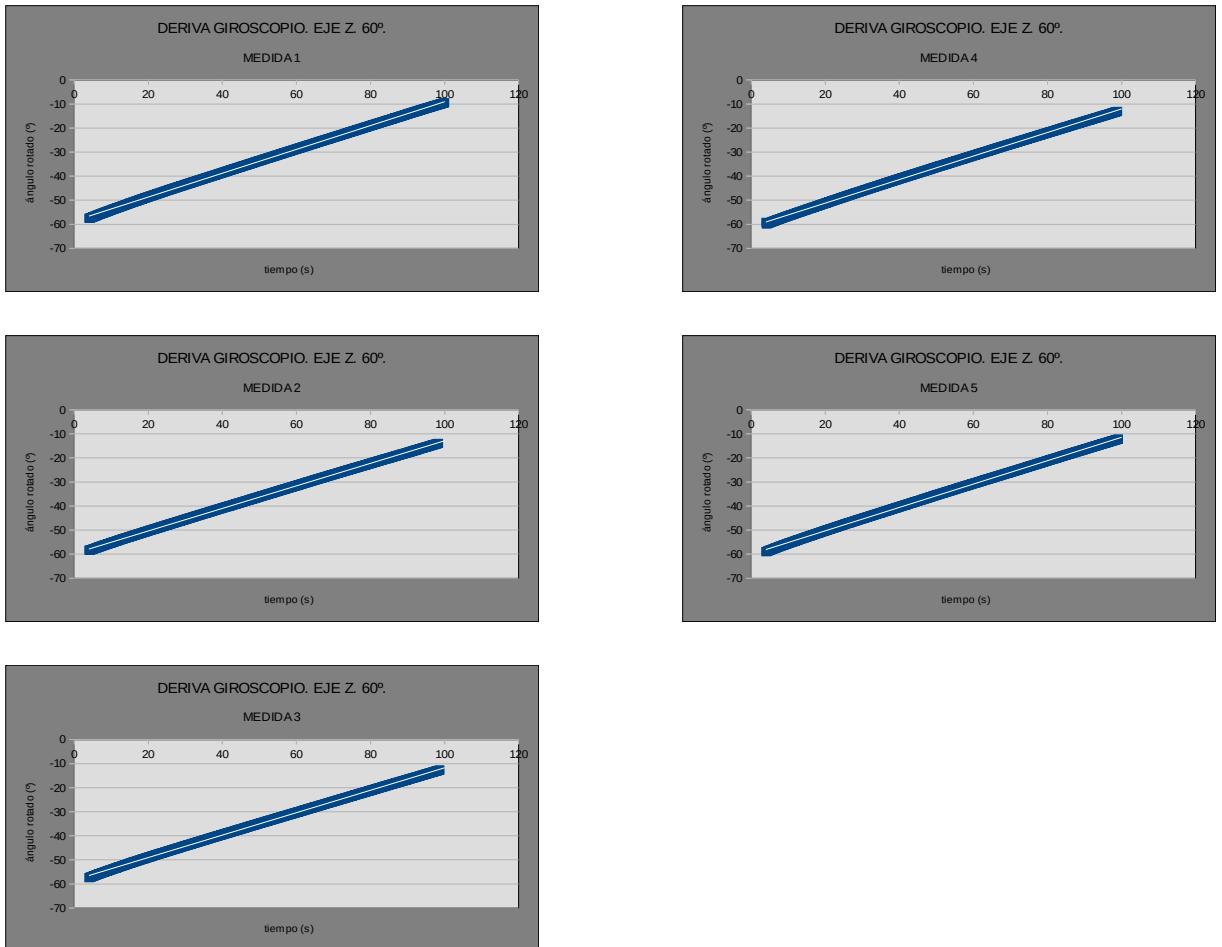


FIGURA 27

Para cada eje y cada ángulo se obtienen unas funciones diferentes:

Eje	Ángulo Rotado	Función
X	30°	$\text{ángulo}(t) = -0,15*t + 30^\circ$
X	60°	$\text{ángulo}(t) = -0,17*t + 60^\circ$
X	90°	$\text{ángulo}(t) = -0,2*t + 90^\circ$
Y	60°	$\text{ángulo}(t) = \pm 0,05*t + 60^\circ$
Z	60°	$\text{ángulo}(t) = +0,5*t + 60^\circ$

TABLA 12

Como no se puede determinar un valor constante en los parámetros de la función el efecto de la deriva no puede cuantificarse. Para solucionar este

problema pueden implementarse varias soluciones.

Si el giroscopio va a utilizarse junto con el magnetómetro y el acelerómetro, los ángulos calculados con estos dos sensores pueden utilizarse para compensar el efecto de la deriva. Para ello se aplica el filtro de Kalman o un filtro complementario. El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo para procesamiento de datos, usado para la estimación eficiente del estado de un proceso.<sup>12</sup> El filtro complementario es una unión de un filtro paso bajo y un filtro paso alto. Si quisiera compensarse el efecto de la deriva del giroscopio con los datos del acelerómetro en los ejes X e Y, o con el magnetómetro en el eje Z, se aplicaría un filtro paso alto a las medidas del giroscopio, y un filtro paso bajo a los datos del otro sensor.<sup>13</sup>

Si el giroscopio se va a utilizar por separado, mediante software se puede compensar, a costa de perder exactitud en la medida. Para calcular el valor del ángulo, se calcula el ángulo instantáneo y se le va sumando ese valor al ángulo total:

```
*anguloTotalX = *anguloTotalX + *anguloGiradoX;  
*anguloTotalY = *anguloTotalY + *anguloGiradoY;  
*anguloTotalZ = *anguloTotalZ + *anguloGiradoZ;
```

Como el efecto de la deriva en un periodo de tiempo corto no es muy significativo, lo que se hace es redondear el valor del ángulo a su entero mas cercano. De esta forma se desprecia el ángulo instantáneo si su valor es inferior a 0,5°, es decir, se desprecia el efecto de la deriva.

---

12 Información extraída de <http://es.slideshare.net/jojaquix/kalman>

13 Información extraída de <http://robologs.net/2014/10/15/tutorial-de-arduino-y-mpu-6050/>

```
*anguloTotalX = round(*anguloTotalX);
```

```
*anguloTotalY = round(*anguloTotalY);
```

```
*anguloTotalZ = round(*anguloTotalZ);
```

Para comprobar esto se han vuelto a realizar las mismas medidas, obteniendo los siguientes resultados:

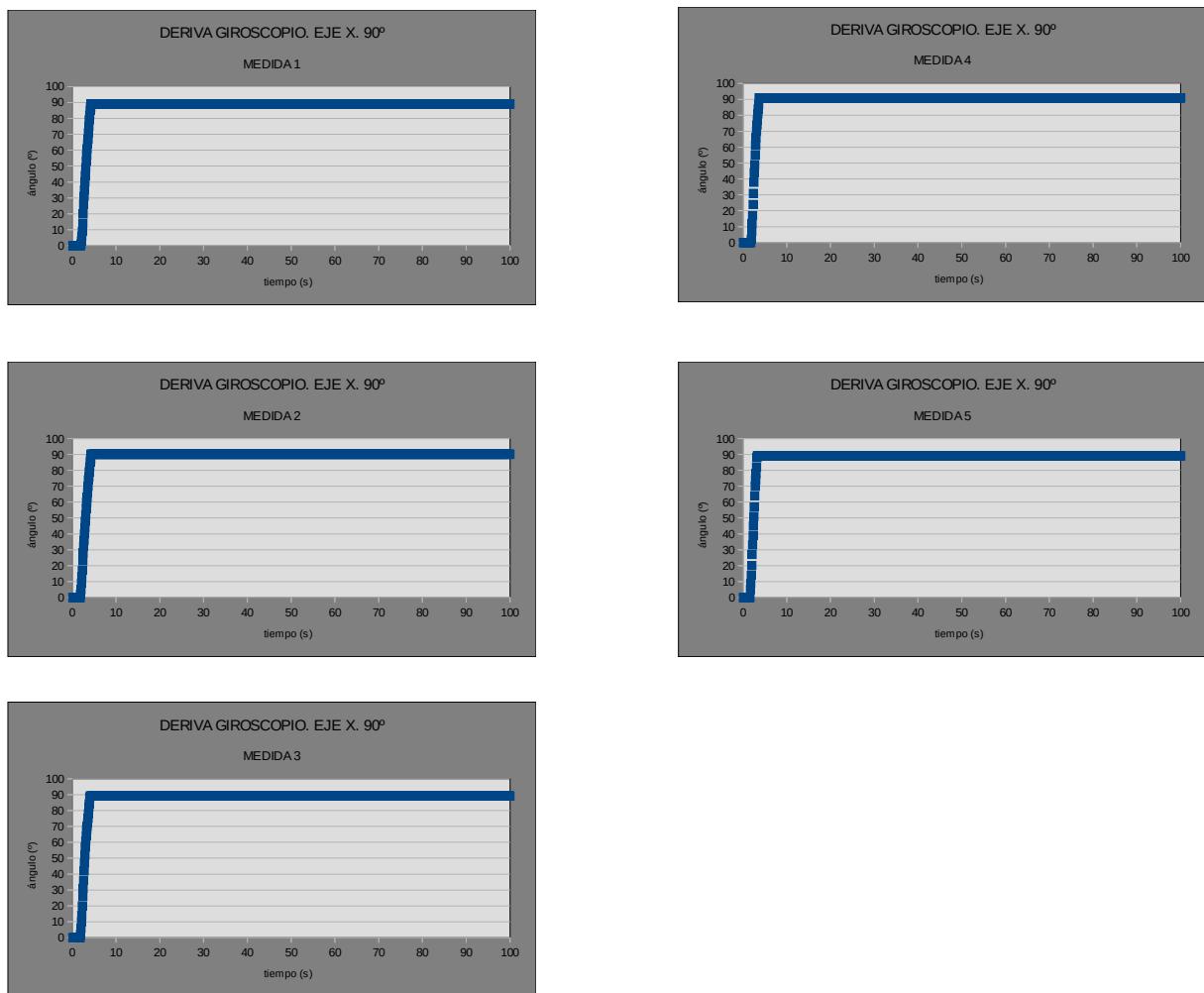


FIGURA 28

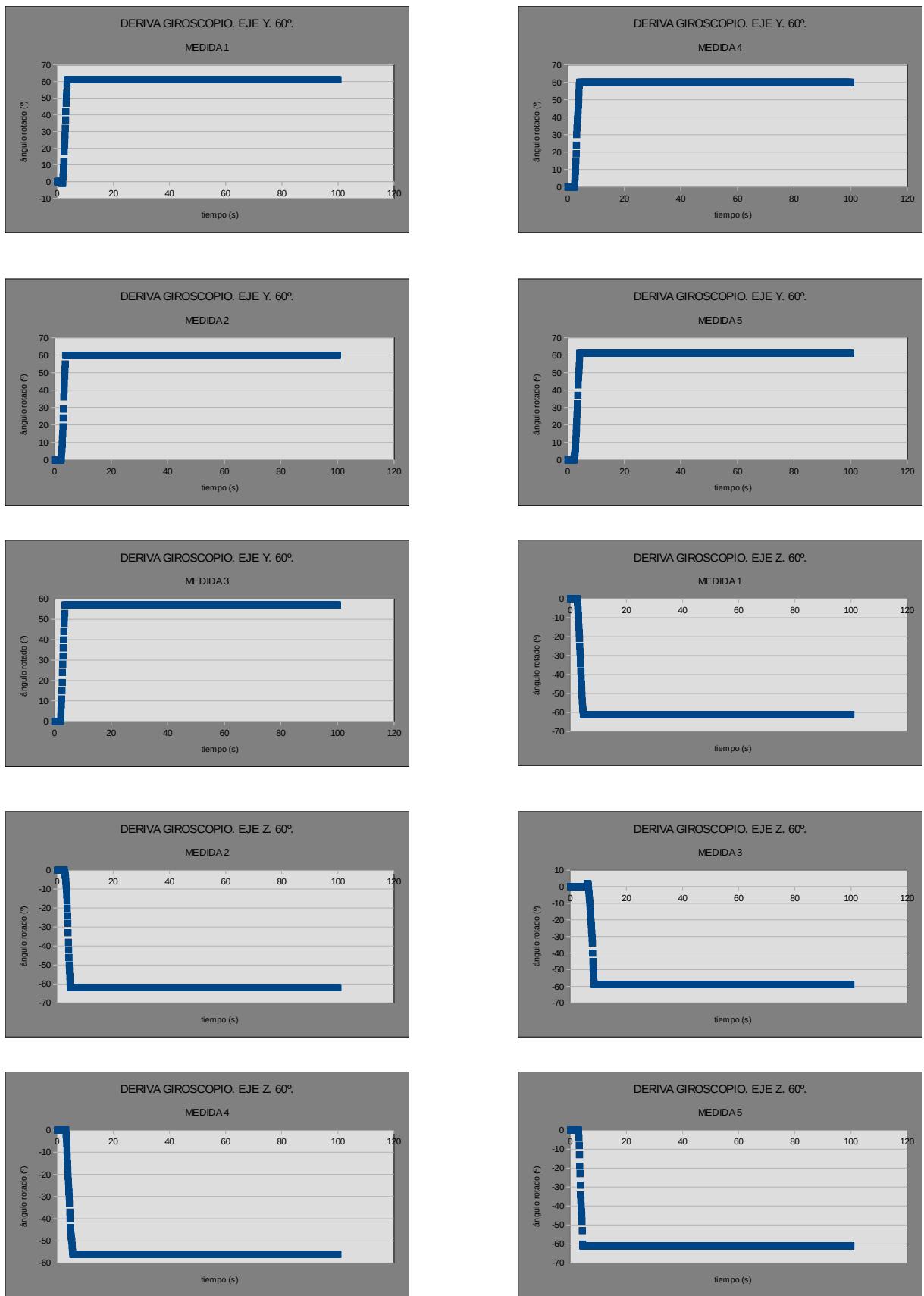


FIGURA 29

Se observa que el efecto de la deriva ya no está presente, el valor del ángulo se incrementa hasta llegar al valor del ángulo rotado y se mantiene estable.

## 7.- CONCLUSIONES

La puesta en marcha de los sensores ha resultado más complicada de lo esperado. Se ha utilizado mucho tiempo en ello ya que a pesar de que todos los sensores vienen calibrados de fábrica, se han tenido que volver a calibrar de acuerdo a nuestras necesidades.

La parte de programación no ha sido excesivamente difícil, ya que no se han necesitado algoritmos complejos ni el uso de estructuras complicadas.

El análisis de las medidas tomadas por los tres sensores ha sido la parte más laboriosa, llevando esta mucho tiempo. Los montajes de los que se disponían para realizar las medidas han influido en estas al no ser los más adecuados para realizar la calibración de estos sensores.

A pesar de esto los resultados de exactitud de los tres sensores son suficientes para un amplio abanico de aplicaciones en los que quieran ser usados.

La exactitud obtenida para la determinación de la orientación con el magnetómetro nos permite utilizarlo para cualquier aplicación en la que no necesitamos determinarla con precisión de décimas de grado.

Con el acelerómetro podemos determinar inclinaciones con una exactitud menor de  $\pm 3^\circ$  sobre el valor medido, de modo que puede utilizarse en diversas aplicaciones, como el inclinómetro de un vehículo 4x4.

El giroscopio, puede determinar con  $1^\circ$  de exactitud inclinaciones en los tres ejes, por lo que puede ser utilizado en múltiples aplicaciones.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **Fundamentos código C**

<http://es.slideshare.net/javi2401/variables-constantes-y-tipos-de-datos-en-c-presentation>

### **Guía utilización IMU**

[http://www.starlino.com/imu\\_guide.html](http://www.starlino.com/imu_guide.html)

### **Calibración acelerómetro**

<https://learn.adafruit.com/adxl345-digital-accelerometer/programming>

### **Calibración magnetómetro**

<http://www.todopic.com.ar/foros/index.php?topic=41981.0>

### **Cálculo de inclinaciones con acelerómetro**

<http://fuenteabierta.teubi.co/2013/03/inclinometro-digital-con-arduino-uso-de.html>

### **Calibración equipos de medida**

<http://www.eni.es/wp-content/uploads/items/6-Calibraci%C3%B3n%20equipos%20de%20medida%20seg%C3%BAn%20ISO%209000.pdf>

### **Determinar intervalos de confianza**

[https://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo\\_de\\_confianza](https://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_de_confianza)