

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 27

## **CALIBRACIÓN DE UNIDADES DE MEDICIÓN INERCIAL UTILIZANDO GEOMETRÍA Y REDES NEURONALES**

Diver Joao Mesa Pérez  
Daniel Betancur Vásquez

Programa Académico  
Ingeniería Mecatrónica

Director(es) del trabajo de grado  
Juan Sebastián Botero Valencia

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**  
**Octubre de 2017**

## Resumen

---

En el presente trabajo, se presentan dos métodos de calibración de Unidades de Medición Inercial (Inertial Measurement Unit, IMU) que son comúnmente utilizadas en la estimación de la orientación de plataformas que la transportan, lo que ha impulsado el uso en aplicaciones de tracking de movimiento en muchas áreas entre ellas la robótica móvil. El procedimiento de calibración está compuesto por tres etapas, la primera es una plataforma basado en un mecanismo de dos grados de libertad (DoF) utilizando servomotores de bajo consumo de potencia, permitiendo obtener los ángulos de navegación yaw, pitch y roll. La segunda, realiza el procesamiento de los datos adquiridos por la unidad de medición inercial constituida de nueve grados de libertad (un magnetómetro, un acelerómetro y un giroscopio, todos triaxiales). Como tercera etapa, se implementa mínimos cuadrados para determina la matriz de calibración y una red neuronal perceptrón multicapa para la adaptación a la respuesta de la unidad inercial reduciendo el error cuadrático medio y usando el valor de los ángulos de los servomotores como referencia. La matriz de calibración se construye mediante compensaciones del campo magnético, factores de escala y sesgo generando una reducción del error bajo perturbaciones. La arquitectura de la red consta de cinco capas, con 10 neuronas en cada capa, y una función de activación tangencial sigmoide. Finalmente se construye el modelo cinemático que permite observar el rendimiento en la medida con un error de 1%.

*Palabras clave:* Magnetómetro, acelerómetro, giroscopio, unidad de medición inercial (IMU), sistemas Microelectromecánicos (MEMS), ángulos de navegación, perceptrón multicapa, tangencial sigmoide, error cuadrático medio.

# Reconocimientos

---

Agradecemos a Dios por darnos la fortaleza para seguir adelante y cumplir cada meta que nos proponemos.

Expresamos nuestros agradecimientos al director Juan Sebastián Valencia, líder de línea de sistemas de control y robótica, quien nos apoyó en el proceso de elaboración del proyecto y así mismo en la formación como futuros investigadores.

Agradecimiento especial a los compañeros de laboratorio David Andrés Márquez Viola, Mateo Rico García y Luis Fernando Castaño Londoño quienes nos brindaron su asesoría y conocimiento para cumplir con las metas propuestas en este proyecto.

A la familia por brindarnos la confianza en las decisiones tomadas y apoyo en tiempos difíciles.

# Acrónimos

---

*IMU* Unidades de Medición Inercial  
*DoF* Grados de libertad  
*MEMS* Sistemas microelectromecánicos  
*CAD* Diseño asistido por computadora  
*CAE* Ingeniería asistida por computadora  
*CPU* Unidad central de proceso  
*ROM* Memoria de solo lectura  
*RAM* Memoria de acceso aleatorio  
*EEPROM* Memoria de solo lectura programable y borrable  
*ADC* Conversión analógica digital  
*CC* Corriente continua  
*HyperLS* Hyper least square  
*LSM* Mínimos cuadrados promedio  
*MLP* Perceptrón multicapa  
*RBF* Función de base radial  
*I<sup>2</sup>C* Inter-Integrated Circuit

# Tabla de contenido

---

1. Introducción.....	6
2. Marco teórico.....	8
2.1 Unidades de medición inercial (IMU).....	8
2.2 Microcontroladores .....	9
2.3 Servomotor .....	10
2.4 Ángulos de Euler .....	11
2.5 Red neuronal (MLP).....	12
2.1.1 Función umbral (hardlim).....	13
2.1.2 Función signo (hardlims) .....	13
2.1.3 Función lineal (purelin).....	13
2.1.4 Función logarítmica sigmoideal (logsig) .....	13
2.1.5 Función tangencial sigmoideal (tansig) .....	13
3. Metodología.....	14
3.1 Plataforma mecánica .....	15
3.2 Plataforma de adquisición de datos .....	16
3.3 Modelo cinemático de correlación .....	17
3.4 Modelo de calibración geométrico.....	18
3.5 Modelo de calibración MLP.....	20
4. Resultados.....	21
4.1 Modelo de calibración geométrico.....	21
4.2 Modelo de calibración MLP.....	22
5. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro .....	23
Referencias.....	24

# 1. Introducción

---

El control en las aplicaciones de tracking de movimientos de las diversas áreas, entre ellas la robótica móvil ha generado que el uso de sensores inerciales y magnéticos basados en sistemas microelectromecánicos (Microelectromechanical Systems, MEMS), sean el medio principal del sistema de movimiento para determinar la orientación con respecto a un sistema de referencia global (Botero V., Rico G., & Villegas C., 2016; Zhang, Fei, Xu, & Sun, 2015). Esta tecnología al brindar una mejor precisión en las medidas físicas, ser más compacta y tener un costo de fabricación más bajo ha permitido extender el rango de aplicaciones en técnicas de navegación. Por ejemplo en sistemas de orientación y desplazamiento, pueden encontrarse estimaciones de trayectoria y orientación de plataforma móvil seguidor de pistas geométricas (Botero V. et al., 2016), lanzamiento de satélites (Paul, Singh, Nayak, Rajanna, & Kumar, 2008), para control militar y civil (Vissière, Martin, & Petit, 2007). Además, se han hecho implementaciones en el área de exploraciones geológicas para determinar el ángulo de inclinación y la orientación de las herramientas de perforación subterráneas (Ren, Wang, Wang, Wu, & Wei, 2014). En combinaciones de visión con medidas inerciales se encuentran desarrollos de sistemas de reconocimiento de gestos para el control de robots móviles en tiempo real a distancias de hasta 250m (Stančić, Musić, & Grujić, 2017), sistemas de seguimiento para entrenamiento virtual realista (Zhang et al., 2015), o la estimación exacta de un objeto (Li, Besada, Bernardos, Tarrío, & Casar, 2017). En aplicaciones clínicas se realiza reconocimiento y análisis de marcha humana (Muro-de-la-Herran, García-Zapirain, & Méndez-Zorrilla, 2014), así como obtener la orientación 3D de los segmentos corporales analizando el movimiento humano (Bergamini et al., 2014).

Debido a factores ambientales e instrumentales, estos sistemas de navegación normalmente están compuestos por un denominado modelo de error, generando que sea necesario realizar un proceso de calibración, el cual calcula factores de escala, errores de ortogonalidad o desalineación y parámetros de sesgo. Para maximizar la precisión y la fiabilidad se han realizado métodos de calibración convencionales, donde en sistemas magnéticos triaxiales (Kiani, Pourtakdoust, & Sheikhy, 2015) implementaron Hyper least square (HyperLS) realizando un análisis del error para generar compensaciones y a su vez implementaron diferentes filtros para determinar la orientación en tiempo real. (Ren et al., 2014) propone un método de calibración basado en combinaciones de transformaciones de coordenadas espaciales y ecuaciones algebraicas. En módulos inerciales triaxiales (Rohac Jan, Sipsos Martin, 2015) proporciona información detallada en procesos de calibración, por ejemplo basadas en la gravedad en el caso de los acelerómetros (ACC). (Botero, Hernández, & Fernández, 2014) presenta la opción de implementar matrices de transformación homogénea para alineación triaxial.

Las redes neuronales para la estimación de posición por medio de unidades inerciales es una alternativa muy significativa cuando de reducción del error se trata. Las arquitecturas con función de base radial (RBF) han sido implementadas para compensar el giro nulo del giroscopio (Liu et al., 2009). Propiamente, la propagación hacia adelante (feed forward) y el perceptrón multicapa (MLP) en general ha sido utilizado en diferentes aplicaciones de la IMU, como en el seguimiento de trayectoria en terminales (Stephenson, Naik, Member, & Chai, 2017), el preciso posicionamiento de personas (Tejmlova, Sebesta, & Zelina, 2016) y en

algoritmos para la determinación de la posición en el espacio usando una red neuronal artificial entrenada Elman (Kolanowski, Świetlicka, Kapela, Pochmara, & Rybarczyk, 2017).

Los sistemas para los procesos de obtención de datos que describe el movimiento o posicionamiento son muy usados y por lo general incluyen brazos robóticos o plataformas giratorias no magnéticas. Tienen como función principal colocar el módulo triaxial en diferentes ángulos para tomar mediciones. La información obtenida es utilizada para estimar el modelo de error aplicando diferentes enfoques matemáticos. (Botero-Valencia, Marquez-Viloria, Castano-Londono, & Morantes-Guzmán, 2017) presentan un brazo robótico de 3 DoF para adquirir datos del magnetómetro y del acelerómetro en diferentes posiciones distribuidas uniformemente sobre los tres ejes, y así logrando construir una ecuación paramétrica para determinar el sesgo y el factor de escala. Algoritmos de alineación junto con plataformas de rotación junto para determinar la posición inicial con respecto a la trama de navegación como sistema de referencia y representando la orientación en ángulos de Euler (roll, pitch y yaw) se presenta en (Sotak, 2010).

En este trabajo, se proponen dos alternativas de calibración que implementan un mecanismo de 2 DoF construido con servomotores de bajo costo para posicionar la IMU en diferentes orientaciones, siendo representada en ángulos de Euler. El primer procedimiento realizada la estimación de los parámetros con el LSM para determinar la matriz de calibración. La calibración se realiza mediante compensaciones del campo magnético, factores de escala y sesgo. La segunda emplea un MLP que reduce el error cuadrático medio, usando el valor de los ángulos de los servomotores como valor objetivo (target point). Para la validación, se realiza el modelo cinemático dando como resultado la posición del sensor en el espacio respecto a los ángulos de los servomotores. Permitiendo observar la reducción del error en la orientación y desplazamiento.

Las secciones restantes del documento se organizan de la siguiente manera. La sección 2 contiene los conceptos generales y materiales usado en el experimento. En la sección 3 se explica el sistema de referencia, la metodología usada para la construcción de la matriz de calibración y el entrenamiento de la red neuronal. En la sección 4 se demuestran la evaluación sobre los resultados. Finalmente, la sección 5 se sacan las conclusiones de trabajo, se dirige algunas recomendaciones para futuras investigaciones y se mencionan trabajos futuros.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Unidades de medición inercial (IMU)

Se trata de un dispositivo con tecnología MEMS (Micro Electro Mechanical System) que fusiona en un mismo circuito electrónico sensores triaxiales con la capacidad de proporcionar medidas de aceleración lineal, velocidad angular y en algunos casos el campo magnético. Generalmente estos sistemas combinan un acelerómetro y un giroscopio entregando 6 DoF, pero existen algunas de 9 DoF que integran un magnetómetro. Estas unidades generalmente son un componente en los sistemas de navegación que tiene como finalidad proporcionar orientación y desplazamiento de la plataforma que la transporta, y se encuentran cubiertas para mantener la temperatura constante y a su vez disminuyendo las interferencias electromagnéticas mejorando la precisión en la medida.

#### 2.1.1 Acelerómetro

Es un dispositivo implementado para determinar la aceleración lineal de un objeto, debido a la capacidad de detectar el momento inercial que empujan al sensor expresándolo en tres coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$  (Figura 1) que mediante cálculos es posible determinar la dirección del vector. Además, al realizar la integración de la aceleración podemos obtener la velocidad y el desplazamiento, pero debe tenerse en cuenta que, aunque el acelerómetro no esté en movimiento, siempre va tener una medida correspondiente a la aceleración gravitacional.

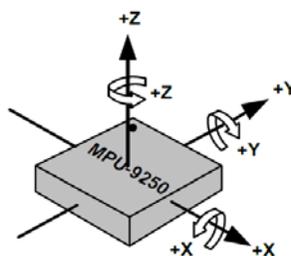


Figura 1. Orientación de los ejes y rotación. Fuente: InvenSense Inc. 2014

Existe la posibilidad de conocer el ángulo de inclinación del sensor al tomar como referencia la gravedad de la tierra respecto al eje  $x$  o eje  $y$ . Por ejemplo, al tomar  $9.8 \text{ m/s}^2$  como una aproximación de aceleración gravitacional de la tierra e implementando trigonometría es posible determinar el ángulo de inclinación de la IMU. La estimación del ángulo se hace por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta_i = \cos^{-1} \left( \frac{i}{\sqrt{i^2 + j^2}} \right)$$

Donde,  $\theta_i$  es el ángulo en el plano de referencia con respecto al eje  $i$ , siendo el plano  $ij$ . La magnitud de estos ejes son los datos del sensor.

### 2.1.2 Giroscopio

Este es un dispositivo es usado para conocer la velocidad angular que hace referencia a que tan rápido gira la plataforma alrededor de su eje, esto indica que es la diferencia del cambio del desplazamiento angular por unidad de tiempo que se logra al detectar la fuerza centrífuga que se está ejerciendo al objeto. Este sensor en principio fue empelado para dirigir cohetes y torpedos durante la segunda guerra mundial, siendo sistemas eléctricos y demasiado voluminosos que la construcción demandaba la mayor parte del presupuesto militar. Hoy en día el avance de la tecnología ha permitido la miniaturización permitiendo que costo de fabricación sea mucho más bajo, además la implementación en sistemas robóticos.

Para determinar el ángulo de giro  $\theta$  en cualquiera de las componentes  $x, y$  y  $z$  (Figura 1), se puede obtener con la siguiente formula:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + v_f * \Delta t$$

Donde,  $\theta_{i-1}$  es ángulo antes de realizar el de giro,  $v_f$  velocidad angular actual, es decir, valor que está entregando el sensor y  $\Delta t$  es el diferencial de tiempo, en otras palabras, es el tiempo de muestreo. La fórmula aplica para las tres coordenadas.

### 2.1.3 Magnetómetro

Dispositivo que sirve para cuantificar las componentes del campo magnético presente. Al tomar como referencia el norte magnético de la tierra es posible obtener la orientación de la plataforma, siempre y cuando el sensor no se encuentre cerca de algún objeto metálico o este expuesto a un campo magnético externo. Para determinar el ángulo ( $\theta$ ) de orientación respecto al Norte, es posible realizarlo con la siguiente formula:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{m_i}{m_j} \right)$$

Donde,  $m_i$  y  $m_j$  corresponden a los parámetros entregados por el sensor en el plano  $xy, xz$  y  $zy$ . Se debe tener en cuenta que existe una diferencia entre el norte magnético de la tierra y el norte geográfico denominado declinación magnética, la cual depende de la ubicación de la plataforma.

## 2.2 Microcontroladores

La necesidad de interpretar la información, procesar diversos datos e instrucciones que el usuario desee requiere de un circuito integrado programable que básicamente está compuesto por tres principales unidades funcionales de una computadora como unidad central de procesamiento (CPU), memorias ROM y RAM, además periféricos de entrada y salida,

permitiendo la capacidad de ejecutar ordenes grabadas en la memoria (Flash memory). El esquema de bloques de cada unidad se puede observar en la Figura 2.

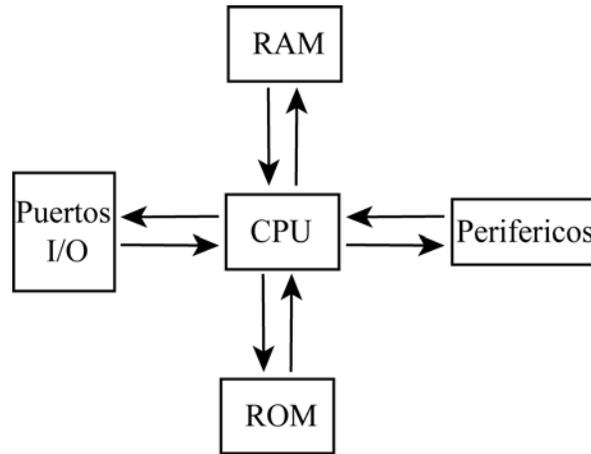


Figura 2. Esquema de un microcontrolador. Fuente: Autor

Los microcontroladores están diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular generando que el número de aplicación sean prácticamente infinitas, que van desde el manejo de sensores para adquisición de variables físicas, hasta el control de motores, secuencia de luces, alarmas, etc. Este dispositivo actualmente es fabricado por varias empresas como Atmel, Intel, Microchip, Texas Instruments, etc. Cada fabricante emplea referencia con características diferentes que varían en cuanto a velocidad de procesamiento, memoria y periféricos.

### 2.3 Servomotor

A menudo en problemas de ingeniería se requiere de un motor con control de posición angular, para soluciones que no es posible lograr con un motor de rotación continua, el servo motor es un actuador conformado por componentes electromecánicos y electrónicos que se muestran en la Figura 3.

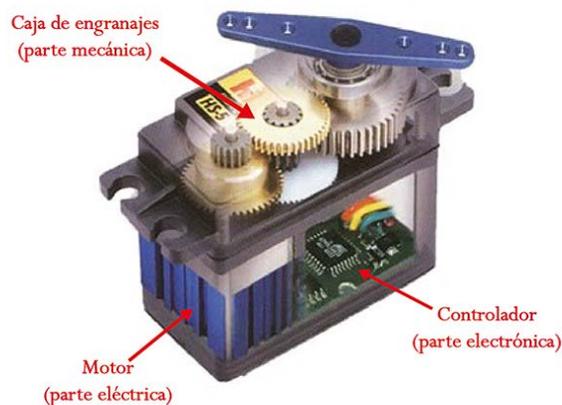


Figura 3. Arquitectura servomotor. Fuente: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>

En su interior se encuentra un motor DC mezclado con un sistema de control proporcional permitiendo la ubicación en cualquier posición siempre y cuando se encuentre en el rango de operación, con la particularidad de mantenerse estático en la posición establecida.

El dispositivo puede ser controlado tanto en velocidad como en posición, logrando girar a altas velocidad, pero a un par (momento de fuerza) bajo lo que implica el uso de una caja reductora para transformar gran parte de la velocidad de giro en torsión y así mantener el torque. Para establecer el punto de referencia (setpoint) del motor se hace uso de un PWM ubicándolo en un ángulo mayor, y viceversa.

El error de posición el cual es la diferencia entre la referencia y la posición actual es calculado por un amplificador de error. Un error de posición mayor significa una diferencia alta entre la referencia y la posición actual, generando que la velocidad de giro sea más alta para alcanzar el setpoint; uno menor, significa que la posición del motor está cerca de la establecida obligándolo a disminuir la velocidad de rotación. Si el servo se encuentra en la posición especificada, el error es cero, y estará estático.

Se puede encontrar diferentes tipos de servomotores que se pueden clasificar según las características de rotación, por ejemplo, servomotores de rango de giro limitado los cuales permite rotaciones de  $180^\circ$  o  $300^\circ$ , también servomotores de rotación continua similares a un motor convencional, pero con la opción de poder controlar la posición y velocidad de giro.

## 2.4 Ángulos de Euler

Se conocen diferentes tipos de sistema de coordenadas, los cuales pueden ser grosso modo catalogados en dos categorías diferentes: coordenadas globales ajustadas en un espacio inercial, con unas coordenadas de origen denotadas en este caso  $x_w$ , y coordenadas ajustadas al cuerpo a estudiar con una altitud específica y un origen de coordenadas llamado  $x_b$ .

Se utiliza un elemento para diferenciar los dos tipos de coordenadas, generalmente una comilla simple, y una matriz de rotación, que al ser multiplicada por un vector provoca una rotación en el mismo conservando su magnitud; El determinante de la matriz varía en los valores 1 y -1, siendo propia la matriz cuando el resultado es 1 e impropia cuando es -1. La rotación está dada por una matriz de rotación de coordenadas entonces, la cual cambia dependiendo el eje en el cual se procede a rotar el vector. A continuación, se muestran las matrices de rotación para los ejes  $X, Y$  &  $Z$ , denotadas como matrices  $R_1, R_2$  &  $R_3$  respectivamente.

$$R_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad R_2(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$R_3(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Una manera de referenciar el sistema de coordenadas entre los ejes del cuerpo rígido y el sistema de coordenadas globales es la matriz de cosenos directores, siendo  $x'$ ,  $y'$  &  $z'$  los ejes del sistema de coordenadas del cuerpo rígido, y  $\theta_{x'y}$  la magnitud del ángulo entre los ejes  $x'$  y  $y$ , la matriz sería:

$$R_1(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{x',x}) & \cos(\theta_{x',y}) & \cos(\theta_{x',z}) \\ \cos(\theta_{y',x}) & \cos(\theta_{y',y}) & \cos(\theta_{y',z}) \\ \cos(\theta_{z',x}) & \cos(\theta_{z',y}) & \cos(\theta_{z',z}) \end{bmatrix}$$

## 2.5 Red neuronal (MLP)

Las redes neuronales tienen el objetivo de aprender un patrón, generalmente usado en sistemas complejos de modelar matemáticamente. La red consiste en una arquitectura que consta de diferentes capas de neuronas, con diferente número de neuronas por capa. A diferencia del perceptrón simple, este tipo de red permite la solución de problemas linealmente no separables, ampliando el rango de soluciones posibles a problemas de ingeniería.

Se trata entonces de un arreglo de neuronas conectadas por un peso sináptico  $W_{ij}$ , que une cada neurona de una capa con las de una capa siguiente, siendo  $i$  el número de la neurona de la capa anterior y  $j$  el número de la neurona computada. La entrada a cada neurona se representa con el producto punto entre el vector de entradas con el vector de pesos sinápticos, además de un sesgo llamado bias  $b_i$ , la arquitectura de la red se puede observar en la Figura 4.

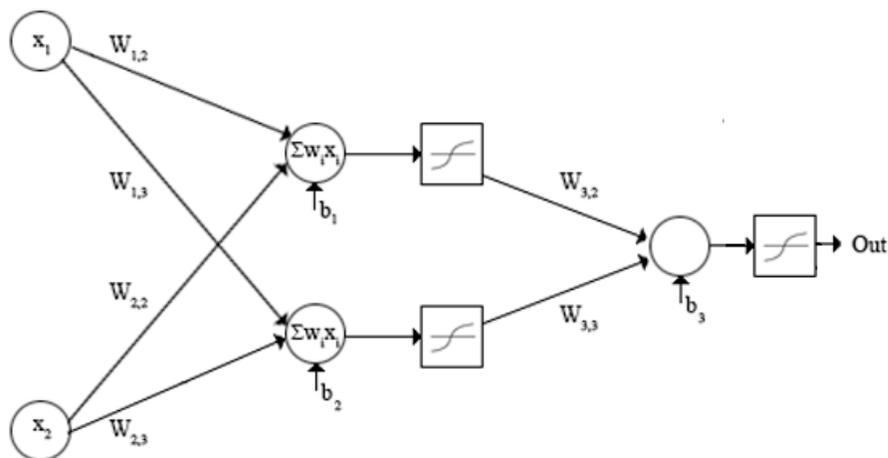


Figura 4. Arquitectura red neuronal perceptrón multicapa.

Fuente: <http://matlabgeeks.com/wp-content/uploads/2011/06/Multi-layer-perceptron.png>

Se computa entonces la sumatoria para luego procesar el resultado por una función de activación seleccionada. Existen diferentes tipos de función activación, el criterio de selección depende del modelo a implementar, las más utilizadas se enuncian a continuación.

### 2.1.1 Función umbral (hardlim)

Normalmente utilizada en el perceptrón simple, tiene un umbral de activación, siendo 1 para los valores mayores o iguales a 1 y siendo 0 para valores menores que 1.

### 2.1.2 Función signo (hardlims)

Similar a la función umbral, utiliza un umbral de activación para el valor de la salida de cada neurona, siendo 1 para los valores mayores o iguales a 1 y siendo -1 para todos los valores menores que 1.

### 2.1.3 Función lineal (purelin)

Cada valor de la salida de una neurona corresponde a una línea recta, siendo el mismo valor de la sumatoria el valor final de la salida de la neurona, normalmente escalizada para mejor desempeño de la red y comúnmente utilizada en las neuronas de salida de arquitecturas con más de una capa de neuronas.

### 2.1.4 Función logarítmica sigmoidal (logsig)

Corresponde a una función logarítmica que genera una mejor respuesta del aprendizaje de la red, pero a la vez tiene un mayor costo computacional que las anteriores, obedece a la función siendo  $n$  la salida de la neurona a procesar, obedece a la función:

$$\frac{1}{(1 + e^n)}$$

### 2.1.5 Función tangencial sigmoidal (tansig)

Similar a la logarítmica sigmoidal, esta función de activación genera un rango más alto de valores imagen de las entradas procesadas, siendo  $n$  la salida de la neurona a procesar, obedece a la función:

$$\frac{2}{(1 + e^{(-2*n)})} - 1$$

Existen diferentes formas de aprendizaje para el perceptrón multicapa, como la propagación de aprendizaje hacia adelante (feedforward) y la propagación hacia atrás (backpropagation), cada una implementando una actualización de los pesos sinápticos para lograr la estimación del valor final objetivo frente a las entradas o patrones de la red.

### 3. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se implementó una metodología en cascada, donde cada fase influye sobre las fases posteriores, en la Tabla 1 se explican las actividades.

Tabla 1

Fases con actividad e indicadores

Fase	Actividades	Indicador
Plataforma mecánica	Diseño 3D para microprocesador, fuente de voltaje y Servomotores.	CAD
	Ensamblajes de soportes BPF-F3 para servos AX-12A.	Diagrama de ensamble
	Diseño de caja de protección IMU	CAD
	Diseño de soporte (Shaft) para caja de protección.	
	Simulación de ensamble de los diferentes componentes	CAD y CAE
	Algoritmo de movimiento	Software
Plataforma de adquisición de datos	Configuración de los registros de la MPU-9250 y comunicación I <sup>2</sup> C.	Software
	Configuración de comunicación Bluetooth.	
Modelo cinemático de correlación	Se diseña el modelo de cinemática directa basado en el método Denavit-Hartenberg.	Software
Modelo de calibración geométrico	Determinar la matriz de calibración para la IMU	Software
Modelo de calibración MLP	Selección de la arquitectura de la red, sus funciones de activación y entrenamiento con datos adquiridos.	Software

La configuración de calibración de este estudio se muestra en Figura 5 - (b), que consiste en un conjunto compuesto por una plataforma autónoma y un sistema de adquisición de datos para mediciones inerciales. A continuación, se describe las actividades desarrolladas en cada fase para un mejor entendimiento de esta.

### 3.1 Plataforma mecánica

La plataforma implementa dos servomotores Dynamixel AX-12A de bajo costo que permite hacer seguimiento en todo momento de la velocidad y posición del eje a una resolución de  $0.29^\circ$ . La configuración de la plataforma da como resultado un mecanismo de 2 DoF permitiendo rotaciones en el espacio para cada uno de los ejes del magnetómetro, acelerómetros y giroscopio. En la Tabla 3 se enuncian las especificaciones técnicas del servomotor implementado en el mecanismo. El mecanismo también cuenta con una base de soporte a medida para la fuente de alimentación y un microprocesador de código abierto de ROBOTIS alimentado por un procesador ARM Cortex-M3 de 32 bits, el cual es programado en herramientas de software libre para controlar la rotación permitiendo al sistema de adquisición procesar las medidas equivalentes a la posición que se encuentran los servos. La rotación es activada por medio de comunicación serial (RS232), que permite un giro equivalente a 10 grados. El diseño del sistema de orientación es asistido por computadora, permitiendo recrear cada dispositivo y soportes del mismo en un modelo 3D. También se modela una caja de  $26 \times 40 \times 42 \text{ mm}$ , para el módulo inercial con un eje (Shaft) de  $36 \text{ mm}$  que facilita el acople a la plataforma y como protección a perturbaciones, por ejemplo, del campo magnético generado por las bobinas de los actuadores. Posteriormente, cada pieza es ensamblada para realizar una simulación del sistema mecánico, indicando posibles fallos de rotación y rupturas por torsión generadas por la velocidad de giro. El modelado y ensamble 3D de la plataforma mecánica se observa en la Figura 5 – (a).

Tabla 2

Especificaciones servo dynamixel AX-12<sup>a</sup>

Característica	Rango	Unidades
Voltaje de funcionamiento	6 a 12	V
Corriente máxima	900	mA
Corriente en reposo	50	mA
Temperatura de trabajo	-5 a 85	°C
Torque máximo	15,3	kg · cm
Velocidad sin carga	59	RPM
Peso	55	g
Resolución	0.29	grados
Angulo de funcionamiento	300	grados

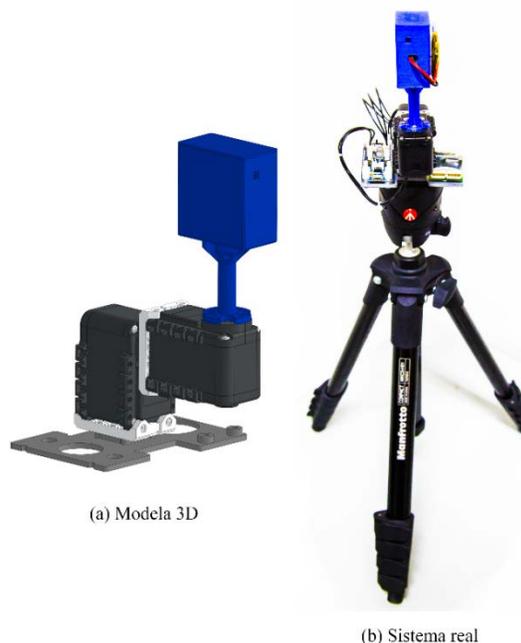


Figura 5. Mecanismo de 2 DoF. Fuente: Autor

### 3.2 Plataforma de adquisición de datos

Es un sistema completo de adquisición integrado por un microcontrolador Teensy 3.2 con procesador ARM Cortex-M4 de 32 bits que corre a 72 MHz que realiza el procesamiento y fusión en una salida orientada en el espacio de los datos en bruto adquiridos por la unidad de medición inercial constituida de nueve grados de libertad (un magnetómetro, un acelerómetro y un giroscopio, todos triaxiales). En la Tabla 3 se enuncian las especificaciones técnicas del microcontrolador dedicado al procesamiento de la información. Asimismo, se configura la interfaz  $I^2C$  para la comunicación procesador-IMU y los registros con los rangos de sensibilidad en  $\pm 2 g$  para el acelerómetro,  $\pm 250 \text{ }^\circ/s$  para el giroscopio y el magnetómetro en  $\pm 4800 \mu T$ . En la Tabla 4 se observan las especificaciones técnicas más significativas de la unidad a implementar.

Tabla 3

Especificaciones microcontrolador Teensy 3.2

Parámetros	Rango	Unidades
Procesador	32	bits
Núcleo	Cortex-M4	
Velocidad nominal	72	MHz
Overclockable	96	MHz
Memoria Flash	256	kbyte
Ancho de banda	192	Mbytes/s
Caché	256	Bytes
RAM	64	kbytes
EEPROM	2	kbytes
ADC	13	bits
Voltaje de entrada	3.3	V

Tabla 4

Especificaciones Unidad de Medición Inercial MPU-9250

Características	Rango	Unidades
Voltaje de entrada	2.4 a 3.6	V
Consumo de corriente	3.5	mA
Temperatura de operación	-4 – 85	°C
Acelerómetro	$\pm 2$	g
	$\pm 4$	
	$\pm 8$	
	$\pm 16$	
Giroscopio	$\pm 250$	°/s
	$\pm 500$	
	$\pm 1000$	
	$\pm 2000$	
Magnetómetro	$\pm 4800$	$\mu T$
Interfaz $I^2C$	400	kHz

A través de direcciones de memoria se leen las nueve variables y junto con el tiempo se crea una cadena, la cual es transmitida por un de manera inalámbrica por medio de un protocolo de comunicación bluetooth sincronizada al PC a una velocidad de 57600. Empleado Python 2.7, se adquieren 20 muestra por cada posición de la plataforma, los cuales son procesados permitiendo conocer la posición aproximada del robot en todo momento y facilitando la validación de los datos suministrados por el módulo de medición, la cual es tabulada y guarda en un archivo en formato .xls.

Para asegurar el funcionamiento autónomo de la plataforma de adquisición de datos, se integra un cargador con una batería de litio de 600 mAh para el suministro de energía que

permite el muestreo por más de 3 horas. En la Figura 6 se muestra la plataforma completa de adquisición de datos.

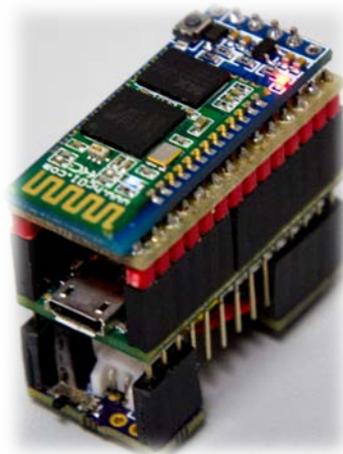


Figura 6. Unidad completa de medición inercia. Fuente: Autores

### 3.3 Modelo cinemático de correlación

Se realiza entonces el modelo matemático de la cinemática directa del brazo robótico de dos eslabones empleado, basado en la metodología de Denavit-Hartenberg, para hacer el seguimiento de la posición de la unidad inercial. Para hacer posible una visualización del proceso seguido, se utiliza el software MATLAB con la librería Robot 9.10 para diagramar los eslabones modelados. La construcción y simulación de la cinemática directa se muestra Figura 7.

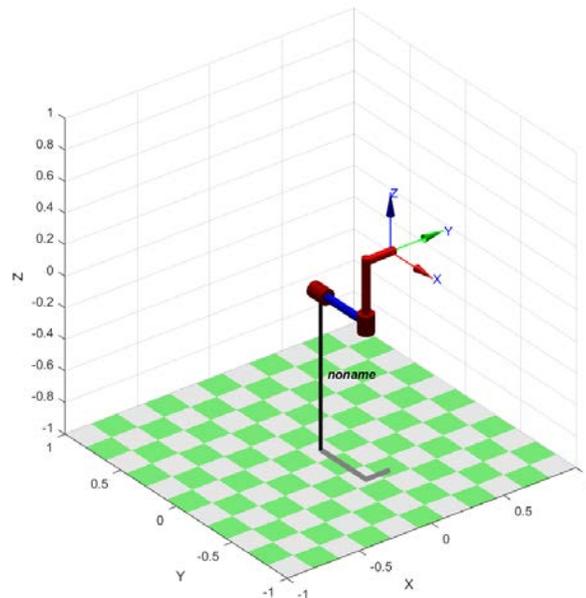


Figura 7. Simulación mecanismo 2 DoF con cinemática directa. Fuente: Autores

La matriz  $A$  se construye debido a la rotación y traslación de los eslabones, permitiendo establecer la ubicación de los sistemas de referencia de los eslabones en cualquier sistema robótico articulado, teniendo en cuenta si el eslabón (Link) es prismático o rotacional, siendo  $\theta$ ,  $d_i$ ,  $\alpha_i$  y  $\alpha$  la rotación en  $z$ , traslación en  $z$ , traslación en  $x$  y rotación en  $x$  respectivamente.

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\cos \alpha \sin \theta & \sin \alpha \sin \theta & a \cos \theta \\ \sin \theta & \cos \alpha \cos \theta & -\sin \alpha \cos \theta & a \sin \theta \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al realizar la configuración de la matriz DH (Denavit-Hartenberg), se desplazan los ejes de coordenadas eslabón por eslabón acoplándose al movimiento de cada grado de libertad, modelando matemáticamente el arreglo para cada uno de estos. La construcción de la matriz se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Matriz DH (Denavit-Hartenberg)

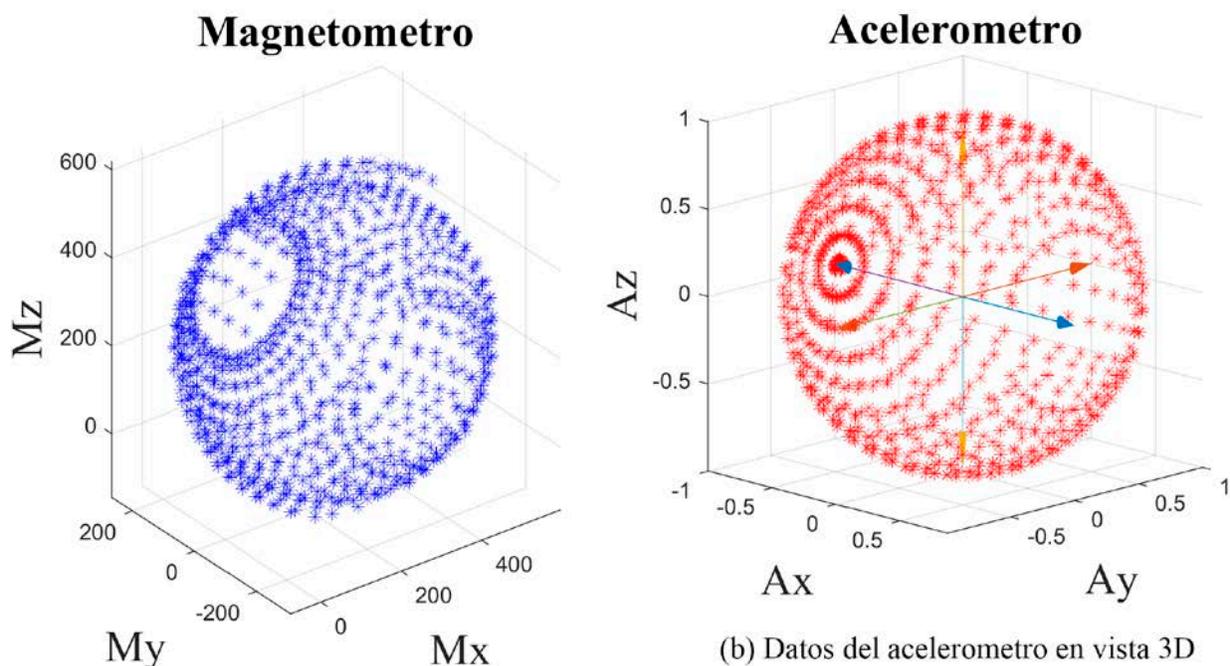
<i>link</i>	$\theta$	$d$	$A$	$\alpha$	<i>offset</i>
1	Q1	0.41	0	-1.571	0
2	Q2	0	0	0	0

### 3.4 Modelo de calibración geométrico

El proceso de adquisición de datos generó un conjunto de datos  $C_{17360 \times 12}$  donde  $C$  corresponde a las medidas triaxiales del acelerómetro (Acc), giroscopio (Gyr), magnetómetro (Mag), además del tiempo (T) y los 2 DoF del mecanismo (Ang), con 17360 muestras y 12 variables por un giro de  $270^\circ$  del primer servo. Para tener una medida para estable de cada variable se calcula la media de las 20 muestras obtenidas por cada posición, generando una reducción de las muestras a 868. Los datos del magnetómetro y acelerómetro son representados en la Figura 8. Se realiza entonces la estimación de las compensaciones para el magnetómetro y acelerómetro asumiendo la ortogonalidad debido al avance tecnológico de los dispositivos MEMS, entonces el modelo de calibración se basa en determina el factor de escala, el cual se estima dividiendo la magnitud de la línea por el valor máximo y el bias sacando la media de cada componente de los sensores. La ecuación (1) muestra determina las compensaciones.

$$U = S * (A - b) = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

Donde,  $b$  corresponde al vector del offset,  $A$  es el vector de las medidas triaxiales magnéticas e inerciales suministradas por la IMU,  $S$  representa la matriz del factor de escala, y  $U$  es el vector de compensaciones, siendo para el acelerómetro la aceleración aplicada equivalente a la magnitud de la gravedad de la tierra ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ). En el caso del magnetómetro corresponde al offset generado por la variación del campo magnético de la tierra.



(a) Datos del magnetometro en vista 3D

Figura 8. Conjunto de datos para el magnetómetro y acelerómetro. En ambos casos son datos en bruto.

La metodología aplicada para el giroscopio es diferente, debido a que cada muestra por posición del mecanismo el sensor se mantuvo estático, generando que no haya fuerza centrífuga que es equivalente a una velocidad angular igual a cero, pero el efecto Coriolis determina un offset en el dispositivo, el cual va depender de la orientación. Para corregir este error se procede a realizar un suavizado de los datos implementando un filtro de promedio móvil. Posteriormente se calcula la media de cada coordenada al sustraer la medición del efecto Coriolis dependiendo de la orientación de IMU, por ejemplo, si el efecto se manifiesta perpendicular a la tierra el offset será diferente. En la Figura 9 se muestra los datos en bruto de las coordenadas de giroscopio ( $Gx, Gy, Gz$ ), donde se puede observar la variación de offset a medida que el dispositivo va cambiando de posición.

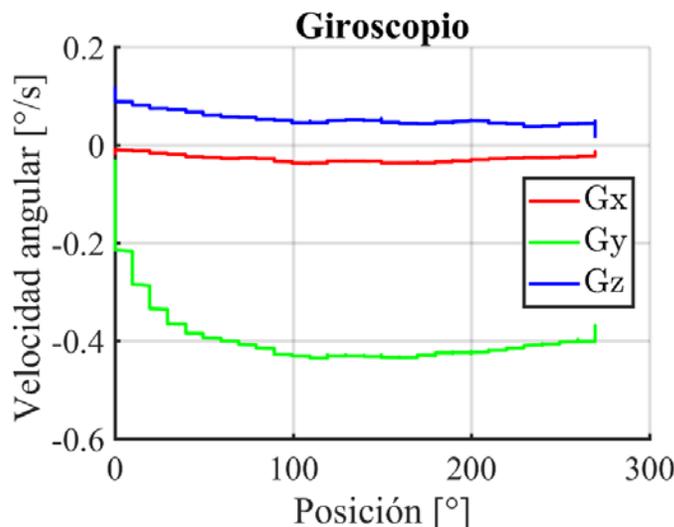


Figura 9. Conjunto de datos en bruto del giroscopio por coordenada

### 3.5 Modelo de calibración MLP

El perceptrón multicapa es una arquitectura de red general que resuelve una gran cantidad de problemas para la ingeniería por medio de lógica difusa, siendo este una versión mejorada del modelo inicial perceptrón simple, que constaba con una limitación significativa al dispensar de la capacidad de solucionar sistemas linealmente no separables y fue solucionada al ampliar la gama de funciones de activación y con la implementación de diferentes capas al modelo. Partiendo de la capacidad del modelo multicapa, se encuentra una gran aplicación en los métodos de calibración de las unidades inerciales, de cuya dificultad para atenuar el ruido gaussiano al cual están sometidos este tipo de sensores microelectromecánicos. En el caso del magnetómetro, opera siempre en un rango limitado de cero a la rotación completa, acomodándose satisfactoriamente a la interpolación ofrecida por la red, ya que este tipo de arquitecturas ven afectada su eficacia al operar en un rango de valores ajeno al entrenamiento anterior del perceptrón.

El entrenamiento procede entonces a realizarse con nueve entradas como patrón de aprendizaje, y dos salidas, las cuales en este caso son los ángulos del magnetómetro. Las entradas están contenidas en una matriz de nueve columnas con diecisiete mil trescientos sesenta patrones (17360), los datos de la unidad inercial, que fueron obtenidos por medio de una comunicación serial, organizados de la siguiente manera: en la primeras tres columnas se ubicaron los valores entregados por el acelerómetro, siendo la primera, la segunda y la tercera, la aceleración en el eje X, Y y Z, respectivamente; De la columna cuatro a la seis, contienen los datos del giroscopio y por último el acelerómetro en la restantes, ambos con la magnitud de cada una de las medidas de velocidad angular y campo magnético en los tres ejes coordenados, ubicados de la misma manera que el acelerómetro. Como valores objetivos del entrenamiento se tomaron los registrados por el encoder de los servomotores utilizados, los cuales representan un valor en tiempo real de la posición de la unidad inercial. Los datos del acelerómetro y el giroscopio resultan relevantes en el entrenamiento al mostrar la posición en los grados de libertad restantes de la unidad inercial, alterando la medida del magnetómetro en el cambio del eje de referencia de la aceleración gravitacional y mejorando el entrenamiento para la futura implementación del método.

## 4. Resultados

### 4.1 Modelo de calibración geométrica

Se describe las compensaciones obtenidas al evaluar los datos en bruto, los cuales se encuentran representados en las siguientes unidades. Para Mag en *miliGauss (mG)*, donde la coordenada  $X$  está en el rango de  $-75$  a  $595$   $mG$ , de  $-310$  a  $270$   $mG$  para la coordenada  $Y$  y para la coordenada  $Z$   $-155$  a  $620$   $mG$ . Para el acelerómetro se encuentran expresadas en  $-1$  a  $1$   $g$ , teniendo en cuenta que existen algunos casos atípicos. Los resultados obtenidos en  $U$ , equivalente a la estimación de las compensaciones para el magnetómetro y acelerómetro se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Parámetros de compensaciones para el magnetómetro y acelerómetro

Sensor	Parámetro	X	Y	Z	Unidades
Magnetómetro	Bias	256.6903	38.4584	206.7667	$mG$
	Factor de escala	0.9425	0.6450	1	
Acelerómetro	Bias	-0.2561	0.0248	0.0038	$g$
	Factor de escala	0.9387	0.9963	1	

En el caso del giroscopio al evaluar los datos en bruto se obtuvo un conjunto de datos  $b_{28 \times 3}$ , donde  $b$  corresponde al offset, con 28 parámetros correspondientes a las posiciones que tuvo durante la corrida para un giro de  $270^\circ$  y 3 coordenada  $G_x, G_y, G_z$ . las cuales se encuentran representados en  $^\circ/s$ . En la Figura 10 se representa el comportamiento del offset y los datos del giroscopio con las compensaciones, donde se observa una tendencia a cero de cada componente lo que significa una reducción significativa del error del sensor.

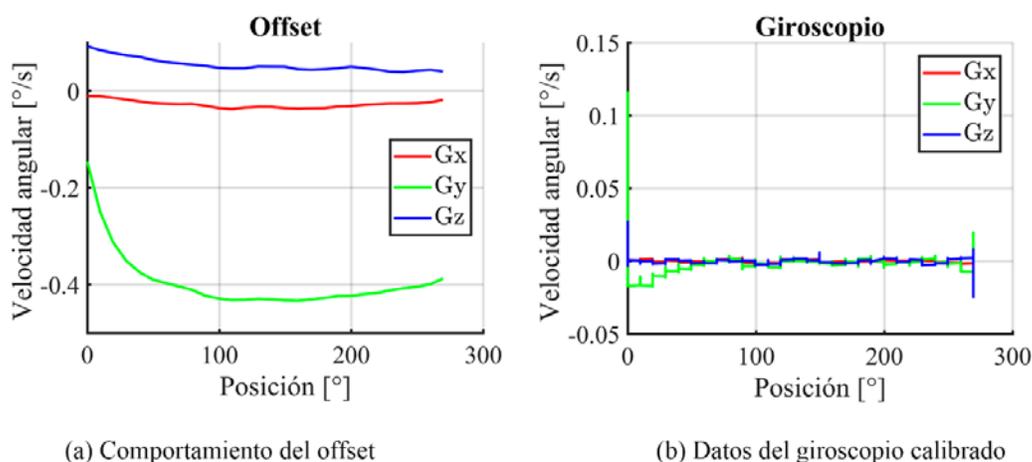


Figura 10. Estimación del comportamiento del offset y conjunto de datos con las compensaciones

## 4.2 Modelo de calibración MLP

El entrenamiento de la red neuronal, con los patrones ingresados como se explicó en la sección de la metodología, se efectuó haciendo uso de la función de activación tangencial hiperbólica, usando la fórmula de Euler y los valores objetivos en su representación en radianes. El perceptrón multicapa (MLP) constó de 5 capas de neuronas, con 10 neuronas por capa, seleccionada de esta manera por mostrar los mejores resultados frente a otros intentos de entrenamiento, obteniendo un error cuadrático medio de 0.5825 para el primer grado de libertad y 0.8253 para el segundo. En la Figura 11 se grafican los datos reales obtenidos de los servomotores (datos objetivo) y además, se muestran los datos estimados por la red (datos de salida).

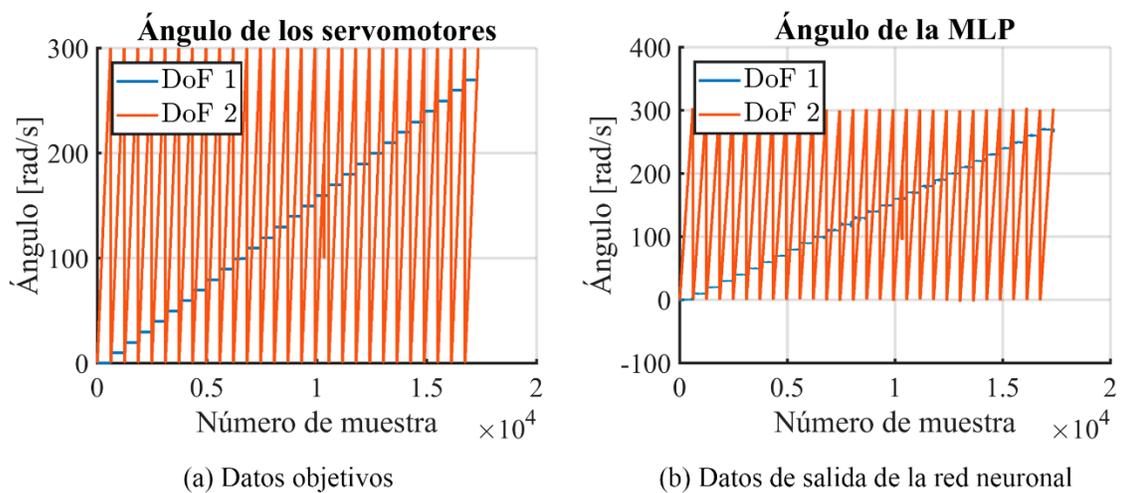


Figura 11. Calibración red neuronal

Los datos de salida de la red entrenada difieren del dato real en un porcentaje menor al 1%, dando a considerar este método de calibración como un camino hacia la precisión y exactitud si se cuenta con un controlador con una velocidad de procesamiento moderada, al tener que implementar una arquitectura de un tamaño relativamente grande.

## 5. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

---

En este documento, se presentaron dos métodos de calibración de unidades de medición inercial, donde el primero consistió en un modelo geométrico para estimar las compensaciones que contrarresten el error generado por la variación del campo magnético, la aceleración gravitacional y el efecto Coriolis, dando como resultado una reducción significativa frente a las diferentes perturbaciones, posteriormente se implantó MLP para estimar el ángulo de cada servomotor con una precisión del 1%. La plataforma implementada es de bajo costo y fácilmente replicable.

Al momento de seleccionar un método de calibración de unidades inerciales, se debe tener en cuenta la capacidad de procesamiento del controlador que recibe la señal, puesto que la precisión de la medida y la velocidad de muestreo son de manera general inversamente proporcionales entre sí, por lo tanto, el criterio de selección del método yace en la relación entre la frecuencia de muestreo y la precisión del dato procesado, ambas en la medida en que el proceso lo exija.

Los sensores inerciales son dispositivos con una extensa área de aplicación como método no invasivo en soporte al ser humano, la calibración de estos es una herramienta que aproxima estos sensores a aplicaciones de mayor complejidad que se usan en la actualidad y vienen siendo utilizadas en las últimas décadas, como la aviación, la rehabilitación muscular y sistemas homólogos.

En trabajos futuros, se propone la implementación de más grados de libertad para aumentar la resolución, permitiendo obtener una tercera orientación lo que representaría una navegación con ángulos en absoluto.

## Referencias

---

- Bergamini, E., Ligorio, G., Summa, A., Vannozzi, G., Cappozzo, A., & Sabatini, A. M. (2014). Estimating orientation using magnetic and inertial sensors and different sensor fusion approaches: Accuracy assessment in manual and locomotion tasks. *Sensors (Switzerland)*, *14*(10), 18625–18649. <https://doi.org/10.3390/s141018625>
- Botero-Valencia, J., Marquez-Viloria, D., Castano-Londono, L., & Morantes-Guzmán, L. (2017). A low-cost platform based on a robotic arm for parameters estimation of Inertial Measurement Units. *Measurement*, *110*, 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.002>
- Botero, V. J. S., Hernández, W., & Fernández, E. (2014). Orientation of a triaxial accelerometer using a homogeneous transformation matrix and Kalman filters. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, *7*(4), 1631–1646.
- Botero V., J.-S., Rico G., M., & Villegas C., J.-P. (2016). Sensor fusion system to estimate the trajectory of a low cost mobile robotic platform using an Inertial Measurement Unit. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *138*(1), 12005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/138/1/012005>
- Kiani, M., Pourtakdoust, S. H., & Sheikhy, A. A. (2015). Consistent calibration of magnetometers for nonlinear attitude determination. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *73*, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.005>
- Kolanowski, K., Świetlicka, A., Kapela, R., Pochmara, J., & Rybarczyk, A. (2017). Multisensor data fusion using Elman neural networks. *Applied Mathematics and Computation*, *0*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.02.031>
- Li, J., Besada, J. A., Bernardos, A. M., Tarrío, P., & Casar, J. R. (2017). A novel system for object pose estimation using fused vision and inertial data. *Information Fusion*, *33*, 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.04.006>
- Liu, Y., Liu, J., Li, D., Li, L., Sun, Y., & Pan, Y. (2009). Study of grey model theory and neural network algorithm for improving dynamic measure precision in low cost IMU. In *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, CSIE 2009* (Vol. 5, pp. 234–238). <https://doi.org/10.1109/CSIE.2009.980>
- Muro-de-la-Herran, A., García-Zapirain, B., & Méndez-Zorrilla, A. (2014). Gait analysis methods: An overview of wearable and non-wearable systems, highlighting clinical applications. *Sensors (Switzerland)*, *14*(2), 3362–3394. <https://doi.org/10.3390/s140203362>
- Paul, T., Singh, J., Nayak, M. M., Rajanna, K., & Kumar, M. S. (2008). Design and optimization of bulk micromachined accelerometer for space applications. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, *1*(4), 1019–1030. Retrieved from <http://www.s2is.org/Issues/v1/n4/papers/paper11.pdf>
- Ren, Y., Wang, Y., Wang, M., Wu, S., & Wei, B. (2014). A measuring system for well logging attitude and a method of sensor calibration. *Sensors (Switzerland)*, *14*(5), 9256–9270. <https://doi.org/10.3390/s140509256>
- Rohac Jan, Sipos Martin, J. S. (2015). Calibration of Low-cost Triaxial Inertial Sensors. *Most*, *18*(December), 32–38. <https://doi.org/10.1109/MIM.2015.7335836>
- Sotak, M. (2010). Testing the coarse alignment algorithm using rotation platform. *Acta Polytechnica Hungarica*, *7*(5), 87–107.

- Stančić, I., Musić, J., & Grujić, T. (2017). Gesture recognition system for real-time mobile robot control based on inertial sensors and motion strings. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 66(March), 33–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.08.013>
- Stephenson, R. M., Naik, G. R., Member, S., & Chai, R. (2017). A System for Accelerometer - Based Gesture Classification Using Artificial Neural Networks, 4187–4190.
- Tejmlva, L., Sebesta, J., & Zelina, P. (2016). Artificial Neural Networks in an Inertial Measurement Unit, 1–5. <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2016.7477431>
- Vissière, D., Martin, A., & Petit, N. (2007). Using distributed magnetometers to increase IMU-based velocity estimation into perturbed area. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 4924–4931. <https://doi.org/10.1109/CDC.2007.4434809>
- Zhang, Y., Fei, Y., Xu, L., & Sun, G. (2015). Micro-IMU-based motion tracking system for virtual training. *Chinese Control Conference, CCC, 2015–Septe*, 7753–7758. <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260871>

FIRMA ESTUDIANTES Juan Mesa  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
FIRMA ASESOR JUAN SE 19/10/2017  
\_\_\_\_\_  
FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_  
RECHAZADO \_\_\_      ACEPTADO \_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES \_\_\_\_\_  
ACTA NO. \_\_\_\_\_  
FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_  
ACTA NO. \_\_\_\_\_  
FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_