



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

CALIBRACIÓN DE SENSORES ACELEROMAGNÉTICOS DEL TELESCOPIO SUBMARINO KM3NET

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

REALIZADO POR

Josep Baeza Guzmán

TUTORIZADO POR

Alicia Herrero Debón

Miguel Ardid Ramírez

Chiara Poirè

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Resumen

En este proyecto se describe la calibración de los sensores aceleromagnéticos de los módulos que se encargan de detectar y determinar la trayectoria de neutrinos a través de la radiación de Cherenkov generada en la interacción y captada por la matriz de fotomultiplicadores que constituyen los telescopios submarinos de neutrinos KM3NeT.

El objetivo de este proyecto es definir el modelo de calibración y ver los diferentes efectos que afectan a esta calibración, como la presencia de metales o de un campo magnético inducido. Dados los resultados de varias calibraciones realizadas en el laboratorio se analizarán los datos para ver en qué medida afectan estos a la calibración.

Resum

En aquest projecte es descriu el calibratge dels sensors acceleromagnètics dels mòduls que s'encarreguen de detectar i determinar la trajectòria de neutrins mitjançant la radiació de Cherenkov generada en la interacció i captada per la matriu de fotomultiplicadors dels telescopis submarins de neutrins KM3NeT.

L'objectiu d'aquest projecte és definir el model de calibratge i veure els diferents efectes que afecten el calibratge, com la presència de metalls o d'un camp magnètic induït. Donats els resultats de diverses calibracions, realitzades al laboratori, s'analitzaran les dades per veure en quina mesura afecten aquests al calibratge.

Abstract

This project describes the calibration of the acceleromagnetic sensors of the modules that detect and determine the trajectory of neutrinos using the information of the Cherenkov radiation generated in the interaction and captured by the photomultiplier matrix of the KM3NeT neutrino submarine telescopes.

The objective of this project is to define the calibration model and see the different effects that affect this calibration, such as the presence of metals or an induced magnetic field. Given the results of various calibrations, the data will be analysed to see to what extent they affect the calibration.

Índice

MEMORIA	1
1. Objeto del proyecto	1
2. Introducción	2
2.1. Principio de detección	4
2.2. Estructura del sensor	5
2.3. Metodología	6
3. Calibración.....	7
3.1. Instrucciones para el calibrado.....	12
4. Resultados	14
4.1. Comparación entre un experimento correcto y uno incorrecto	15
4.2. Comparación entre diferentes medios que podrían alterar la calibración.....	16
5. Estudio de las calibraciones	25
5.1. Formulas	25
5.2. Datos obtenidos.....	26
5.3. Comparación datos diferentes medios.....	28
6. Sistema de posición del DOM.....	38
7. Cálculos matemáticos.....	40
7.1. Cálculo Azimuth	41
7.2. Determinación de Pitch y Roll a partir de la salida de los acelerómetros	43
7.3. Conversión de los datos de salida del sistema de coordenadas interno de la tarjeta al sistema de coordenadas KM3NeT	43
8. Conclusiones.....	46
Bibliografía.....	47

Índice de figuras

Fig. 1 MODULO ÓPTICO DIGITAL (DOM)	3
Fig. 2 Esquema del detector dentro del telescopio KM3NeT	3
Fig. 3 -Ilustración artística de la posición in situ del KM3NeT	4
Fig. 4. Principio de detección de muon-neutrinos de gran energía en un telescopio submarino. El neutrino (ν) interactúa con la materia alrededor del detector para crear un muon (μ). El muon genera luz de Cherenkov en el agua del mar, la cual es detectada por una matriz de sensores de luz. El espectro original de luz emitida por el muon es atenuada en el agua de forma que el rango de longitudes de onda dominantes detectados es entre 350 y 500 nm. 5	
Fig. 5. Esquemático del detector del telescopio KM3NeT	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 6 Gimbal dispuesta en el laboratorio para la calibración de las CLBs	7
Fig. 7.....	8
Fig. 8.....	8
Fig. 9.....	9
Fig. 10.....	9
Fig. 11.....	10
Fig. 12.....	10
Fig. 13.....	11
Fig. 14.....	11
Fig. 15 Visualización de las variables en la pantalla del ordenador	14
Fig. 16 CLB en el espacio donde se han realizado todas las calibraciones, libre en mayor medida de elementos magnéticos o ferrosos	16
Fig. 17 CLB cerca de material ferromagnético.....	17
Fig. 18 CLB dentro de un campo magnético inducido por Bobinas de Helmholtz.....	17
Fig. 19 CLB expuesta a posibles campos magnéticos inducidos por diferentes aparatos presentes en un laboratorio de electrónica(ordenador, osciloscopio, generadores de señal, ...).	18
Fig. 20 21 Representación del sistema de coordenadas de la tarjeta CLB en los que se muestra la orientación una vez instalada en la unidad de detección óptica DOM (apuntado el eje Z hacia el fondo marino) en KM3NeT.....	40
Fig. 22 Representación de Yaw'	44

Índice de tablas

Tabla 1.....	15
Tabla 2.....	15
Tabla 3.....	15
Tabla 4 Datos experimento Medio Normal y Medio con Hierro	19
Tabla 5-Datos Experimento Medio Laboratorio y con campo magnético de 1V	21
Tabla 6-Datos Experimento Campo Magnetico 2,5V y 4V	23
Tabla 7 Datos obtenidos en las diferentes calibraciones correctas hechas en el laboratorio(parte 1).....	26
Tabla 8 Datos obtenidos en las diferentes calibraciones correctas hechas en el laboratorio(parte 2).....	27
Tabla 9 Resultados estadísticos obtenidos.....	27
Tabla 10 Medio Normal	28
Tabla 11-Medio con presencia de materiales ferrosos	29
Tabla 12 Medio con presencia de elementos electrónicos	30
Tabla 13Medio de campo magnético inducido de 1 Voltio	31
Tabla 14 Medio de campo magnético inducido de 2,5 Voltios.....	32
Tabla 15 Medio de campo magnético inducido de 4 Voltios.....	33
Tabla 16 Estudio estadístico de los módulos de dirección en los diferentes medios	35

Índice de Acrónimos

DOM *Digital Optical Module*

CLB *Central Logic Board*

DU *Detection Unit*

ARCA *Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss*

ORCA *Oscillation Research with Cosmics in the Abyss*

AHRS-LNS *Attitude Heading Reference System*

PMT *Photomultiplier tubes*

MEMORIA

1. Objeto del proyecto

El objetivo principal para desarrollar es el estudio de **la calibración de las placas CLBs** (Central Logic Board) **introducidas en los módulos DOM** (Digital Optical Module) **y los posibles efectos que pueden alterar esta calibración.**

Para ello se identificará los diferentes componentes que forman el módulo sensorial, se verificará la parte matemática asociada a la calibración de las placas, se comprobará el método de calibrado, se estudiará el muestreo de placas ya calibradas para buscar diferentes variables estadísticas, comparando calibraciones correctas e incorrectas; se clasificarán los posibles efectos que pueden alterar las calibraciones, como la introducción de un campo magnético, la posición global o la presencia de elementos ferromagnéticos en las proximidades de la placa.

2. Introducción

Como explica en su página web KM3NeT (KM3NeT, 2021) es una colaboración científica que se dedica al estudio de neutrinos en el universo. Sus principales líneas de investigación son el análisis de neutrinos de alta energía y la determinación de la masa relativa de los neutrinos.

A su vez KM3NeT es un telescopio submarino situado en el Mar Mediterráneo. Está formado por una matriz de sensores ópticos que detectan la luz emitida por efecto Cherenkov por las partículas generada desde la interacción de los neutrinos con la tierra. El experimento se divide en dos detectores distintos: ARCA y ORCA.

ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) permite estudiar neutrinos de fuentes astrofísicas de alta energía distantes como supernovas, estrellas colisionando, núcleos activos de galaxia, etc. Está localizada a 100 kilómetros de la costa de Sicilia, a 3500 metros de profundidad. La matriz 3D de detectores puede observar neutrinos cósmicos de energía entre Giga-electronvoltio (GeV) y Peta-electronvoltios (PeV). En ARCA la matriz 3D está formada de líneas ancladas al fondo marino y con una altura de 700 metros, por un total de 230 líneas.

ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) se dedicará más al estudio de los neutrinos atmosféricos y al estudio de propiedades de los neutrinos como la masa y oscilaciones. Los neutrinos que se generan en la atmósfera de la tierra, más concretamente al estudio de sus propiedades como masa y oscilaciones.

ORCA está instalado a 40 km de la costa francesa, en Toulon. Este detector está formado de una matriz de 115 líneas con una separación de 20 metros entre ellas y donde cada línea tiene una altura de 200 metros. El espectro de energía de los neutrinos que se van investigando es más pequeño respecto al ARCA.

A junio de 2021 ya hay seis líneas de detectores colocadas para ORCA y seis líneas para ARCA.

Los detectores que usa KM3NeT son matrices 3D de sensores que detectan la luz distribuidos en los grandes volúmenes de agua que ocupan tanto ORCA como ARCA. Estos detectores están controlados por un ordenador situado en las respectivas costas cercanas a los experimentos.

Los sensores registran el tiempo de llegada de la luz, su intensidad y la posición del sensor en el momento de llegada de la luz. Después, mediante cables de fibra óptica mandan la información al controlador situado en la costa, este analiza los datos y reconstruye el haz de las partículas atravesando el sensor. Estos datos son mandados a los centros de datos de KM3NeT vía Internet.

Los módulos de sensores son módulos ópticos digitales (DOM), son esferas de cristal suficientemente ancho para que sea resistente a una presión 350 veces más grande que la

atmosférica. En el interior hay: 31 tubos fotomultiplicadores(PMT) que detectan la luz y una placa central lógica (CLB). Los fotomultiplicadores están organizados para detectar la luz en todas las direcciones. Los fotomultiplicadores usan el detector Cherenkov, que usa la diferencia de velocidad incidente en un medio transparente siendo esta mayor que la velocidad de la luz en el medio, produciendo así una perturbación electromagnética. La CLB tiene diferentes funciones, la que nos interesa para este trabajo es que en ella hay integrada un chip que permite medir las componentes de campo magnético y aceleración de cada DOM. Gracias a estos datos es posible reconstruir la orientación de los DOM en la línea.

En cada línea (Detection Unit – DU) están instalados 18 DOM, para mantener verticalidad hay instalada una boya flotante.



Fig. 1 Modulo Óptico Digital (DOM)

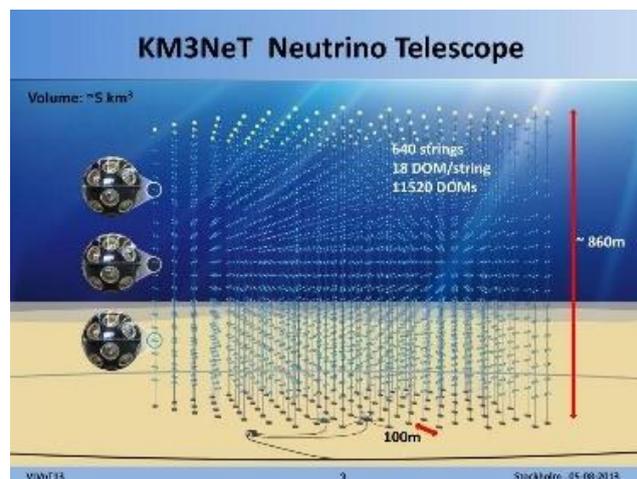


Fig. 2 Esquema del detector dentro del telescopio KM3NeT

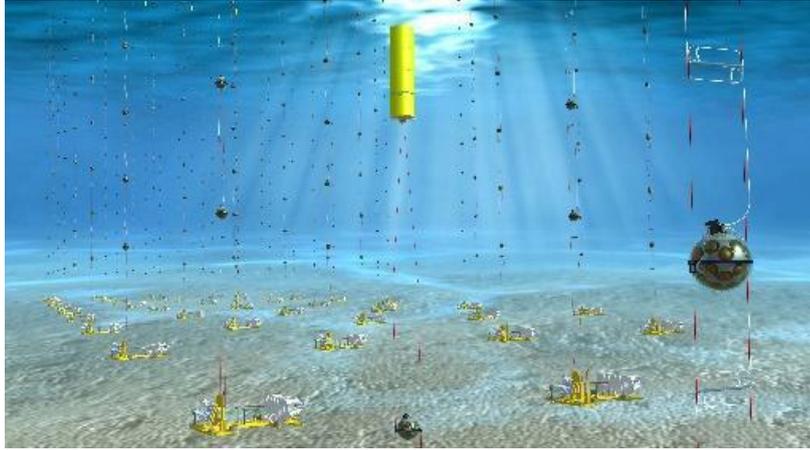


Fig. 3 -Ilustración artística de la posición in situ del KM3NeT

Una diferencia entre ARCA y ORCA se refiere a las dimensiones y el volumen de estas: ARCA tiene 4000 módulos sensoriales distribuidos en las cuerdas verticales a lo largo del kilómetro cúbico que ocupa este telescopio. El detector ARCA tendrá un total de 3.7 millones de toneladas de agua de mar como muestrario, que proveerá de nuevas oportunidades para estudiar fuentes astronómicas de neutrinos. ORCA en cambio, tiene 2000 sensores distribuidos en un volumen 125 veces más pequeño, óptimos para estudios de oscilación de los neutrinos.

2.1. Principio de detección

Según se expone en el artículo “*Deep sea test of a prototype of the KM3NeT digital optical module* (Adrián-Martínez S. A., 2014)” el telescopio está optimizado para detectar neutrinos ascendentes de gran energía mediante la observación de la radiación de Cherenkov producida por leptones secundarios (muones), originados en la interacción de los neutrinos con la materia, en el agua del mar.

La radiación de Cherenkov se produce cuando una partícula alcanza una velocidad superior a la velocidad máxima de la luz (en el medio) originando un cono de fotones. Para detectar dicha radiación, el detector está formado por una matriz de detectores de luz o fotomultiplicadores contenidos en esferas de cristal denominados DOM dispuestos en líneas ancladas al fondo del mar. Los DOMs, cuya posición es conocida, miden los tiempos de recepción de los fotones.

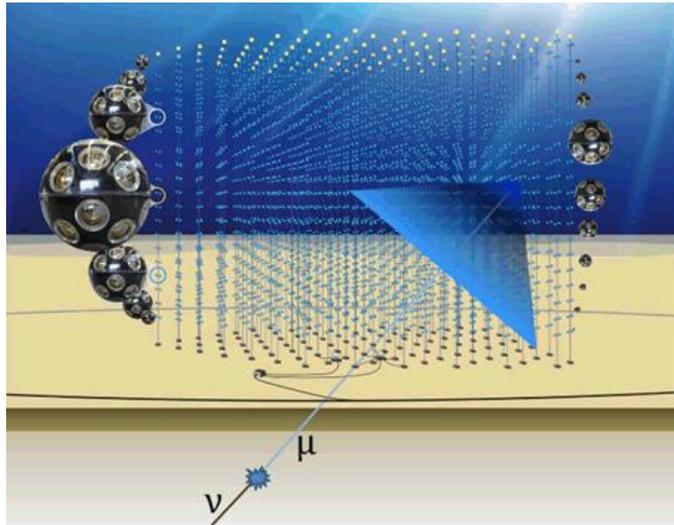


Fig. 4. Principio de detección de muon-neutrinos de gran energía en un telescopio submarino. El neutrino (ν) interactúa con la materia alrededor del detector para crear un muon (μ). El muon genera luz de Cherenkov en el agua del mar, la cual es detectada por una matriz de sensores de luz. El espectro original de luz emitida por el muon es atenuada en el agua de forma que el rango de longitudes de onda dominantes detectados es entre 350 y 500 nm.

2.2. Estructura del sensor

El elemento de detección básico es el DOM, explicado en el artículo “*The prototype detection unit of the KM3NeT detector*” (Adrián-Martínez S. A., 2016; Adrián-Martínez S. A., 2014), que como explica el artículo es una esfera de vidrio resistente a la presión que contiene 31 tubos fotomultiplicadores (PMT), varios dispositivos de calibración (como el sistema AHRS-LNS) y un sistema de lectura electrónico. Este diseño multi-PMT proporciona: un área grande de fotocátodos ($\approx 1400 \text{ cm}^2$ por DOM), buena separación entre impactos de fotones únicos y fotones múltiples y información sobre la dirección de los fotones. El detector está formado por una matriz de 18 DOMs distribuidos en 2 líneas verticales. Estas 2 líneas forman la unidad de detección (DU), el cual está anclado al fondo marino y se mantiene vertical gracias a una boya. En la siguiente figura (Fig.5), podemos observar un esquemático con los principales componentes del detector en la superficie del lecho marino.

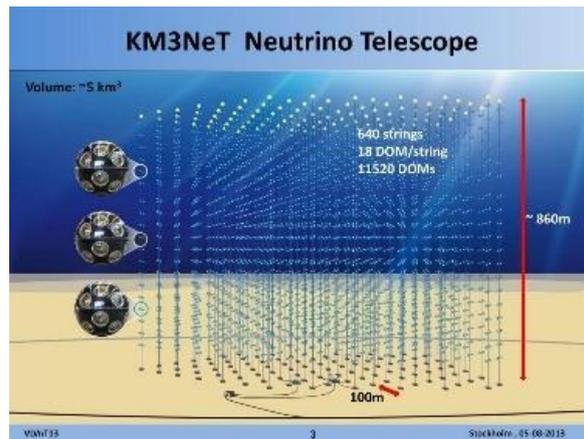


Fig. 5 Esquemático del detector del telescopio KM3NeT

Es necesario ser muy preciso en la medición de los tiempos de llegada de la luz y de las orientaciones en tiempo real de los PMTs para hacer una reconstrucción precisa de la dirección que tienen las partículas.

2.3. Metodología

La metodología que se va a seguir durante la calibración consiste en la medición de los resultados en 3 placas diferentes (723,725,745) para contrastar valores. Las mediciones serán hechas el mismo día y en el mismo medio para evitar errores.

Las mediciones constan de unos pasos previos, en los que se ejecuta correctamente el programa informático. Seguidamente, usando un gimbal (giroscopio en 3D) se gira de diferentes formas las CLBs. Una vez hayan terminado los giros el programa que entrega los valores de la desviación estándar del campo magnético y de la aceleración. Por último, se hará una comprobación de estos valores y obtendremos el desvío del eje de guiñada y 4 datos residuales que indican la variación respecto al norte.

3. Calibración

La calibración se llevará a cabo en un gimbal con un eje de rotación externo y uno interno. Ambos pueden rotar 360°. El medio de esta calibración esta (en la medida de lo posible) libre de elementos electrónicos y sin presencia de elementos ferrromagnéticos.

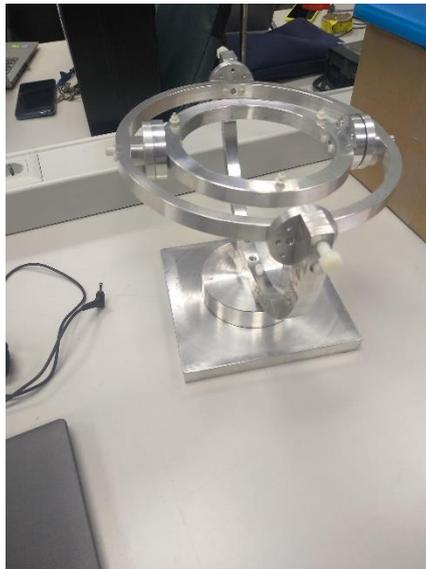


Fig. 6 Gimbal dispuesta en el laboratorio para la calibración de las CLBs

Para cada calibración se debe rotar la placa CLB dentro del gimbal como se observa en la Fig. 7. Las rotaciones duran aproximadamente un minuto. Las posiciones en las que se debe rotar son las siguientes:

1. Rotación placa posición vertical con el sensor mirando hacia arriba (Fig. 7)
2. Rotación placa posición horizontal con el sensor mirando hacia la izquierda (Fig. 8)
3. Rotación placa posición vertical con el sensor mirando hacia abajo (Fig. 9)
4. Rotación placa posición horizontal con el sensor mirando hacia la derecha (Fig. 10)
5. Rotación placa posición horizontal respecto al plano horizontal mirando hacia atrás (Fig. 11)
6. Rotación placa posición horizontal respecto al plano horizontal mirando hacia adelante (Fig. 12)
7. Rotación placa posición 45° respecto a la vertical (Fig. 13)
8. Rotación placa posición 45° respecto a la vertical y 45° respecto a plano horizontal (Fig. 14)



Fig. 7



Fig. 8

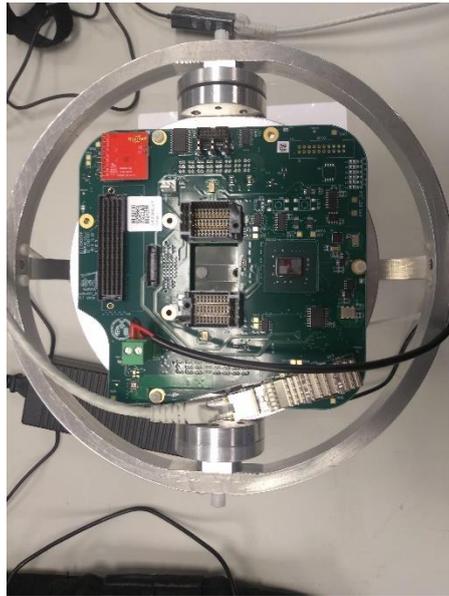


Fig. 9



Fig. 10

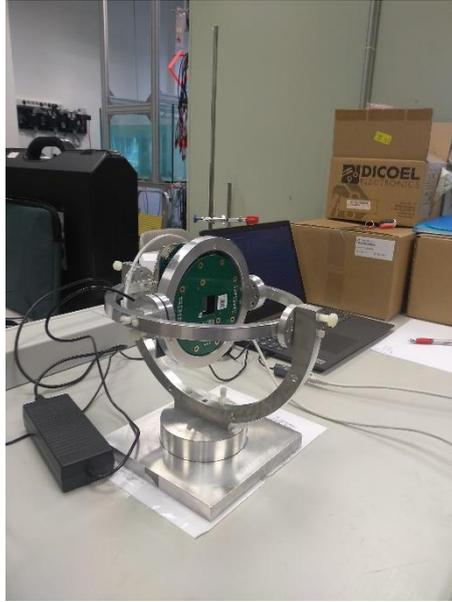


Fig. 11

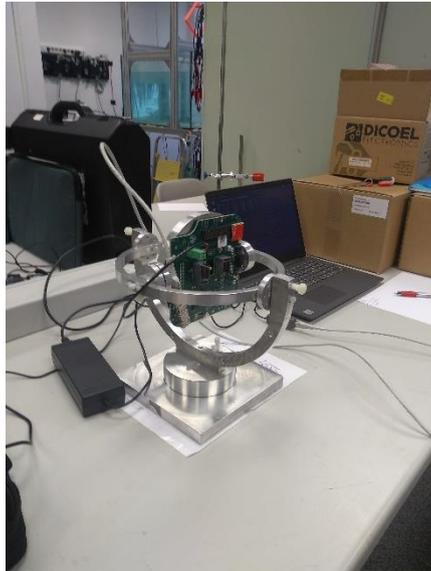


Fig. 12



Fig. 13



Fig. 14

Después se miden 4 datos residuales que miden el plano de trabajo respecto al norte geográfico (Orientación que debe estar la placa) en 4 posiciones diferentes con la placa en horizontal, se debe estar 30s en cada posición. Se orienta la base del gimbal respecto al norte para que la primera posición de la placa está en paralelo con esta, después se hacen tres rotaciones de 90° . La primera medida se considera como la posición de 0° respecto al norte, después con un giro de 90° , 180° y 270° respectivamente.

Los datos obtenidos en esta calibración son:

- Módulo de la componente del acelerómetro
- Módulo de la componente del magnetómetro
- Desviación del eje X
- 4 valores residuales

3.1. Instrucciones para el calibrado

- CLB cara arriba, sin importar la orientación de la gimbal o la placa CLB, pero siempre la misma.
- Rotar 360° lentamente en dirección de las agujas del reloj, 1 min de duración aprox.
- Rotar 360° en dirección contraria.
- Rotar el CLB 90° (en vertical) usando el monopolo externo de la gimbal.
- Rotar 360° en dirección de las agujas del reloj.
- Rotar el CLB 90° para que quede boca abajo.
- Rotar 360° en el sentido contrario de las agujas del reloj.
- Esta es la rotación más importante ya que esta será la posición de la placa en el DOM.
- Rotar el CLB 90° para que quede en vertical mirando hacia el lado contrario que la primera vez.
- Rotación de 360° en el sentido de las agujas del reloj.
- Volver a poner el CLB mirando hacia arriba.
- Poner en vertical, pero usando el monopolo interno.
- Rotar 360°, la dirección dependerá del cable (para no enredarlo).
- Poner en vertical mirando hacia el lado contrario que en la rotación anterior.
- Rotar 360° en la dirección contraria que antes.
- Poner el CLB en posición girado 45° verticalmente.
- Rotar 360°.
- Girar el monopolo externo para que este también este en una posición girada de 45°.
- Rotar 360°.
- Con esto se concluye la calibración de la placa, pero si se quiere se pueden hacer más combinaciones.

Una vez los valores de la calibración entran dentro de los parámetros que definimos como correctos, debemos hacer un “Calibration check”, para ello:

- Orientamos la base de la gimbal con el norte. Una vez consigamos orientarlo con el norte podemos mantener esta posición y marcarla en el lugar de trabajo para no tener que buscarla las próximas veces.
- Alineamos el CLB
- Haremos 4 medidas, una cada 90° desde la posición inicial, con una duración de 30s en cada posición medida.

Esta calibración tarda como media veinte minutos, una calibración de menos de quince

minutos se tomará como errónea.

Para el caso de estudio del proyecto las variables, cuyo **error** se debe minimizar al máximo posible, serán:

- La variación de módulo tanto del magnetómetro como del acelerómetro tiene unidades relativas. Representa la diferencia entre la desviación estándar y el valor absoluto, calculado en m/s^2 para la aceleración y en Gauss para el campo magnético. Si el valor es pequeño significa que la diferencia también lo es. Como el sensor tiene que ser lo más preciso posible se pide que la variación del módulo sea < 0.1 . Suele estar comprendido entre aprox. 0,015 y 0,018. Y el error en el acelerómetro aparece cuando el resultado es imaginario. Los datos correctos suelen estar comprendidos entre aprox. 0,012 y 0,015.
- La desviación del plano X no puede ser mayor de 3° , si está cerca repetir esta parte del experimento.
- Los residuales, que indican el desplazamiento respecto al norte en grados no deben superar los 6° de error, si es mayor de 3° lo mejor es repetir esta parte del experimento.

Podemos encontrar información más extensa sobre la calibración en "*KM3NeT_CALIB_2017_004-PRO_AHRS_Calibration_v5*" (P.Piattelli, Poma, Riccobene, & Viola, 2017)

4. Medidas y Resultados

Las tablas se han dividido entre las 3 componentes que se obtienen del programa se han escrito como A1,A2 y A3 para las componentes del acelerómetro y C1,C2 y C3 para las componentes del magnetómetro (llamadas compass).

```
Timestamp:
  Seconds: 1087
  Tics: 56794046
  1970 Jan 1 00:18:07 +908704736ns GMT (no-sync)
DOMIdentifier: 817344240 (MAC: 08:00:30:B7:AE:F0)
DOMStatus 1: 0
DOMStatus 2: 0
DOMStatus 3: 0
DOMStatus 4: 0
CH00: 0 CH01: 0 CH02: 0 CH03: 0 CH04: 0
CH05: 0 CH06: 0 CH07: 0 CH08: 0 CH09: 0
CH10: 0 CH11: 0 CH12: 0 CH13: 0 CH14: 0
CH15: 0 CH16: 0 CH17: 0 CH18: 0 CH19: 0
CH20: 0 CH21: 0 CH22: 0 CH23: 0 CH24: 0
CH25: 0 CH26: 0 CH27: 0 CH28: 0 CH29: 0
CH30: 0
SlowControl data:
Validity: 3
Yaw: 0, Pitch: 0, Roll: 0 deg
Acceleration: (-0.519531, 0.71875, -0.53125) g
Gyroscope: (0, 0, 0) deg/sec
Compass: (0.356445, -0.171875, -0.00292969) gauss
Temp: 36.96 Celsius, Humidity: 26.68 RH
```

Fig. 15 Visualización de las variables en la pantalla del ordenador

4.1. Comparación entre un experimento correcto y uno incorrecto

	723
std(H)/H	0,013811
std(A)/A	0,015903
yaw shift	0,0750
residuals	
1	0,375
2	3,325
3	4,575
4	1,625

Tabla 1

	725
std(H)/H	0,012276
std(A)/A	0,014697
yaw shift	4,235
residuals	
1	/
2	/
3	/
4	/

Tabla 2

	745
std(H)/H	0,012099
std(A)/A	0,014869
yaw shift	3,087
residuals	
1	1,254
2	5,899
3	7,893
4	3,475

Tabla 3

En la tabla 1 podemos observar que los datos obtenidos entran dentro de los baremos que hemos establecido anteriormente (entre 0,012 y 0,015 para las desviaciones estándares relativas, 3º para la desviación del eje de guiñada y menor de 6º para los residuales).

De otra forma podemos observar que en la tabla 2 el desvío del eje de guiñada es mayor

que 3 por lo tanto la calibración es errónea y hay que volver a repetirla.

En la 3ª tabla se acepta el desvío del eje de guiñada por ser muy cercano al límite, pero cuando calculamos los valores de los residuales son muy altos y debemos repetir la calibración.

4.2. Comparación entre diferentes medios que podrían alterar la calibración.

Medio 1: Se muestra en la figura 16 el medio donde se hacen de normal las mediciones. Alrededor de la gimbal solo se encuentra, como aparato electrónico, el ordenador para poder leer las mediciones de la CLB. En este medio no hay casi presencia de elementos ferrosos.



Fig. 16 CLB en el espacio donde se han realizado todas las calibraciones, libre en mayor medida de elementos magnéticos o ferrosos

Medio 2: Se muestra en la figura 17. En este medio hay mucha presencia de material ferroso, como la mesa, varillas de metal etc. puestas para el experimento.

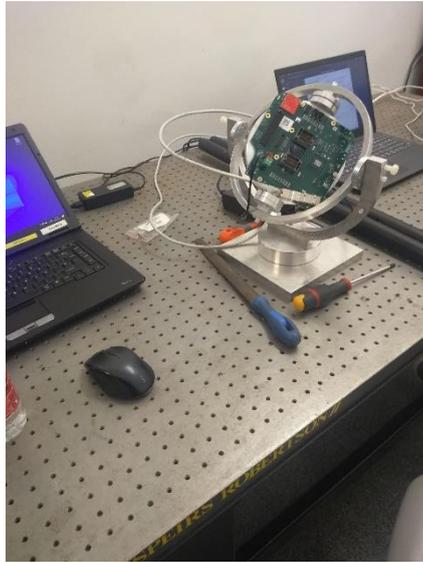


Fig. 17 CLB cerca de material ferromagnético

Medio 3: Se muestra en la figura 18. En este medio existe la presencia de un campo magnético inducido por unas bobinas de Helmholtz. Para esta parte del experimento se ha introducido un campo magnético alimentando las bobinas con 1V, 2.5V y 4V.



Fig. 18 CLB dentro de un campo magnético inducido por Bobinas de Helmholtz

Medio 4: Se muestra en la figura 19. En este medio se ha cambiado de laboratorio. Este laboratorio estaba 1 nivel más bajo que el de medio 1. Aparte, en este medio hay presencia de más elementos electrónicos como osciloscopios, fuentes de alimentación u ordenadores.



Fig. 19 CLB expuesta a posibles campos magnéticos inducidos por diferentes aparatos presentes en un laboratorio de electrónica(ordenador, osciloscopio, generadores de señal, ...).

Para la comprobación del experimento se ha hecho 1 calibración con la misma CLB en los distintos medios, con 2 medidas en cada una de las 8 posiciones de rotación, 16 en total. Las medidas se hacían al principio y a la mitad de cada rotación.

A continuación, se muestran unas tablas en las que están representados los datos expresados como componentes de un vector, que señala la dirección de la aceleración (A_1 , A_2 y A_3) y del campo magnético (C_1 , C_2 y C_3) respecto a las posiciones durante la calibración.

En total se hacen 8 rotaciones, en las cuales se mide el vector dos veces: una a principio de rotación y otra a mitad, para dar un total de 16 medidas.

Tras cada tabla se encuentran las gráficas que muestran la tendencia de los datos obtenidos. Estas gráficas están en función de la posición de la calibración y el resultado obtenido.

Normal	Posición	1	2	3	4	5
Acelerometro	A1	0,00781	0,0156	0,00781	0,0117	0,042
	A2	-0,39	-0,03125	-1,019	-1,01172	0,039
	A3	-0,96	-0,864	0,0273	0,0156	0,95
Magnetometro	C1	-0,3193	0,284	-0,358	0,284	-0,345
	C2	0,0058	0,867	0,2772	0,233	-0,203
	C3	0,341	0,306	0,182	0,141	-0,215

6	7	8	9	10	11	12
0,0273	0,0125	0,0351	1,015	1,01	-0,983	-0,9889
0,005	1	1,005	-0,035	-0,035	-0,039	-0,031
0,96	-0,0035	-0,031	-0,007	0,011	-0,019	-0,003
0,26	-0,282	0,266	-0,313	-0,272	0,277	0,274
0,041	-0,299	-0,299	0,011	-0,0625	-0,001	0,034
-0,219	0,14	0,848	-0,245	0,364	0,328	-0,236

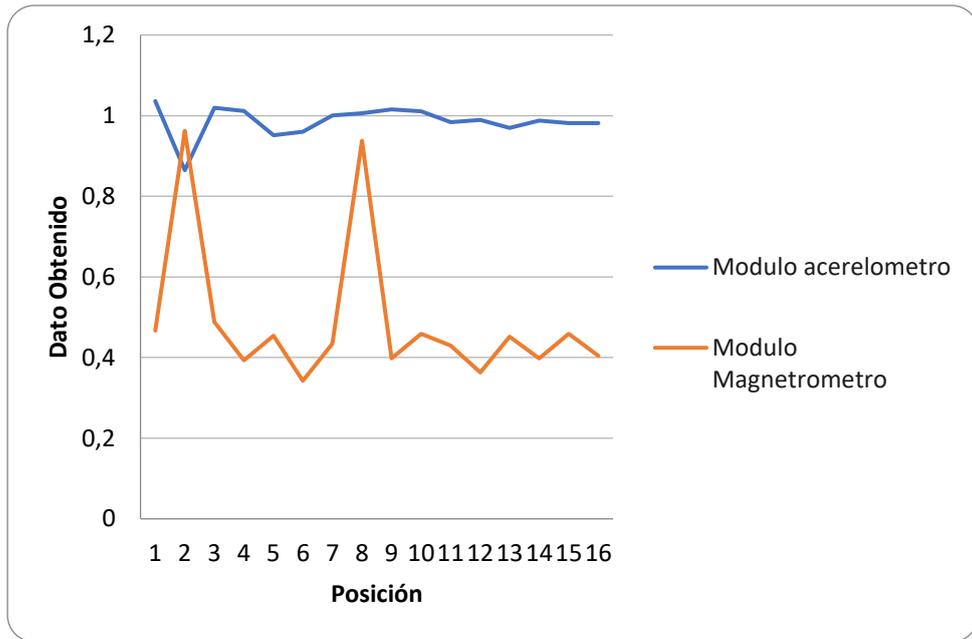
13	14	15	16
-0,695	-0,699	-0,496	-0,496
-0,0312	-0,1953	0,687	0,683
-0,675	-0,67	-0,496	-0,5
-0,005	0,386	-0,0625	0,336
-0,0283	0,079	-0,219	-0,224
0,451	0,058	0,398	-0,011

Ferro	Posición	1	2	3	4	5
Acelerometro	A1	0,04687	0,0429688	0,0351562	0,03125	0,0117188
	A2	0,0273438	-0,0117188	1,00391	1,00391	0,0078125
	A3	-0,96875	-0,96875	-0,0234375	-0,0195312	0,964844
Magnetometro	C1	-0,0205078	-0,0380858	0,0966797	-0,017578	-0,0478516
	C2	-0,306641	0,171875	-0,401367	-0,38085	-0,28125
	C3	0,422852	0,461914	-0,152344	0,263672	-0,305664

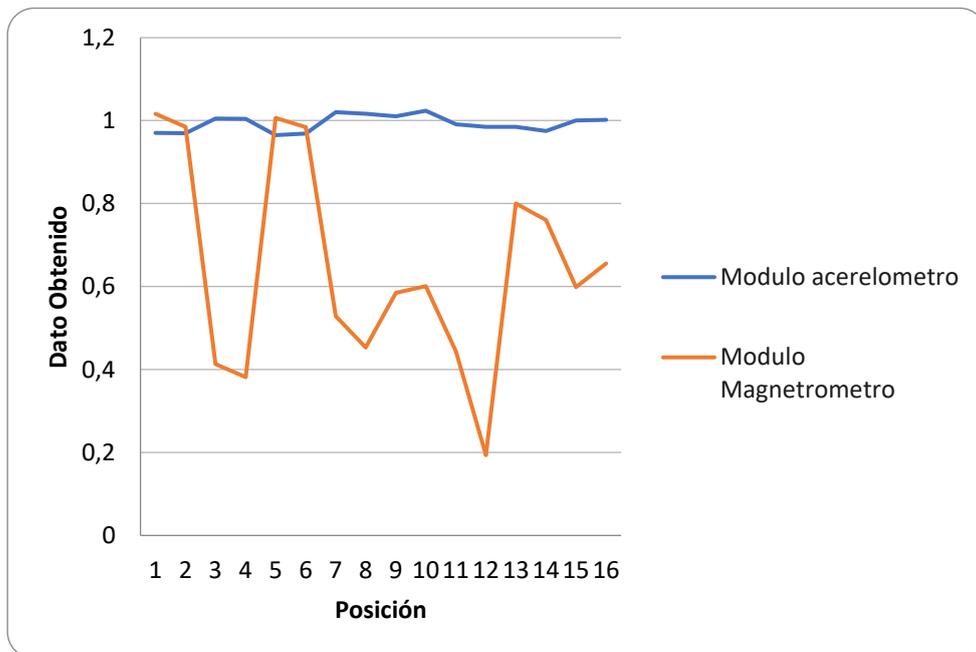
6	7	8	9	10	11	12
0,003986	0,0273438	0,0117188	1,01	1,023	-0,99	-0,984
0,0078125	-1,01953	-1,01562	-0,035	-0,039	-0,035	-0,023
0,96875	0,0351562	0,0351562	0,011	0,015	-0,039	-0,042
-0,1181	-0,0322266	0,037	-0,4394	-0,57	0,368	0,0386
0,12693	0,52637	0,45	-0,386	0,19	-0,244	0,185
-0,423828	0,423826	-0,21	0,034	0,11	0,023	0,132

13	14	15	16
-0,683	-0,671	-0,46	-0,468
-0,011	-0,031	-0,742	-0,739
-0,71	-0,707	-0,488	-0,488
0,254	0,223	0,3457	0,128
-0,267	0,17	0,025	0,419
0,309	0,378	0,375	0,171

Tabla 4 Datos experimento Medio Normal y Medio con Hierro



Gráfica 1 Valores Medio Normal



Gráfica 2 Valores medio con presencia de hierro

Lab	Posición	1	2	3	4	5
Acelerometro	A1	0,0546875	0,046	0,039	0,0234	-0,003
	A2	-0,0351562	-0,03125	1	1	-0,023
	A3	-0,960938	-0,957	-0,011	0,007	0,992
Magnetometro	C1	-0,0449	0,0587	-0,074	0,109	-0,0292
	C2	0,194	-0,212	-0,269	-0,275	-0,218
	C3	0,319	0,388	0,229	-0,137	-0,193

6	7	8	9	10	11	12
-0,007	0,027	0,0078125	1,01953	1,015	-0,9843	-0,988
-0,0351	-1,0234	-0,01953	-0,0234	-0,023	-0,023	-0,023
1	0,0156	0,015625	0,0351	0,0195	-0,023	-0,156
0,00097	-0,05468	-0,0285	-0,2861	-0,263	0,24	0,25
0,288	0,222	0,23	0,2158	-0,224	0,196	-0,216
-0,191	-0,152	0,293	0,0595	0,084	0,074	0,025

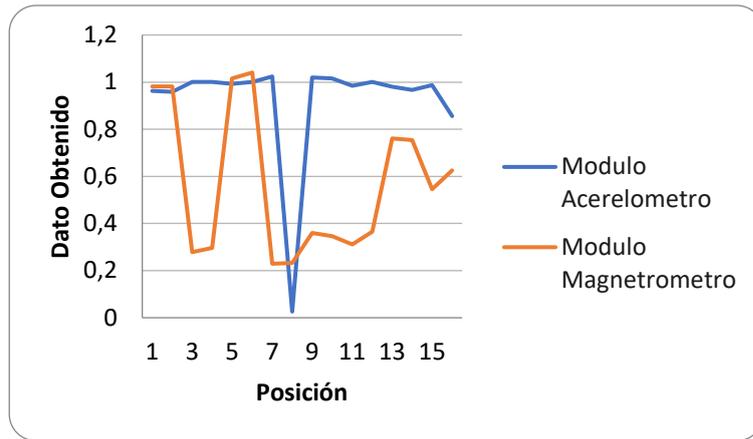
13	14	15	16
-0,675	-0,675	-0,488	-0,484
-0,039	-0,031	0,687	0,479
-0,71	-0,691	-0,515	-0,519
0,215	0,216	0,176	0,035
0,171	-0,209	-0,0458	-0,348
0,188	0,18	0,328	0,068

Mag 1V	Posición	1	2	3	4	5
Acelerometro	A1	0,0195	0,039	0,0234	0,0351	0,003
	A2	-0,0195	-0,019	1,003	1,003	-0,0117
	A3	-0,96	-0,968	-0,023	-0,0234	0,964
Magnetometro	C1	0,137	0,166	-0,168	-0,296	0,694
	C2	0,695	-0,885	-0,44	-0,416	-0,623
	C3	0,494	0,401	0,684	-0,626	-0,378

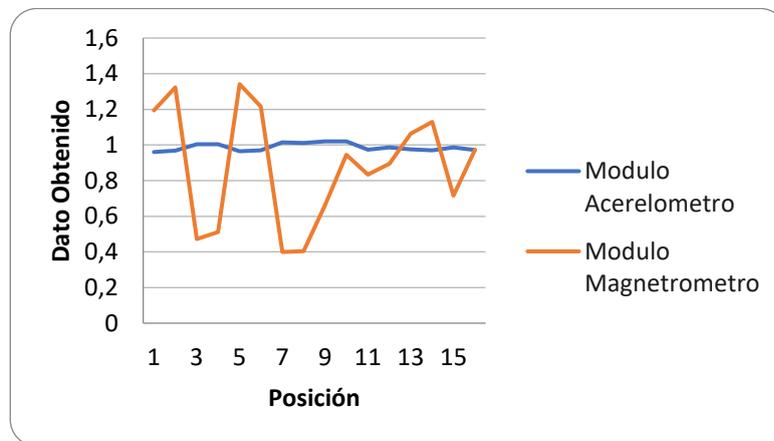
6	7	8	9	10	11
0,0234	0,0117	0,0312	1,0195	1,0195	-0,972
-0,0078	-1,015	-1,011	-0,0312	-0,023	-0,035
0,97	0,0312	0,023	-0,0156	0,007	-0,019
0,054	-0,098	0,0089	-0,431	-0,437	0,365
0,73	0,386	0,404	0,504	-0,804	0,75
-0,29	-0,554	0,823	0,471	0,215	0,128

12	13	14	15	16
0,9843	-0,6875	-0,675	-0,488	-0,46
-0,0351	-0,035	-0,0273	0,6875	0,687
-0,0273	-0,691	-0,695	-0,511	-0,511
0,398	0,543	0,233	0,468	-0,293
-0,801	0,599	-0,859	0,18	-0,772
0,154	0,128	0,314	0,668	-0,0117

Tabla 5-Datos Experimento Medio Laboratorio y con campo magnético de 1V



Gráfica 3-Valores medio experimento Laboratorio



Gráfica 4-Valores medio experimento Campo magnético IV

Mag 2.5V	Posición	1	2	3	4	5
Acelerometro	A1	0,02343	0,0468	-0,0273	0,039	0,117
	A2	-0,003	-0,0117	1	1	-0,0039
	A3	-0,957	-0,964	0	-0,003	0,964
Magnetometro	C1	0,361	-0,5806	-0,029	0,49	2003
	C2	1,522	-1,689	-0,41	-0,244	-0,538
	C3	0,543	0,351	1,515	-1,556	-0,383

6	7	8	9	10	11	12
0,234	0,008	0,0195	1,015	1,023	-0,984	-0,984
0,007	-1,015	-1,015	-0,007	-0,011	-0,023	-0,011
0,964	0,195	0,0117	-0,007	0,0312	-0,003	-0,023
0,0058	-0,137	-0,155	0,53227	-0,682	0,358	0,401
1,738	0,39	0,446	0,3896	-1,797	1,367	-1,484
-0,225	-1,316	1,719	1,349	0,381	1,142	-0,779

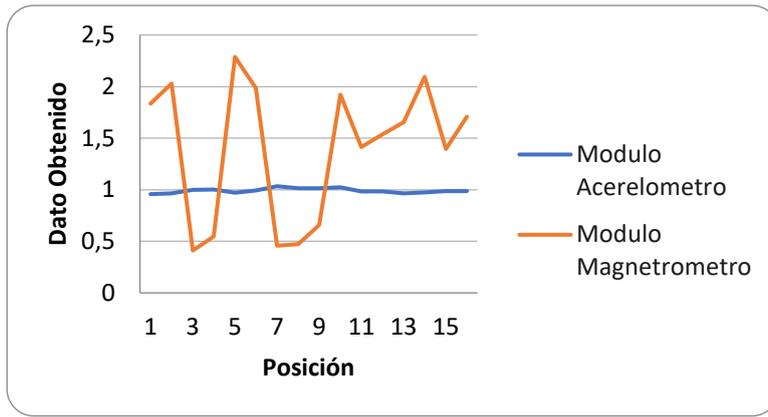
13	14	15	16
-0,678	-0,679	-0,4843	-0,468
-0,023	-0,0273	0,699	0,707
-0,687	-0,699	-0,5	-0,503
1,008	0,642	1,064	-0,854
1,117	-1,867	0,75	-1,392
-0,264	-0,181	0,938	-0,489

Mag 4V	Posición	1	2	3	4	5
Acelerometro	A1	0,0195	0,0351	0,0234	0,0351	0,0078
	A2	-0,0312	-0,035	0,996	1,003	0,0078
	A3	-0,968	-0,964	-0,0234	-0,0195	0,968
Magnetometro	C1	-0,683	-1,021	0,0058	0,75	-0,764
	C2	2,64	-2,57	-0,338	-0,395	-2,381
	C3	0,581	0,381	2,339	-2,372	-0,565

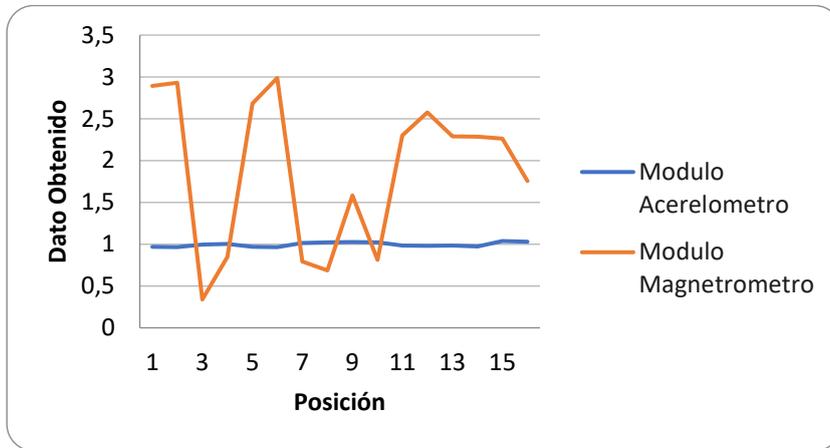
6	7	8	9	10	11	12
0,0234	0,0156	0,0273	1,0234	1,023	-0,984	-0,98
0,0156	-1,01562	-1,0195	-0,039	-0,011	-0,046	-0,042
0,964	0,03125	0,023	0,0273	0,015	-0,0039	-0,031
-0,982	-0,7333	0,397	-0,785	-0,691	0,291	0,353
2,651	0,297	0,56	-1,373	-0,428	2,281	-2,552
-0,202	-2,032	2,566	2,114	2,29	1,14	1,368

13	14	15	16
-0,984	0,6825	0,675	-0,5
-0,035	-0,039	-0,039	0,683
-0,007	-0,691	-0,787	-0,583
0,398	1,301	-1,266	0,982
2,256	1,748	-1,7	1,33
-1,112	-0,533	1,655	1,77

Tabla 6-Datos Experimento Campo Magnetico 2,5V y 4V



Gráfica 5-Valores medio experimento Campo magnético 2,5V



Gráfica 6-Valores medio experimento Campo magnético 4V

5. Estudio de las calibraciones

5.1. Formulas

Las fórmulas utilizadas para hacer el estudio de los datos obtenidos se basan en formulas estadísticas. Se ha calculado el promedio, la desviación media, el rango y la varianza de varias calibraciones correctas hechas en el laboratorio.

El promedio o media de un conjunto de números es el valor característico de estos. Se calcula sumando todos los datos y dividiendo el resultado entre el número de datos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

La desviación media se define como la media de las desviaciones respecto a la media estadística. Se calcula como la diferencia entre la media y cada valor dividido el número de datos.

$$D_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|$$

El rango es el espectro donde se encuentran los datos. Se calcula como la diferencia entre el valor máximo obtenido y el mínimo.

$$Rango = \text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}$$

La varianza representa cuánto ha variado una serie de datos respecto a la media de este conjunto. Se calcula como la diferencia entre la media y cada valor al cuadrado dividido el número de datos.

$$Var(X) = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{X})^2}{n}$$

Para la comparación de los diferentes medios, también se ha comprobado la dirección de las componentes en cada uno de los medios. Se ha estudiado las direcciones resultantes en cada una de las medidas. La dirección se ha calculado como el ángulo que forma respecto al vector promedio, siguiendo la fórmula:

$$\cos \alpha = \frac{u_1 \cdot v_1 + u_2 \cdot v_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}}$$

Siendo $U(u_1, u_2, u_3)$ el vector que medimos y $V(v_1, v_2, v_3)$ el vector promedio.

Los datos proporcionados por la calibración son:

- La desviación estándar de los datos del magnetómetro respecto a su valor absoluto (std(H)/H)
- La desviación estándar de los datos del acelerómetro respecto a su valor absoluto (std(A)/A)
- La desviación del eje X
- El desvío en grados(°) de los residuales.

Todos los cálculos de las calibraciones se han realizado utilizando el programa Microsoft Excel.

5.2. Datos obtenidos

Se han comparado los resultados obtenidos de 15 calibraciones correctas hechas en el laboratorio.

	723	725	730	807	833	944	721
std(H)/H	0,013811	0,013897	0,018499	0,01737	0,013844	0,013722	0,013369
std(A)/A	0,015903	0,012300	0,0097533	0,011493	0,0105	0,013509	0,010463
yaw shift	0,0750	1,2250	1,6500	2,9250	0,7000	1,3000	0,1500
residuals							
1	0,375	0,750	2,05	3,875	2,800	2,900	4,650
2	3,325	3,375	2,25	3,725	3,900	3,600	4,25
3	4,575	4,325	4,05	1,575	3,100	3,400	2,35
4	1,625	0,850	0,25	1,725	2,000	2,700	2,750

Tabla 7 Datos obtenidos en las diferentes calibraciones correctas hechas en el laboratorio(parte 1)

	722	724	727	728	749	750	1010	1012
std(H)/H	0,014663	0,016976	0,012751	0,015158	0,014544	0,014723	0,015056	0,01397
std(A)/A	0,018401	0,010972	0,007468	0,010704	0,0085591	0,01088	0,012939	0,00697
yaw shift	1,5750	0,1250	0,875	1,525	1,45	0,75	1,200	1,525
residuals								
1	3,925	3,525	3,825	4,325	4,85	4,25	2,4000	3,8759
2	3,365	4,075	4,675	3,3375	4,55	4,25	3,7000	4,8250
3	2,725	3,225	4,325	3,525	1,55	2,15	4,1000	3,5750
4	3,275	2,675	3,475	4,475	1,85	2,25	2,8000	2,6250

Tabla 8 Datos obtenidos en las diferentes calibraciones correctas hechas en el laboratorio(parte 2)

	MEDIA	MEDIANA	DESVIACIÓN MEDIA	RANGO	VARIANZA
std(H)/H	0,014823533	0,014544	0,001605853	0,005748	2,57877E-06
std(A)/A	0,01138764	0,01088	0,002993037	0,0114308	8,95827E-06
yaw shift	1,136666667	1,225	0,73799116	2,85	0,544630952
residuals					
1	3,22506	3,825	1,344663281	4,475	1,80811934
2	3,8135	3,725	0,661931562	2,575	0,438153393
3	3,236666667	3,4	0,987233991	3,025	0,974630952
4	2,355	2,625	1,044081962	4,225	1,090107143

Tabla 9 Resultados estadísticos obtenidos

Dada la Tabla 6, podemos observar que la varianza son valores muy pequeños para std(H)/H y std(A)/A, pero para la desviación del eje X(yaw shift) y los valores residuales, el valor es más significativo. Este comportamiento se repite en las columnas de desviación media y de rango.

También se puede observar en la misma tabla que la media y la mediana entran dentro de los valores que se entienden como correctos a la hora de hacer la calibración. De esta forma, podemos concluir que todas las CLBs están calibradas de la misma forma y por lo tanto que el método de calibración es correcto.

5.3. Comparación datos diferentes medios

Para la comparación de los diferentes medios se ha optado por comparar los vectores de dirección. Se ha separado en componentes del vector campo magnético y componentes del vector aceleración

En el experimento se hicieron 16 medidas, 2 por cada rotación del gimbal (una al principio y otra a mitad). Los datos obtenidos por el programa ya están escritos en forma vectorial, por lo tanto, solo era necesario calcular el vector unitario promedio(\bar{u}) para poder calcular el ángulo, que esta representado en la última fila de la tabla.

		1	2	3	4	5	6	7	8	
ACELERACIÓN	i	0,007536978	0,01804082	0,007661403	0,011562317	0,044130285	0,028425623	0,012498947	0,034887519	
	j	-0,37636636	-0,03613946	-0,99961198	-0,99981431	0,040978121	0,005206158	0,999915761	0,998916143	
	k	-0,92644026	-0,9991839	0,026780576	0,015416423	0,998185009	0,999582353	-0,00349971	-0,03081234	
	i media	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	
	j media	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	
	k media	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	
	u	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	
	Normal	1,454391567	1,403635929	1,616907018	1,616149213	1,731728328	1,729669867	1,530148175	1,529625892	
			9	10	11	12	13	14	15	16
	ACELERACIÓN	i	0,999382261	0,999340913	-0,99902759	-0,99950442	-0,71698139	-0,70767147	-0,50517626	-0,5055687
j		-0,03446146	-0,03463063	-0,03963589	-0,03133243	-0,03218679	-0,1977228	0,699709862	0,696176255	
k		-0,00689229	0,010883911	-0,01930979	-0,00303217	-0,69634883	-0,67831171	-0,50517626	-0,50964587	
i media		-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	-0,14190392	
j media		0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	0,041187513	
k media		-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	-0,1454878	
u		0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	0,982263341	
Normal		1,71385696	1,717198014	1,422355171	1,425213499	1,357313418	1,372679104	1,389380837	1,38864704	
		1	2	3	4	5	6	7	8	
CAMPO MAGNETICO		i	-0,68344686	0,29513268	-0,73363145	0,721765955	-0,75928039	0,759332064	-0,64947828	0,283676089
	j	0,012414631	0,900986035	0,568052061	0,592153055	-0,44676499	0,119740825	-0,68863123	-0,31886899	
	k	0,7298947	0,317995071	0,372963474	0,358341548	-0,47317474	-0,63959124	0,322436027	0,904350842	
	i media	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	
	j media	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	
	k media	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	
	u	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	
	Normal	0,851544265	1,379883404	1,363406172	0,84881175	2,378766093	2,407041346	1,311581994	0,984048228	
			9	10	11	12	13	14	15	16
	CAMPO MAGNETICO	i	-0,78715055	-0,59300756	0,645209283	0,754365943	-0,01106404	0,969246729	-0,13629818	0,831741774
j		0,027663438	-0,13626093	-0,00232928	0,093607453	-0,06262244	0,198369149	-0,47758884	-0,55449452	
k		-0,6161402	0,793583642	0,764002327	-0,64974585	0,99797596	0,14563811	0,867946835	-0,02722964	
i media		0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	0,056694576	
j media		-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	-0,01091091	
k media		0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	0,260577929	
u		0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	0,491596609	
Normal		2,828258589	0,684740859	0,46130763	2,366570989	0,546957929	1,088889602	0,125466498	1,336472941	

Tabla 10 Medio Normal

		1	2	3	4	5	6	7	8
ACELERACIÓN	i	0,048306214	0,044308088	0,034988299	0,031107337	0,012144504	0,004114412	0,026794451	0,011530894
	j	0,028181683	-0,01208406	0,999115477	0,999326944	0,008096301	0,008064186	-0,99904718	-0,99933498
	k	-0,99843493	-0,99894483	-0,02332557	-0,01944204	0,999893475	0,999959019	0,034449896	0,034592486
	i media	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864
	j media	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355
	k media	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572
	u	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275
	Ferro	1,421470422	1,416483798	1,673287415	1,673417593	1,733408169	1,731659763	1,479580517	1,477210332

		9	10	11	12	13	14	15	16
ACELERACIÓN	i	0,999340913	0,999166856	-0,99860206	-0,99881801	-0,69322777	-0,68805098	-0,45992918	-0,46723227
	j	-0,03463063	-0,03809141	-0,03530411	-0,02334636	-0,01116472	-0,03178775	-0,74188576	-0,7377877
	k	0,010883911	0,01465054	-0,03933887	-0,04263248	-0,72063209	-0,72496579	-0,48792487	-0,48719946
	i media	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864	-0,13087864
	j media	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355	-0,101355
	k media	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572	-0,15302572
	u	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275	0,994868275
	Ferro	1,699395667	1,697931093	1,428069493	1,427862608	1,363085208	1,358729528	1,358091246	1,357971436

		1	2	3	4	5	6	7	8
CAMPO MAGNETICO	i	-0,0201783	-0,03868098	0,233801728	-0,04604519	-0,04755964	-0,12000301	-0,06097447	0,081698417
	j	-0,30171413	0,174560488	-0,97063084	-0,99762836	-0,279534	0,128975295	0,995920452	0,993629402
	k	0,416057944	0,469131247	-0,3684154	0,690683113	-0,30379904	-0,43065738	0,801901669	-0,46369372
	i media	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818
	j media	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038
	k media	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092
	u	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224
	Ferro	1,437532871	1,396803459	1,944539574	1,004913526	1,692015454	1,730427974	0,925525493	1,842972697

		9	10	11	12	13	14	15	16
CAMPO MAGNETICO	i	-0,75115023	-0,94838779	0,830209194	0,199385485	0,317523567	0,293198294	0,57755004	0,195177972
	j	-0,65986342	0,316129265	-0,55046479	0,955604008	-0,33377477	0,223514395	0,041766708	0,638902894
	k	0,058122685	0,183022206	0,051888075	0,681836374	0,38627867	0,496990831	0,626500622	0,260745573
	i media	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818	0,043472818
	j media	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038	0,023462038
	k media	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092	0,222287092
	u	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224	0,625954224
	Ferro	1,667121851	1,552530506	1,445367293	0,845366921	1,386343821	1,297574512	1,113727198	1,371094824

Tabla 11-Medio con presencia de materiales ferrosos

		1	2	3	4	5	6	7	8
ACELERACIÓN	i	0,056780737	0,047985926	0,03896802	0,023393023	-0,00302337	-0,00699552	0,026370408	0,298152998
	j	-0,03650185	-0,03259913	0,99918001	0,999701853	-0,02317915	-0,03507754	-0,99953612	-0,74533479
	k	-0,99771918	-0,99831591	-0,01099098	0,006997913	0,999726756	0,99936011	0,015236236	0,596305996
	i media	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855
	j media	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662
	k media	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634
	u	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317
	Lab	1,434970393	1,432669961	1,49180384	1,492197896	1,715167203	1,714360516	1,657109075	1,712628641

		9	10	11	12	13	14	15	16
ACELERACIÓN	i	0,999145075	0,999559005	-0,99945444	-0,98750193	-0,68847235	-0,69841693	-0,49413117	-0,56529636
	j	-0,02293213	-0,02265011	-0,02335411	-0,02298841	-0,0397784	-0,03207544	0,69563138	0,559456526
	k	0,034398195	0,01920335	-0,02335411	-0,15592136	-0,72417091	-0,714972	-0,52147039	-0,60617523
	i media	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855	-0,12205855
	j media	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662	0,076122662
	k media	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634	-0,13011634
	u	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317	0,92097317
	Lab	1,707614187	1,706183412	1,434485117	1,419289049	1,375490777	1,371941136	1,370326015	1,326844771

		1	2	3	4	5	6	7	8
CAMPO MAGNETICO	i	-0,04575316	0,059778612	-0,26503387	0,368371499	-0,02873759	0,000932113	-0,23860386	-0,12269403
	j	0,197686241	-0,2158955	-0,96343393	-0,92937764	-0,21454774	0,276751064	0,968728183	0,99016231
	k	0,325061397	0,395129494	0,820172376	-0,46299904	-0,18994364	-0,18353977	-0,66327335	1,261380681
	i media	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062
	j media	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831
	k media	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144
	u	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465
	Lab	1,464946522	1,402233879	0,651529599	1,856703115	1,627450464	1,654128869	2,347413661	0,934304034

		9	10	11	12	13	14	15	16
CAMPO MAGNETICO	i	-0,79455407	-0,76008624	0,772407262	0,684246191	0,282414512	0,28664817	0,322245626	0,055923817
	j	0,599317612	-0,64737383	0,630799264	-0,59118871	0,224618054	-0,27735865	-0,0838571	-0,55604252
	k	0,165242808	0,242765188	0,238158906	0,068424619	0,246948504	0,238873475	0,600548667	0,108651986
	i media	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062	0,036094062
	j media	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831	-0,03693831
	k media	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144	0,200725144
	u	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465	0,542951465
	Lab	1,661189057	1,32777827	1,255074315	1,262103314	1,445963105	1,402479678	1,09710899	1,439857259

Tabla 12 Medio con presencia de elementos electrónicos

		1	2	3	4	5	6	7	8	
ACELERACIÓN	i	0,020304124	0,040248857	0,023317537	0,034964104	0,003111789	0,024115916	0,011520887	0,030837878	
	j	-0,02030412	-0,01960842	0,999465364	0,999116701	-0,01213598	-0,00803864	-0,99946156	-0,99926585	
	k	-0,99958766	-0,99899727	-0,02291895	-0,0233094	0,999921514	0,999676849	0,030722365	0,022733051	
	i media	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	
	j media	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	
	k media	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	
	u	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	
	Mag 1V	1,406327059	1,408080928	1,494671029	1,494794952	1,73746116	1,736279286	1,647640846	1,646877146	
	ACELERACIÓN			9	10	11	12	13	14	15
i		0,999415165	0,999722066	-0,99916171	0,998981119	-0,70485494	-0,69643339	-0,49499896	-0,47327457	
j		-0,03058534	-0,02255381	-0,03597805	-0,03562353	-0,03588352	-0,02816686	0,69736021	0,706825287	
k		-0,01529267	0,006864203	-0,01953094	-0,02770719	-0,70844329	-0,71706845	-0,51832883	-0,52574632	
i media		-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	-0,01138651	
j media		0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	0,072197618	
k media		-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	-0,15731331	
u		0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	0,9892325	
Mag 1V		1,58187787	1,584765322	1,558480305	1,580633546	1,449360512	1,446674917	1,4293099	1,425586663	
CAMPO MAGNETICO			1	2	3	4	5	6	7	8
	i	0,114830697	0,125562976	-0,356277	-0,57914707	0,517412035	0,044437055	-0,24532724	0,021988771	
	j	0,582535289	-0,66941707	-0,93310642	-0,81393642	-0,46447795	0,600723152	0,966288923	0,998141985	
	k	0,414061054	0,303317791	1,450556352	-1,22481779	-0,28181808	-0,23864344	-1,3868499	2,033343698	
	i media	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	
	j media	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	
	k media	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	
	u	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	
	Mag 1V	1,495510159	1,486150632	0,504908286	2,222215246	1,600725088	1,642117416	2,863085004	0,628096076	
CAMPO MAGNETICO			9	10	11	12	13	14	15	16
	i	-0,64974192	-0,52579376	0,437483235	0,44476901	0,510555992	0,206332491	0,653702058	-0,30173269	
	j	0,75979101	-0,85057985	0,898938154	-0,89512557	0,563210016	-0,76068502	0,251423869	-0,795009	
	k	0,710042789	0,227456054	0,153418778	0,172096552	0,120352057	0,278061811	0,933061912	-0,01204871	
	i media	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	0,026190915	
	j media	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	-0,03508031	
	k media	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	0,228224432	
	u	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	0,858860745	
	Mag 1V	1,361487343	1,486962865	1,549949505	1,463470525	1,547714855	1,472117752	1,20271569	1,550127449	

Tabla 13 Medio de campo magnético inducido de 1 Voltio

		1	2	3	4	5	6	7	8	
ACELERACIÓN	i	0,024475304	0,048487046	-0,02728983	0,038970199	0,120484164	0,235882662	0,007739992	0,019207003	
	j	-0,00313384	-0,01212176	0,999627563	0,999235877	-0,00401614	0,007056319	-0,98201152	-0,99974911	
	k	-0,99969552	-0,99875025	0	-0,00299771	0,992707125	0,971755925	0,188662312	0,011524202	
	i media	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	
	j media	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	
	k media	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	
	u	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	
	Mag 2.5V	1,423412637	1,42855759	1,484014485	1,491577461	1,733674299	1,740255471	1,677454575	1,656997768	
			9	10	11	12	13	14	15	16
ACELERACIÓN	i	0,999952441	0,999477519	-0,9997223	-0,99966451	-0,70222993	-0,69649734	-0,49093629	-0,4747217	
	j	-0,00689622	-0,01074707	-0,02336749	-0,01117511	-0,02382196	-0,0280035	0,708578291	0,717154362	
	k	-0,00689622	0,030482599	-0,00304793	-0,02336614	-0,71155157	-0,71701273	-0,50685142	-0,51022439	
	i media	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	-0,1185241	
	j media	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	0,082913043	
	k media	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	-0,14282886	
	u	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	0,993211682	
	Mag 2.5V	1,688215541	1,692787303	1,450838181	1,446819855	1,378904202	1,381032532	1,376335751	1,37696635	
			1	2	3	4	5	6	7	8
CAMPO MAGNETICO	i	0,196863912	-0,28607187	-0,07055543	0,895143294	0,875788038	0,002918306	-0,29974889	-0,32817344	
	j	0,82999134	-0,83220013	-0,99750786	-0,44574482	-0,23523413	0,874485622	0,853299761	0,944292618	
	k	0,296113862	0,172943898	3,68591319	-2,84253666	-0,16746222	-0,11321016	-2,87933971	3,639549351	
	i media	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	
	j media	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	
	k media	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	
	u	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	
	Mag 2.5V	1,519289922	1,57644831	0,977083351	2,553031739	1,531816967	1,579070782	2,392645726	0,833220258	
			9	10	11	12	13	14	15	16
CAMPO MAGNETICO	i	0,806887964	-0,35478001	0,253343053	0,260830677	0,609431012	0,306533708	0,763004209	-0,49976664	
	j	0,590609185	-0,93480892	0,967374173	-0,96526864	0,675331787	-0,89143058	0,537831915	-0,81460792	
	k	2,044999461	0,198198218	0,808150187	-0,50670099	-0,15961288	-0,0864215	0,672648448	-0,28616614	
	i media	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	0,195727992	
	j media	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	0,009775838	
	k media	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	0,279816647	
	u	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	1,371735264	
	Mag 2.5V	0,621007166	1,579564181	1,423140853	1,618311863	1,534989832	1,561363153	1,39060645	1,650169076	

Tabla 14 Medio de campo magnético inducido de 2,5 Voltios

		1	2	3	4	5	6	7	8
ACELERACIÓN	i	0,020130093	0,03636275	0,023481019	0,034967007	0,008057328	0,024263536	0,015351001	0,026761432
	j	-0,03220815	-0,03625915	0,99944849	0,999199647	0,008057328	0,016175691	-0,99940918	-0,99938756
	k	-0,99927845	-0,99868064	-0,02348102	-0,01942611	0,999935077	0,999574724	0,030751203	0,022546262
	i media	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663
	j media	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584
	k media	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809
	u	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442
	Mag 4V	1,440236353	1,439886206	1,544570689	1,545237415	1,702004337	1,70219928	1,597283563	1,596120532

		9	10	11	12	13	14	15	16
ACELERACIÓN	i	0,998919834	0,999834733	-0,99890127	-0,99858433	-0,99934276	0,702151483	0,650569547	-0,48644748
	j	-0,0380671	-0,01075091	-0,0466966	-0,04279647	-0,03554573	0,04012294	-0,03758846	0,664524549
	k	0,026646972	0,014660333	-0,00395906	-0,03158787	-0,00710915	-0,71089623	-0,7585159	-0,56722959
	i media	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663	0,003596663
	j media	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584	0,02303584
	k media	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809	-0,12662809
	u	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442	0,998040442
	Mag 4V	1,571440225	1,569335246	1,575034828	1,571385946	1,574371021	1,476211658	1,476478274	1,487461109

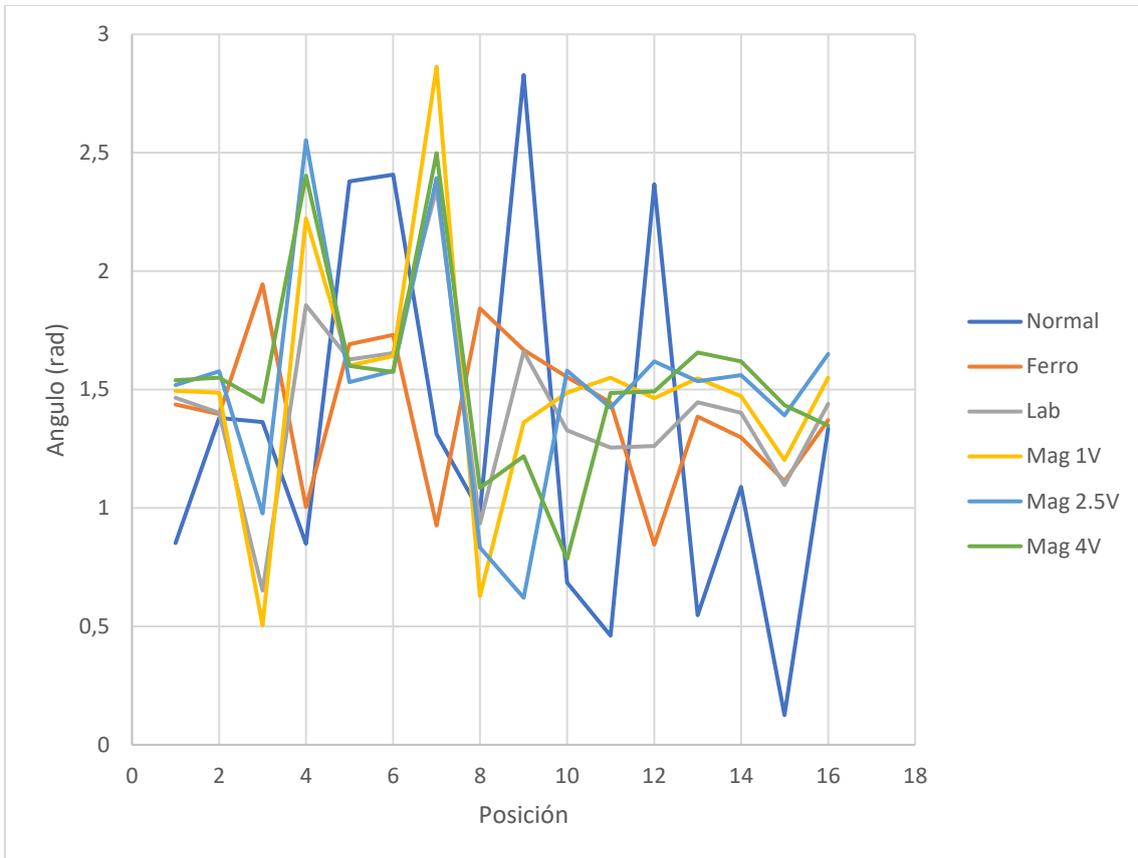
		1	2	3	4	5	6	7	8
CAMPO MAGNETICO	i	-0,23603545	-0,34863198	0,01711628	0,88455621	-0,28492628	-0,32877173	-0,92614192	0,578016287
	j	0,912347845	-0,87755553	-0,99746599	-0,46586627	-0,88797051	0,88754976	0,375104529	0,815337836
	k	0,200785643	0,130096754	6,902582667	-2,79755644	-0,21071119	-0,06762922	-2,56637173	3,735994441
	i media	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578
	j media	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907
	k media	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254
	u	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169
	Mag 4V	1,539002552	1,550332307	1,447080947	2,402683973	1,599930373	1,574793646	2,498188426	1,085628963

		9	10	11	12	13	14	15	16
CAMPO MAGNETICO	i	-0,49626927	-0,8499893	0,126549765	0,137008376	0,173734718	0,569127796	-0,55992902	0,560173065
	j	-0,86799709	-0,52647673	0,99195881	-0,99049681	0,984787749	0,764669783	-0,75187941	0,758686534
	k	1,336449993	2,816896512	0,495761965	0,530955972	-0,48540956	-0,23316304	0,731976715	1,009680576
	i media	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578	-0,06152578
	j media	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907	0,007795907
	k media	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254	0,720646254
	u	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169	1,80825169
	Mag 4V	1,218530834	0,785039373	1,484780925	1,492053176	1,656071946	1,618492885	1,434360129	1,348435314

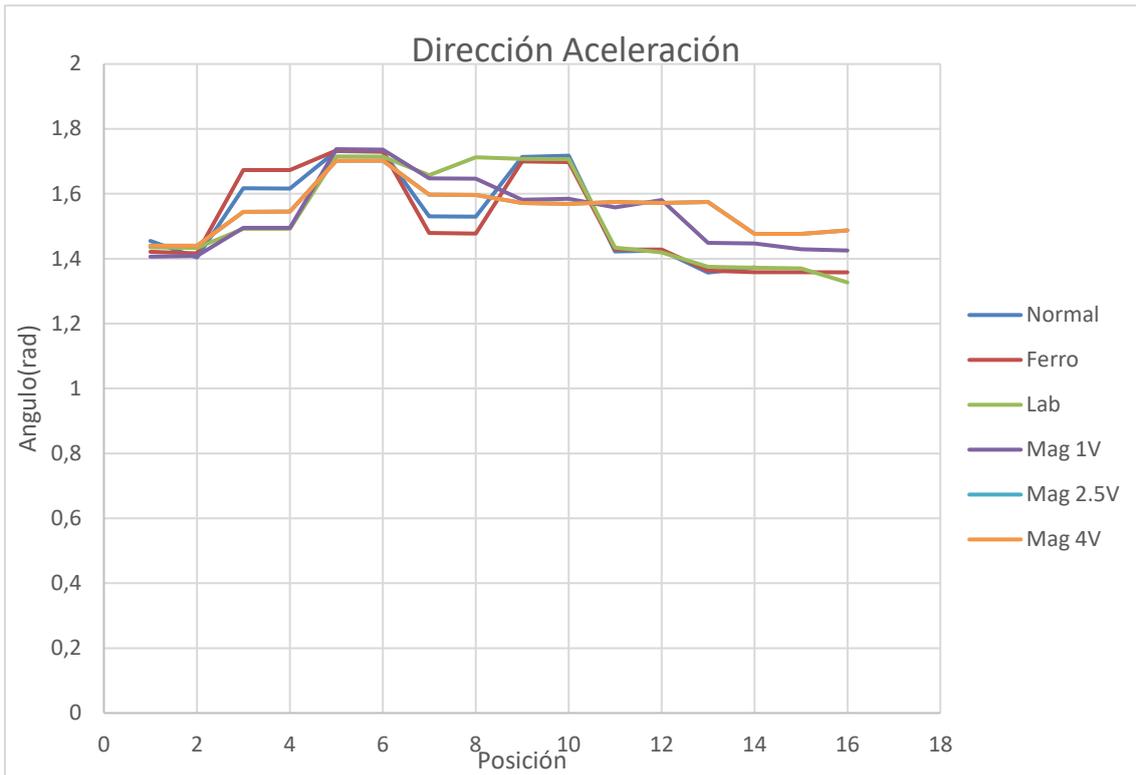
Tabla 15 Medio de campo magnético inducido de 4 Voltios

Teniendo estos datos podemos hacer una comparación de la dirección que tiene cada uno de los diferentes medios.

Para ello se han graficado comparando los valores de cada uno de los medios:



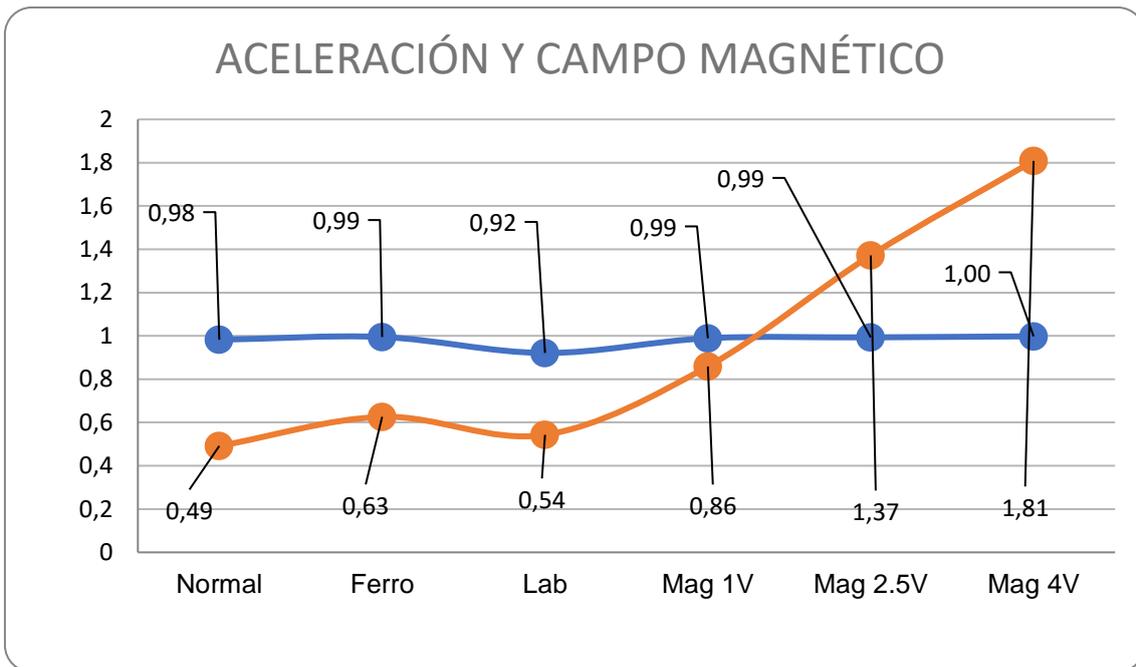
Gráfica 7 Comparación direcciones campo magnético



Gráfica 8 Comparación direcciones Aceleración

	Normal	Ferro	Lab	Mag 1V	Mag 2.5V	Mag 4V
ACELERACION	0,982263341	0,994868275	0,92097317	0,9892325	0,993211682	0,998040442
CAMPO MAGNETICO	0,491596609	0,625954224	0,542951465	0,858860745	1,371735264	1,80825169
	DESVIACION STD	VARIANZA	RANGO			
ACELERACION	0,029309618	0,0008590537	0,077067272			
CAMPO MAGNETICO	0,529828413	0,280718147	1,316655081			

Tabla 16 Estudio estadístico de los módulos de dirección en los diferentes medios



Gráfica 9 Estudio del módulo de los valores de aceleración y campo magnético

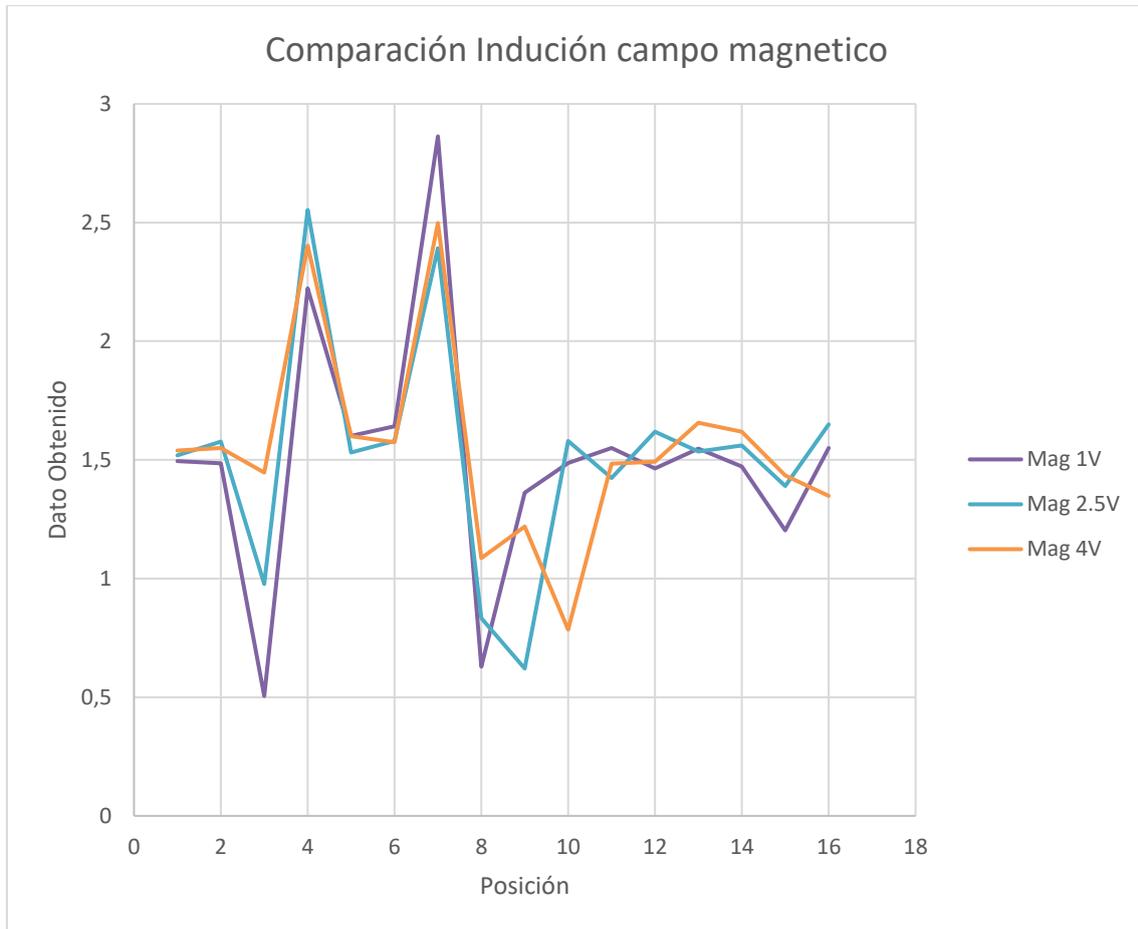
Como podemos ver la desviación media de la muestra entre los diferentes medios es de 0,03, lo cual nos hace ver que, en cuanto al módulo de la aceleración, el medio donde esté hecho el experimento no afecta en gran medida al resultado. Podemos observar que en el otro laboratorio el promedio es menor, aunque lo más seguro es que se deba a un error humano, ya que el resto de las mediciones sí que se aproxima a los resultados en otros medios.

La desviación media entre los diferentes medios de la componente de campo magnético es de 0,86. Esto indica que en esta parte sí afecta el medio al experimento. Se puede observar que afecta en menor medida cuando está en presencia de elementos ferromagnéticos. Aunque si nos fijamos más en las medidas podemos observar que la dispersión de estas es mayor. Además, cuando introducimos un campo magnético en el medio aumenta de manera proporcional. También, el promedio de las medidas hechas en el segundo laboratorio, son menores si lo comparamos con el medio con mucha presencia de hierro, pero mayores que las hechas en el medio normal. De esta forma podemos ver como la presencia de elementos electrónicos afecta a las medidas hechas por el sensor.

Si observamos la varianza y el rango de la comparación entre medidas podemos confirmar nuestra teoría: Mientras que la varianza y el rango de la componente de aceleración en los diferentes medios es pequeña(0,0009 y 0,08 respectivamente), en la componente magnética la varianza es 100 veces más grande(0,75) y el rango también es significativamente más alto(2,2).

En la Gráfica 8 podemos observar que en la aceleración se mantiene un valor estable en la mayoría de los casos, conclusión que concuerda con el estudio del módulo(Gráfica 9). Por la parte del campo magnético(Gráfica 7) podemos observar más caos en las medidas, cosa que también concuerda con el estudio del módulo(Gráfica 9). Podemos observar también en la gráfica

del campo magnético(Gráfica 7) que cuando en el medio se está induciendo un campo magnético, sin importar lo fuerte que sea, la dirección de esta será aproximadamente la misma.



Gráfica 10 La dirección del campo magnético es aproximadamente igual en los 3 medios. Las líneas de las gráficas siguen la misma tendencia.

Como conclusión podemos decir que, aunque para que la calibración sea lo más efectiva posible se debería hacer en un medio donde hubiese la menor cantidad posible de elementos que pudieran provocar cambios en la componente magnética, para poder así comprobar la fuerza que hace el campo magnético terrestre en el dispositivo, porque si hay un campo magnético inducido se mediría la componente magnética respecto a ese campo y no la terrestre. Para la aceleración lo único que hay que tener en cuenta es el error humano al mover la gimbal mientras se hacen las medidas, ya que como se ha explicado anteriormente, los datos son más precisos si la gimbal gira con una velocidad constante de cerca de 1 revolución cada 2 min.

En resumen: **Las condiciones del espacio en el que hagamos la prueba son condicionantes a la hora de calibrar las CLBs.**

6. Sistema de posición del DOM

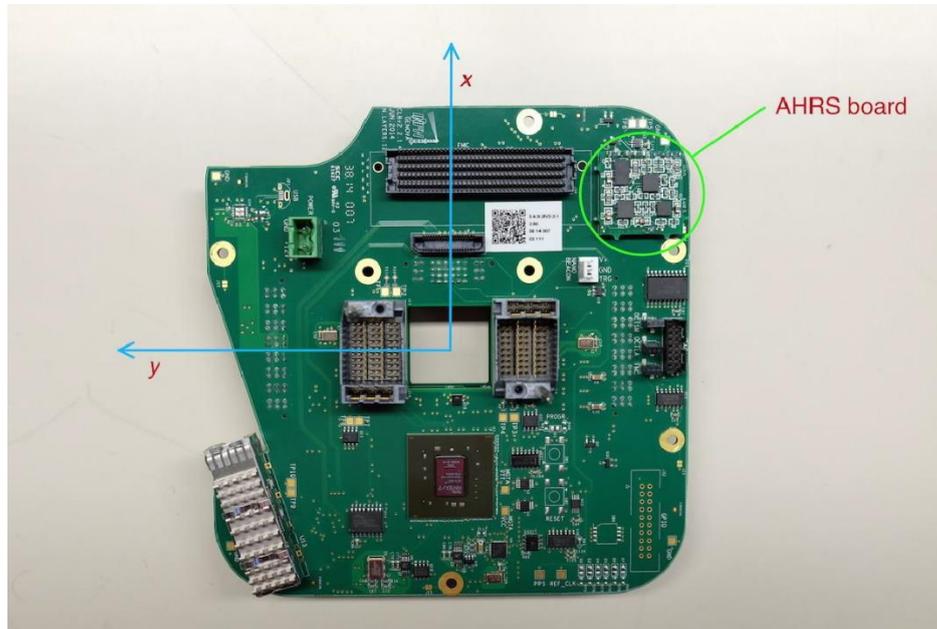


Ilustración 1-Placa CLB con ejes de posición, el eje Z apunta hacia abajo

Como lo expuesto en la introducción, dentro de cada DOM se introduce los 31 tubos fotomultiplicadores y la CLB, que se encarga de detectar la posición geométrica del este. Gracias a la disposición de los fotomultiplicadores se puede detectar las partículas de haz de luz en cualquier dirección usando el detector Cherenkov que llevan integrado cada fotomultiplicador.

La otra parte importante del CLB es la placa mostrada en la Ilustración 17 dentro del círculo rojo: La placa AHRS. La placa llamada AHRS-LNS (Attitude Heading Reference System), explicada en “*The positioning system of KM3NeT*” (Riccobene, 2019), es donde están incluidos los sensores necesarios para la calibración de la placa. Siendo estos sensores de posición, magnéticos y acelerómetros. Además de un giroscopio microelectromecánico.

Este sistema es necesario porque el experimento está situado en el Mar Mediterráneo, y las corrientes marinas afectan a la posición del DOM. Como no se puede conseguir que el DOM esté en una posición estable, la solución es poder saber en todo momento la posición de este. Aquí es donde entra la placa AHRS en juego.

La tecnología AHRS funciona como un sensor de movimiento. Contiene un acelerómetro 3D y un magnetómetro 3D. Utiliza un filtro extendido para sistemas no lineales de KALMAN, el cual es un algoritmo que estima una variable a partir de los datos medidos en dos pasos: predice el estado del sistema e incorpora las observaciones recogidas una vez corregidas. Este sistema se usa sobretodo en navegación aeronáutica para saber la posición del vehículo en todo momento. En nuestro caso es usada para saber en todo momento la posición absoluta del DOM, así como la inclinación que tiene.

Gracias a estos dos elementos podemos saber que los datos recogidos por el DOM son correctos. Aparte de estos elementos, el DOM tiene integrado:

- Una entrada a 12 V_{DC} con un conector Phoenix 1755736 el cual es usado para alimentar la CLB y todos los componentes de está.
- Una conexión RJ45 para conectar al PC en el laboratorio para su calibración. Este cable se usa para enviar los datos que recoge la CLB al ordenador para su posterior uso.
- Para la transmisión y adquisición de datos usa un cable de fibra óptica con un Bandwidth de 1 GB/s. La velocidad es de 20 Mb/s en cada sensor por la emisión de radiactividad debida al deterioro del potasio.

Los datos, así como los ángulos de orientación son transferidos al ordenador de control mediante una línea RS232 que a su vez configura la ganancia del sensor y los parámetros de calibración. A 12 V_{DC} el chip consume 100 mA a 100 Hz de tasa de interrogación.

El núcleo de la placa es el chip LSM303, una brújula electrónica comercial con un sensor interno para la inclinación, que pertenece a STmicroelectronics. Para más información sobre el chip ver la *Datasheet* (Electronics, 2011)

Los valores del acelerómetro y del magnetómetro se transfieren sin alterar, una vez en el PC se tratan con un software específico que los traduce a los valores de “yaw”, “pitch” y “roll” además de calcular los cuaterniones para poder visualizarlos y introducirlos dentro de los algoritmos ya escritos.

7. Cálculos matemáticos

En este apartado se muestran los cálculos que la CLB hace internamente para sacar los datos que podemos usar para su calibración

Variables:

Eje de alabeo(Roll axis):Eje X

Eje de cabeceo(Pitch axis):Eje Y

Eje de guiñada(Yaw axis):Eje Z

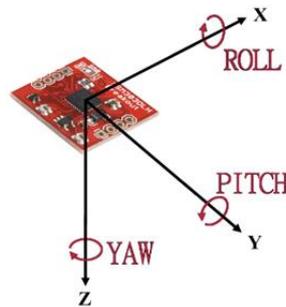


Fig. 20 21 Representación del sistema de coordenadas de la tarjeta CLB en los que se muestra la orientación una vez instalada en la unidad de detección óptica DOM (apuntado el eje Z hacia el fondo marino) en KM3NeT.

La salida de la tarjeta nos proporciona los valores de las componentes del acelerómetro (normalizado con la aceleración de la gravedad g , con lo cual sus valores estarán entre -1 y +1) y del magnetómetro (valores de las componentes del campo magnético geomagnético):

Componente del Acelerómetro: $A (A_x, A_y, A_z)$

Componente del Magnetómetro: $H (H_x, H_y, H_z)$

Las rotaciones elementales en cada eje serán:

Rotación Eje X: R_x

Rotación Eje Y: R_y

Rotación Eje Z: R_z

Componentes de la matriz de rotación R :

$$R_{xyz} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

Siendo:

Ángulo de giro respecto al eje x: (Ψ)

Ángulo de giro respecto al eje y: (Θ)

Ángulo de giro respecto al eje z: (φ)

Al ser rotaciones respecto a un eje, según se expone en el libro “*Rotations Transform for Computer Graphics*” (Vince, 2011), sabemos cuáles son sus matrices de rotación.

Rotational equations

- Rotación respecto del eje Z(Yaw):

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos Y & -\text{sen} Y & 0 \\ \text{sen} Y & \cos Y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

- Rotación respecto del eje Y(Pitch):

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos P & 0 & \text{sen} P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen} P & 0 & \cos P \end{pmatrix} \quad (2)$$

- Rotación respecto al eje X(Roll):

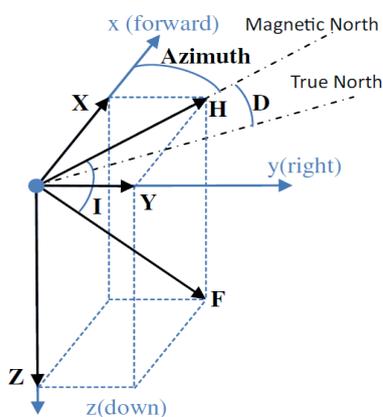
$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & -\text{sen} R \\ 0 & \text{sen} R & \cos R \end{pmatrix} \quad (3)$$

La solución general será:

- $R_{zyx} = R_z R_y R_x$

$$R_{zyx} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_P C_Y & C_Y S_R S_P - C_R S_Y & C_R C_Y S_P + S_R S_Y \\ C_P S_Y & C_R C_Y + S_R S_P S_Y & -C_Y S_R + C_R S_P S_Y \\ -S_P & C_P S_R & C_R C_P \end{pmatrix} \quad (4)$$

7.1. Cálculo Azimuth



El campo geomagnético se describe por 7 parámetros. El campo geomagnético en un punto se llama intensidad total (F). Se divide en la componente vertical Z y la intensidad horizontal H. La intensidad horizontal H se descompone en la intensidad norte-sur X y la intensidad este-oeste Y sobre el plano horizontal. La declinación magnética D es el ángulo entre el norte geográfico y el norte magnético y finalmente la inclinación I es el ángulo entre la total intensidad I y el plano horizontal. El Azimut (ángulo de la orientación sobre la superficie de la tierra) la cual relaciona las componentes del campo magnético con la dirección del norte (corregido por la declinación) :

Campo magnético

- Azimuth

$$A \text{ azimuth} = \left\{ \begin{array}{l} \arctg\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \quad (\text{con } H_x \neq 0) \\ \frac{\pi}{2} \quad (\text{Si con } H_y > 0 \text{ con } H_x = 0) \\ -\frac{\pi}{2} \quad (\text{Si con } H_y < 0 \text{ con } H_x = 0) \end{array} \right\} \quad (5)$$

Donde H_x , H_y y H_z son las salidas del sensor

Por lo tanto, el Sistema de Referencia se supone como horizontal:

- Sistema de Referencia Horizontal

$$\begin{pmatrix} H_{xc} \\ H_{yc} \\ H_{zc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos P & \text{sen } R \text{ sen } P & \text{sen } P \cos R \\ 0 & \cos R & -\text{sen } R \\ -\text{sen } P & \cos P \text{ sen } R & \cos P \cos R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

El sistema de coordenadas asociado a la tarjeta es un sistema móvil, que es solidario con los movimientos del DOM. Las corrientes marinas provocan su movimiento, por ello el compás no se mantiene horizontal y se deben corregir los errores de inclinación. Los ángulos del acelerómetro ya se pueden calcular, así como el Azimuth aplicando las siguientes correcciones:

Si aplicamos la matriz $R_{yx}=R_yR_x$ (inclinaciones medidas con los acelerómetros) al vector campo magnético $\{H_x, H_y, H_z\}$ (salidas de los magnetómetros en un sistema de coordenadas inclinado) se obtendrán las componentes del campo geomagnético $\{H_{xc}, H_{yc}, H_{zc}\}$ corregidas por el Roll y Pitch. Como resultado conseguimos un sistema de referencia horizontal fijo, que es el sistema fijo de KM3NeT.

1. Resolviendo el producto de matrices podemos transformar nuestro sistema de referencia al que nosotros nos interesa:

- Producto de matrices

$$\begin{pmatrix} \cos P & 0 & \text{sen } P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } P & 0 & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & -\text{sen } R \\ 0 & \text{sen } R & \cos R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos P & \text{sen } R \text{ sen } P & \text{sen } P \cos R \\ 0 & \cos R & -\text{sen } R \\ -\text{sen } P & \cos P \text{ sen } R & \cos P \cos R \end{pmatrix} \quad (7)$$

- HXC

$$H_{xc} = H_x \cos P + H_y \text{ sen } R \text{ sen } P + H_z \cos R \text{ sen } P \quad (8)$$

- HYC

$$H_{yc} = H_y \cos R - H_z \text{ sen } R \quad (9)$$

- HZC

$$H_{zc} = -H_x \text{ sen } P + H_y \text{ sen } R \cos P + H_z \cos P \cos R \quad (10)$$

- Azimuth sustituido

$$\text{Azimuth} = \text{Arctg}\left(\frac{H_{yc}}{H_{xc}}\right) = \text{Arctg}\left(\frac{H_y \cos R - H_z \text{ sen } R}{H_x \cos P + H_y \text{ sen } R \text{ sen } P + H_z \cos R \text{ sen } P}\right) \quad (11)$$

2. Finalmente, la dirección del norte geográfico se calculará aplicando la corrección, usando el ángulo de declinación magnética D

- ángulo de declinación magnética D

$$\text{Norte} = \text{Azimuth} + \text{Declinación} \quad (12)$$

Nota: la declinación puede ser positiva o negativa dependiendo de la posición del punto considerado.

7.2. Determinación de Pitch y Roll a partir de la salida de los acelerómetros

Partiremos de la posición horizontal (sin inclinación) donde la aceleración de la gravedad solo tiene la componente vertical (Z) y aplicaremos las matrices de rotaciones en el orden Pitch y Roll para obtener la salida de los acelerómetros en su posición inclinada (con inclinación). Notemos que en la transformación YPR no aplicamos el Yaw pues este giro no cambia el plano horizontal. De la ecuación matricial 2 se obtienen los ángulos de Pitch and Roll.

$$\frac{A_y}{A_z} = \text{tg } R \rightarrow \text{Roll} = \text{atan } 2(A_y, A_z) \quad (15)$$

$$\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} = -\text{tg } P \rightarrow \text{Pitch} = y = -\text{atan } 2\left(A_x, \sqrt{A_y^2 + A_z^2}\right) \quad (16)$$

7.3. Conversión de los datos de salida del sistema de coordenadas interno de la tarjeta al sistema de coordenadas KM3NeT

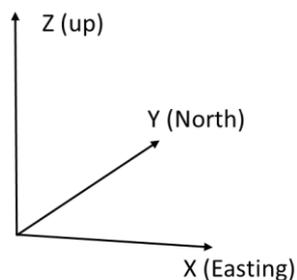


Fig 21: Sistema de coordenadas (fijo) de KM3NeT

En la figura se muestra el sistema de coordenadas (fijo) de KM3NET . En este sistema el eje X apunta en la dirección ESTE y el eje Y en la dirección Norte.

La tarjeta instalada en el DOM en las líneas de detección en KM3NeT se almacenan los datos del sensor en bruto (RAW DATA) y a estos datos para convertirlos en el sistema fijo de

KM3Net se aplican una serie de transformaciones que vamos a comentar:

1. En primer lugar se realiza un giro en el eje X de 180° y con eso se consigue que el eje Z pase de apuntar hacia abajo a apuntar hacia arriba (ver figura 20) y también Y cambia a -Y. Notemos que cambiar de signo en Y y Z se consigue con un ángulo de giro ROLL de 180° (X no cambia). Los componentes del acelerómetro y magnetómetro en este nuevo sistema de coordenadas quedarán:

- i. $A_y = -A_y$ & $A_z = -A_z$
- ii. $H_y = -H_y$ & $H_z = -H_z$

Ya se pueden obtener los ángulos de giro Yaw, Roll y Pitch en este sistema de coordenadas fijo de KM3NeT (utilizando las ecuaciones 3, 4 y 5 para este caso) y estas ecuaciones son las que se aplican en

$$Roll = \text{atan2}(-A_y, -A_z)$$

$$Pitch = y = -\text{atan2}\left(A_x, \sqrt{A_y^2 + A_z^2}\right)$$

$$\begin{aligned} Yaw &= \text{Arc tg}\left(\frac{-H_{yc}}{H_{xc}}\right) = \text{Arc tg}\left(\frac{-(-H_y \cos R + H_z \text{sen } R)}{H_x \cos P + H_y \text{sen } R \text{sen } P + H_z \cos R \text{sen } P}\right) = \\ &= \text{Arc tg}\left(\frac{H_y \cos R - H_z \text{sen } R}{H_x \cos P + H_y \text{sen } R \text{sen } P + H_z \cos R \text{sen } P}\right) \end{aligned}$$

Finalmente, el Yaw en KM3NeT se redefine como $Yaw' = 90 - Yaw$ ya que se mide en sentido horario respecto a la dirección Norte (eje Y en este sistema).

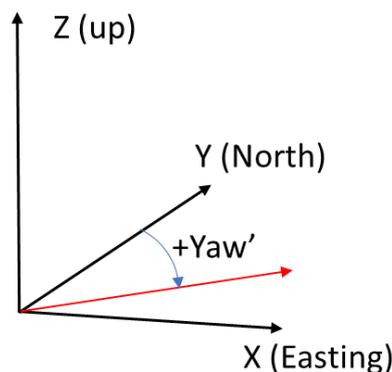


Fig. 22 Representación de Yaw'

Las ecuaciones con las que va a trabajar el algoritmo de la CLB son la nº11, nº15 y nº16. Estas recogen los datos de las rotaciones hechas por la persona que lleva el experimento. Seguidamente se calcula la desviación estándar de la componente del acelerómetro (A) y del Magnetómetro(H).

$$\frac{\text{sta}(A)}{A} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}}}{A}$$

$$\frac{\text{sta}(H)}{H} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}}}{H}$$

8. Conclusiones

La placa AHRS, que es la encargada de recoger los datos de la aceleración y campo magnético del medio, es la que tiene que ser calibrada. El método de calibración presentado en el proyecto es a su vez el presentado por la entidad que lleva a cabo el experimento, KMN3Net, y dada su naturaleza, se pueden comprobar todas las posibles posiciones que ocurrirán una vez la placa esté situada dentro del DOM en el lugar del experimento. Como muestra el proyecto, las placas ya calibradas contienen pocos errores y los datos obtenidos son parecidos en todas ellas.

Comprobando las calibraciones hechas en diferentes medios, podemos observar que mientras la medida de la aceleración no se ve afectada, la del campo magnético tiende a descuadrarse de la normal, siendo esta medida mucho más susceptible a los cambios magnéticos que ocurren en el medio.

Con esto, podemos concluir que lo esencial a la hora del calibrado de las placas CLBs es que estén hechas todas en el mismo medio para evitar problemas, y que el medio donde se realicen estas pruebas debe estar lo mayormente posible libre de elementos que puedan afectar al campo magnético

Bibliografía

- Adrián-Martínez, S. A. (2014). *Springer Link*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-014-3056-3>
- Adrián-Martínez, S. A. (2016). *Springer Link*. Obtenido de https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-015-3868-9?wt_mc=internal.event.1.SEM.ArticleAuthorIncrementalIssue
- Electronics, S. (2011). *LSM202DHL Datasheet*. Obtenido de <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/LSM303DLHC.PDF>
- KM3NeT*. (2021). Obtenido de <https://www.km3net.org/>
- P.Piattelli, Poma, E., Riccobene, G., & Viola, S. (2017). *KM3NeT_CALIB_2017_004-PRO_AHRS_Calibration_v5*.
- Riccobene, G. (2019). *EPG Conferences*. Obtenido de <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920707005>
- Vince, J. (2011). *Rotations Transforms for computer Graphic*.

Pliego de condiciones

1. Definición y alcance (objeto)

El objeto de este documento consiste en fijar las condiciones técnicas mínimas que se deben cumplir para llevar a cabo el proyecto de “CALIBRACIÓN DE SENSORES ACELEROMAGNÉTICOS DEL TELESCOPIO SUBMARINO KM3NET” descrito en la “Memoria”, especificando los requisitos de fiabilidad y seguridad necesarios para el correcto desarrollo y explotación de dicho proyecto.

El ámbito de aplicación de este documento se centra en los elementos necesarios para una correcta calibración y el sistema de posicionamiento del telescopio, así como en el entorno de trabajo, sin tener en cuenta los sistemas eléctricos, mecánicos y electrónicos que forman parte de las instalaciones del centro de investigación. Se aceptarán soluciones diferentes a las exigidas en este documento siempre que su necesidad este justificada además de no implicar una reducción en la calidad mínima exigida.

2. Condiciones generales

En la directiva del consejo de la unión europea 90/270/ CEE, de 29 de mayo de 1990 se enumeran las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.

Según la dicha directiva, se define como puesto de trabajo: “el conjunto que consta de un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado o de un dispositivo de adquisición de datos y/o de un programa que garantice la interconexión hombre/máquina, de accesorios opcionales, de anejos, incluida la unidad de disquetes, de un teléfono, de un módem, de una impresora, de un soporte de documentos, de una silla y de una mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato. [8].”, siendo una pantalla de visualización cualquier “pantalla alfanumérica o gráfica, independientemente del método de representación visual utilizado. [8].”.

A continuación, se enumeran las disposiciones mínimas requeridas relativas al equipo, entorno e interconexión ordenador/hombre extraídos de [8].

2.1. Equipo

Pantalla: La imagen en la pantalla deberá ser estable, sin reflejos ni reverberaciones que molesten al usuario; con los caracteres bien definidos, dimensión suficiente y espaciado adecuado entre caracteres y renglones. El usuario debe poder ajustar con facilidad la luminosidad y/o contraste de la pantalla, así como la orientación e inclinación.

Teclado: Deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para facilitar una postura cómoda que no provoque cansancio en brazos y manos. Los símbolos de las teclas deberán ser legibles desde la posición normal de trabajo. Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar brazos y manos

Mesa o superficie de trabajo: Tendrá una superficie poco reflectable, con dimensiones suficientes para permitir una colocación flexible de pantalla, teclado y material accesorio, así como para permitir una postura cómoda del trabajador.

Asiento de trabajo: Asiento estable, que proporcione libertad de movimiento y postura confortable. La altura ha de ser ajustable con un respaldo inclinable. Se pondrá un reposapiés a quienes lo deseen.

2.2. Entorno

- **Espacio:** El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado para permitir cambiar de postura y de movimientos de trabajo.
- **Iluminación:** La iluminación general y la especial (lámparas de trabajo) deberán garantizar una luz suficiente y un contraste adecuado entre pantalla y entorno. Las fuentes de luz deben evitar deslumbramientos y reflejos molestos en el equipo.
- **Reflejos y deslumbramientos:** Fuentes de luz como ventanas y otras aberturas no deben provocar deslumbramiento directo y generen un mínimo de reflejos en pantalla. Las ventanas se equiparán con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz que ilumine el entorno de trabajo.
- **Ruido.** El ruido producido tanto por el equipo y/o entorno de trabajo no debe perturbar la palabra ni la atención.
- **Calor:** Los equipos utilizados no deberán producir calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores
- **Emisiones:** A excepción de las radiaciones del espectro electromagnético visible, deberán reducirse a niveles insignificantes para la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.
- **Humedad:** La humedad se creará y mantendrá a niveles aceptables.

2.3. Interconexión ordenador/hombre

- Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.
- Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y ritmo adaptado a los operadores.
- Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte del hombre.

3. Condiciones específicas

En el presente documento solo se enumerarán las condiciones específicas de índole técnico, sin considerar las posibles condiciones facultativas, económicas y/o legales. Las siguientes especificaciones técnicas se refieren al entorno y a los diferentes equipos usados para la calibración.

3.1. Entorno

En el entorno donde se trabajará durante el proyecto consistirá en un ordenador, un gimbal y la placa a calibrar. El entorno donde se efectuó la calibración deberá estar libre elementos metálicos y/o electrónicos en la medida de lo posible para una correcta calibración del dispositivo.

El espacio de trabajo debe ser una superficie lisa y horizontal, donde haya suficiente espacio para hacer las rotaciones del dispositivo.

3.2. Software

Para que la calibración sea posible, es necesario tener un ordenador con acceso a "LINUX scientific v6".

Para la correcta instalación del programa específico del proyecto ver "KM3NeT_CALIB_2017_004-PRO_AHRS_Calibration_v5" (P.Piattelli, Poma, Riccobene, & Viola, 2017)

3.1. Hardware

Para poder hacer la calibración es necesario el uso de un gimbal, que debe tener las siguientes especificaciones:

- El material del que este hecha la estructura debe ser de aluminio o plástico. En ningún caso se debe tratar de un material metálico, ya que puede afectar a la calibración. Los engranajes de giro y base también deben seguir esta regla.

El ordenador usado para hacer las mediciones debe tener mínimo las siguientes especificaciones:

- Procesador Intel Core i5 o similar
- 8GB memoria RAM
- 1 TB de memoria ROM

Presupuesto

1. Introducción

En el presente documento se redactan los diferentes costes que se llevarán a cabo en el desarrollo del proyecto. Para los precios de los materiales se utilizan valores estimados y por lo tanto los costes podrían variar. Además, para dar un presupuesto más detallado se decide utilizar materiales que cumplen con las exigencias mínimas descritas en el “Pliego de condiciones”. Es por ello por lo que el ordenador de trabajo se customiza según estas exigencias.

2. Coste *hardware*

Unidad	Denominación	Cantidad	Precio	Total
Ensamblaje ordenador de torre				
Ensamblaje del dispositivo <i>hardware</i> customizado para desarrollar e implementar proyectos basados en redes neuronales artificiales.				
U		1	1,717.61 €	1,717.61 €
Materiales				
U	Apple MacBook Air (2020) MGN93Y/A, 13.3" Retina, Chip M1 de Apple, 8 GB, 256 GB SSD, MacOS, Plata	1	999.99 €	999.99 €
U	Mechanical gyroscope Aluminium	1	75.89 €	75.89 €
U	CLB	1	456.12 €	456.12 €
U	Alimentación 650 W	1	51.24 €	51.24 €
U	Monitor	1	63.63 €	63.63 €
U	Kit ratón y teclado inalámbrico	1	23.13 €	23.13 €
Mano de obra				
h	Técnico informático	1.5	9.29 €	13.94 €
Costes directos complementarios				
%		2%	1,683.64 €	33.67 €

Tabla 17. Presupuesto de la partida del ensamblaje del ordenador de torre desglosado en materiales, mano de obra y costes directos complementarios (2%).

3. Coste estudio de antecedentes

Unidad	Denominación	Cantidad	Precio	Total
Estudio de antecedentes				
Estudio de antecedentes al proyecto a desarrollar y estado del arte de la tecnología utilizada.				
U		1	2,371.20 €	2,371.20 €
Mano de obra				
h	Científico de datos	120	19.00 €	2,280.00 €
Costes directos complementarios				
%		4%	2,280.00 €	91.20 €

Tabla 18. Presupuesto de la partida del estudio de antecedentes desglosado en mano de obra y costes directos complementarios (4%). Se asume que el estudio tendrá una duración aproximada de 3 semanas.

4. Coste del desarrollo del proyecto

Unidad	Denominación	Cantidad	Precio	Total
Desarrollo del proyecto				
Presupuesto del desarrollo del proyecto de implementación, mejora del algoritmo de reconstrucción de trayectorias de neutrinos e implementación.				
U		1	3,744.00 €	3,744.00 €
Mano de obra				
h	Ingeniero de datos	240	15.00 €	3,600.00 €
Costes directos complementarios				
%		4%	3,600.00 €	144.00 €

Tabla 19. Presupuesto de la partida del desarrollo del proyecto desglosado en mano de obra y costes directos complementarios (4%). Se asume que el proyecto tendrá una duración aproximada de 6 semanas.

5. Resumen del presupuesto

Capítulo	Importe
Capítulo 1. Ensamblaje de ordenador de torre	1,717.61 €
Capítulo 3. Estudio de antecedentes	2,371.20 €
Capítulo 4. Desarrollo del proyecto	3,744.00 €
TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	9,374.33 €
medios auxiliares (4%)	374.97 €
TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	7,832.81 €
IVA (21%)	1,644.89 €
TOTAL PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	9,477.70 €

Tabla 20. Resumen de las partidas del presupuesto y obtención del total de presupuesto base de licitación

Por lo tanto, el presupuesto base de licitación asciende a un total de nueve mil cuatrocientos setenta y siete euros con setenta céntimos.

Valencia, agosto de 2021

Josep Baeza Guzmán