



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE DATOS  
PARA SISTEMA DE TRAZADO DE FLUJO MATERIAL.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

IVÁN DANIEL HUERTA HERRERA

PROFESOR GUÍA:  
MARCOS ORCHARD CONCHA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RAÚL CASTRO RUÍZ  
SEBASTIÁN VALERIO GUERRERO

SANTIAGO DE CHILE  
JULIO 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO  
POR: IVÁN HUERTA HERRERA  
FECHA: JULIO 2014  
PROFESOR GUÍA: MARCOS ORCHARD CONCHA

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA SISTEMA DE TRAZADO DE FLUJO MATERIAL.

El control de la entrada de dilución en minería de *block caving* es un factor importante para maximizar la ley media de mineral del material extraído. El conocimiento de este influye directamente en la planificación de extracción. Por este motivo, marcadores han sido utilizados en diversos yacimientos de minería subterránea con el fin de conocer la ubicación del material de descarte, sin embargo no existe una herramienta en tiempo real basada en sistemas de navegación inercial en el mercado que realice este cometido.

Este trabajo de título busca un método alternativo de marcado de material al existente en la actualidad, basado en un sistema de navegación inercial. El sistema diseñado consta de una serie de nodos comunicados entre sí, denominados trazadores, quienes entregan la información a un nodo central para el cálculo de su posición en tiempo real. Dado el alcance de este trabajo de título, se trabajó en pruebas del sistema de adquisición de datos; construyéndolo y validando su factibilidad de uso, entregando de esta forma información de la aceleración y velocidad angular de un cuerpo de interés.

La construcción del sistema se realizó de acuerdo al diseño planteado, mostrando satisfactoriamente plenas capacidades de sus módulos funcionales, midiendo correctamente las variables de interés necesarias para estimar la posición del dispositivo trazador. Se espera que en trabajos futuros se desarrollen técnicas de procesamiento de datos utilizando esta herramienta, mediante filtros Bayesianos u otro tipo, que permita estimar la posición con un error más acotado; y que de esta manera se prolongue el tiempo de uso del sistema en yacimientos mineros.

# Agradecimientos

Ha sido un largo camino lleno de encrucijadas, de tiempos amenos y de desesperación, sin embargo ha llegado el momento de finalizar esta etapa y seguir una nueva senda en los parajes de mi vida. Este trabajo, y toda mi estancia en la universidad, no hubiese sido posible de no ser por las personas que me acompañaron durante todo este proceso, incluso aún aquellas que me motivaron a estudiar en tiempos pasados.

Mi familia ha sido quien me ha hecho ser quien soy, especialmente mis padres; Sonia Herrera Monsalve y Marcelino Huerta Arce. Madre, te lo debo todo, me diste la vida, una educación, un amor incondicional a pesar de mi aparente frialdad frente al mundo. Eres la persona más virtuosa que conozco, un verdadero ejemplo de integridad. Padre, siempre has sido un ejemplo de esfuerzo para mí. Desde pequeño te he visto trabajando interminables horas en tus proyectos, viajando por todo Chile a pesar de la tristeza que provoca el estar lejos de tu familia. Siempre me incentivaste a estudiar, a tener un título profesional, de intentar ser mejor persona de lo que has sido tú en todo ámbito de la vida. Se que nunca se los he dicho, pero los amo.

Agradezco también a mis hermanos, quienes tuvieron que soportar mi carácter en momentos de frustración, a mis amigos quienes me han apoyado tanto en lo académico como en lo emocional y al liceo José Victorino Lastarria y sus profesores; por darme una formación laica con los conocimientos necesarios para poder ingresar y mantenerme dentro de la universidad.

Finalmente, quisiera dar las gracias especialmente al laboratorio de Block Caving y a el AMTC por darme la oportunidad de realizar este trabajo. Principalmente a Sebastián Valerio y Marcos Orchard por sus continuos consejos y ayuda.

Muchas gracias a todos.

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y definición del sistema . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.2.1. Objetivos generales . . . . .	1
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Estructura del trabajo . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Problema de medición de flujos en minería por hundimiento de bloques . . .	3
2.1.1. Sistema actual. . . . .	3
2.1.2. Problemas . . . . .	5
2.2. Sistema de trazado inteligente . . . . .	5
2.2.1. Sensores de posición . . . . .	6
2.2.1.1. Sistema de navegación inercial . . . . .	6
2.2.1.1.1. Acelerómetros . . . . .	7
Acelerómetro mecánico . . . . .	7
Errores de medición . . . . .	9
2.2.1.1.2. Giróscopo . . . . .	9
Errores de medición. . . . .	9
2.2.1.2. Sistema de posicionamiento global . . . . .	10
2.2.1.3. Ultrasónicos e infrarrojos . . . . .	11
2.2.2. Unidades de procesamiento . . . . .	11
2.2.2.1. Microcontroladores de baja potencia . . . . .	12
2.3. Ecuaciones de movimiento del sistema . . . . .	12
2.3.1. Sistemas de referencia . . . . .	12
2.3.1.1. Marco referencial centrado en la tierra, fijo en la tierra (ECEF)	13
2.3.1.2. Marco referencial inercial . . . . .	13
2.3.1.3. Marco referencial del cuerpo . . . . .	14
2.3.1.4. Marco referencial de navegación. . . . .	14
2.3.2. Traspaso de un marco referencial a otro . . . . .	14
2.3.2.1. Matriz direccional de coseno . . . . .	14
2.3.2.2. Representación de DCM en cuaterniones . . . . .	16
2.3.2.3. Evolución temporal de cuaterniones . . . . .	16
2.3.3. Ecuación de movimiento de un sistema de navegación inercial. . . . .	17
2.3.4. Método de navegación por estima . . . . .	18

<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>20</b>
3.1. Prototipo de sistema de trazado inteligente de flujo de material . . . . .	20
3.1.1. Nodo de cómputo . . . . .	20
3.1.2. Nodo de seguimiento . . . . .	21
3.1.3. Operación . . . . .	21
3.2. Requerimientos . . . . .	22
3.3. Diseño de trazadores . . . . .	23
3.3.1. Selección de componentes . . . . .	23
3.3.2. Diseño final de placas . . . . .	24
3.4. Desarrollo de firmware . . . . .	25
3.4.1. Programación de microcontrolador . . . . .	25
3.4.1.1. Configuración de módulos de comunicación . . . . .	26
3.4.1.2. Procesamiento de datos . . . . .	27
3.4.2. Configuración de sensor . . . . .	28
3.4.2.1. Calibración de sensor . . . . .	28
3.5. Implementación . . . . .	30
3.5.1. Construcción del dispositivo trazador . . . . .	30
3.5.2. Instalación del <i>firmware</i> en el microcontrolador . . . . .	31
3.5.3. Pruebas básicas de funcionamiento . . . . .	32
<b>4. Procedimiento experimental</b>	<b>33</b>
4.1. Prueba de movimiento . . . . .	33
4.1.1. Cuerpo en estado de reposo . . . . .	34
4.1.2. Movimiento en un plano en marco referencial del cuerpo . . . . .	34
<b>5. Análisis y resultados</b>	<b>36</b>
5.1. Cuerpo en estado de reposo . . . . .	36
5.1.1. Movimiento en un plano en marco referencial del cuerpo . . . . .	40
<b>6. Conclusiones</b>	<b>42</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	42
6.2. Trabajos futuros . . . . .	43
<b>Bibliografía</b>	<b>44</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>45</b>

# Índice de tablas

7.1. Especificaciones giróscopo, MPU-9150 . . . . .	45
7.2. Especificaciones acelerómetro, MPU-9150 . . . . .	46
7.3. Especificaciones magnetómetro, MPU-9150 . . . . .	46
7.4. Especificaciones eléctricas, MPU-9150 . . . . .	46
7.5. Especificaciones generales, CC2520 . . . . .	47
7.6. Especificaciones generales, MSP430F5437A . . . . .	47

# Índice de figuras

2.1. Dispositivo smart marker . . . . .	4
2.2. Detección del material en el LHD mediante lector . . . . .	5
2.3. Acelerómetro mecánico simple . . . . .	8
2.4. Triangulación en GPS. . . . .	11
2.5. Ejemplo de ECEF . . . . .	13
2.6. Ejemplo de un marco referencial de cuerpo de un móvil. . . . .	14
2.7. Rotación consecutiva en tres ejes cordenados distintos. . . . .	15
2.8. Obtección de datos de sistema INS referenciado en el frame de navegación. . . . .	18
3.1. Diagrama de bloques de prototipo del sistema. . . . .	21
3.2. Diagrama de bloques del trazador. . . . .	22
3.3. Placas de comunicación, medición y procesamiento, y alimentación. . . . .	25
3.4. Software Code Composer Studio, utilizado para programar los dispositivos en lenguaje C. . . . .	26
3.5. Microncontrolador MSP430F5437A y sus módulos funcionales. . . . .	26
3.6. Trama de información enviada mediante el protocolo de comunicación UART desde el trazador a un terminal . . . . .	28
3.7. Medición de fuerza específica en estado de reposo en distintas orientaciones de un sensor no calibrado. . . . .	29
3.8. Alineación entre la placa y la pastilla a soldar. . . . .	30
3.9. Equipo de soldado y perfil térmico utilizado en el soldado del dispositivo MPU-9150 . . . . .	31
3.10. Prototipo trazador construido (nodo de seguimiento). . . . .	31
3.11. Comunicación SPI entre el microcontrolador y el <i>chip</i> CC2520. . . . .	32
4.1. Dispositivo fijo en base inamovible. . . . .	34
4.2. Configuraciones en prueba de rotación sobre ejes referenciales del cuerpo. . . . .	35
5.1. Resultados de acelerómetro en prueba de cuerpo en estado de reposo . . . . .	36
5.2. Resultados de giróscopo en prueba de cuerpo en estado de reposo . . . . .	37
5.3. Resultados de posicionamiento del móvil con datos en estado de reposo en bruto . . . . .	37
5.4. Efecto de outliers sobre rotación medida del móvil . . . . .	38
5.5. Resultados de acelerómetro con datos filtrados . . . . .	38
5.6. Resultados de giróscopo con datos filtrados . . . . .	39
5.7. Resultados de posicionamiento del móvil con datos filtrados . . . . .	39
5.8. Resultados de posicionamiento del móvil para distintas realizaciones . . . . .	40

5.9. Resultados de acelerómetro y giróscopo para rotación a velocidad angular constante en torno al eje z del marco referencial del cuerpo . . . . .	40
5.10. Resultados de acelerómetro y direccionamiento para rotaciones arbitrarias en torno al eje z del marco referencial del cuerpo . . . . .	41
7.1. Diagrama de funcionamiento de módulo SPI en microcontrolador MSP430. .	48

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y definición del sistema

El control de entrada de dilución en minería de *block caving* es importante para maximizar la ley de mineral del material extraído. Varios factores son considerados cuando se planifica el control de extracción, donde en algunos casos han sido utilizados marcadores de mineral para predecir la entrada del material de descarte y calcular la forma de la elipse de extracción asociada a los puntos de extracción. La idea principal del 'Sistema de trazado inteligente para flujo de material', propuesto en este trabajo, es obtener datos en tiempo real de la dinámica del material extraíble para su uso posterior en planificación de extracción a corto plazo y predicción de entrada de dilución.

La estructura del sistema consta de dos dispositivos o nodos principales: de seguimiento y de cómputo. Los nodos de seguimiento están en el interior de la mina sensando la posición del material, para luego transmitir dicha información al nodo de cómputo mediante un sistema de comunicación enmallado. Una vez recibida, este nodo procesa los datos y los entrega al operador. Los dispositivos de comunicación entre nodos se basan en el protocolo IEEE 802.15.4, y son considerados sólo para su implementación en el modelo de laboratorio. La posición del nodo de seguimiento se calcula mediante un sistema de navegación inercial utilizando el método de navegación por estima.

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. Objetivos generales

- Diseñar, construir y evaluar desempeño de un prototipo de trazador de posición para el material por extraer en minería caving.

## 1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar el hardware del dispositivo trazador.
- Programar firmware y configurar el dispositivo.
- Realizar pruebas de medición de datos mediante sensores y cálculo de posición del trazador.
- Analizar resultados de pruebas realizadas.

## 1.3. Estructura del trabajo

La presentación del informe de trabajo de título, del proyecto "Diseño e implementación de dispositivo de adquisición de datos para sistema de trazado de flujo material", se realiza por medio de seis capítulos cuyo contenido se explica a continuación.

El primer capítulo es el de introducción al tema, en el cual se entrega la motivación de por qué se realiza el proyecto, explicando tanto los objetivos específicos como generales del mismo.

Dentro del segundo capítulo se presenta los antecedentes, contexto y herramientas existentes para el problema de trazado de material. Dentro del contexto se explica el sistema actual con el que se realiza el trazado del flujo y sus deficiencias. En herramientas se describe los tipos de sensores existentes y metodologías matemáticas útiles para el problema planteado.

En el tercer capítulo se describe cómo se realizó el diseño e implementación del sistema. En primera instancia se define y explica la estructura del sistema por diseñar. Luego se especifican los requerimientos del prototipo. Finalmente se explica brevemente como se implementa, o pone en marcha, el prototipo.

El cuarto capítulo corresponde a la descripción de los procesos experimentales realizados para probar el funcionamiento del dispositivo. Aquí se explica cómo y por qué se realizaron las respectivas pruebas del dispositivo trazador.

El quinto capítulo muestra los resultados de las pruebas del capítulo cuarto. Estos resultados son presentados mediante gráficos.

El sexto capítulo entrega las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros acerca del proyecto.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Problema de medición de flujos en minería por hundimiento de bloques

La minería subterránea por hundimiento de bloques es utilizada para extraer flujo de material aprovechando la aceleración gravitacional de los cuerpos. Resulta interesante para las mineras que utilizan este sistema saber la dinámica de extracción para evitar la entrada de dilución, o material de descarte, en el punto de extracción.

#### 2.1.1. Sistema actual.

Hoy en día, el sistema automatizado que permite la medición de flujo de material, en este método de explotación, utiliza los denominados marcadores inteligentes (*smart markers* de Elexon Electronics). Estos dispositivos se componen de un bloque de identificación por radio frecuencia, RFID, y un encapsulado resistente a explosiones. Además, contienen una batería de larga duración, que permiten medir el flujo extraído de un cuerpo de material de una mina de *block caving* luego de salir del punto de extracción.



Figura 2.1: Dispositivo smart marker, Elexon Electronics[1].

El sistema de marcadores inteligentes consta de 5 componentes estructurales[1]:

- Lector: permite saber si algún marcador ha estado en sus cercanías. Utiliza un receptor RFID para cumplir su labor.
- Activador: dispositivo que se encarga de poner en funcionamiento los marcadores, antes de ingresarlos a la mina.
- Marcador: corresponde al dispositivo *smart marker*, el cual se adhiere a un bloque de material por extraer, permitiendo determinar si está dentro o fuera de la mina.
- Escáner: Obtiene la información adquirida por los lectores, para ser entregada a un centro de procesamiento de datos.
- Sistema de manejo de marcadores: Analiza y guarda los datos entregados por el escáner, los procesa y entrega al usuario u operador.

La detección del material extraído se realiza cuando el LHD (*load haul dump*), vehículo que remueve material en minería subterránea, se encuentra cerca de un lector. En ese momento, los marcadores adheridos al material que acarrea el LHD son detectados por este, guardando dicha información en su memoria. Luego la información del lector es recopilada por un escáner, donde posteriormente es entregada, procesada y guardada por el sistema de manejo de marcadores para entregarse al operador.

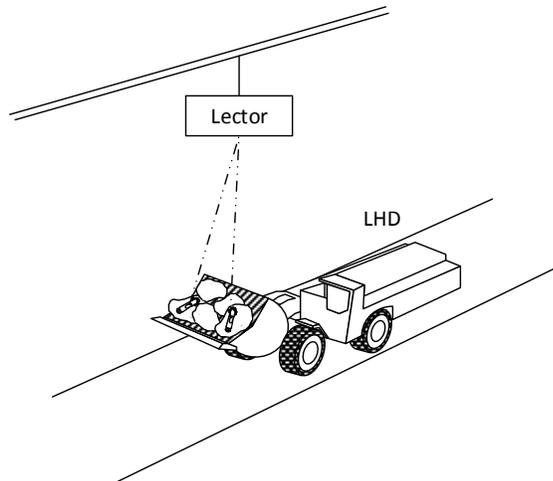


Figura 2.2: Detección del material en el LHD mediante lector.[1]

### 2.1.2. Problemas

El principal problema de este sistema es la enorme cantidad de dispositivos que se debe utilizar para ver como evoluciona el sistema, teniendo que invertir una gran cantidad de dinero para su implementación. Estos aparatos sólo pueden recibir la información de sensores una vez extraídos, imposibilitando el procesamiento de datos en tiempo real para una respuesta más rápida por parte de la minera; lo que podría mejorar las estrategias de control de extracción a corto plazo.

Otro problema posible es que si se acaba la carga de la batería de los equipos antes de ser extraídos resulta en la obtención nula de datos del marcador. Esto podría generar una mayor incertidumbre si las baterías tuviesen algún desperfecto.

## 2.2. Sistema de trazado inteligente

En este trabajo de título se define un sistema de trazado inteligente como un conjunto de dispositivos que permiten realizar el seguimiento de una variable de interés, otorgándole parcial o completa inteligencia y autonomía al sistema, es decir, necesitar en la menor medida posible operadores o personas involucradas en el funcionamiento del sistema.

En el contexto de este trabajo, se requiere un sistema de trazado inteligente de posición del material por ser extraído. Para ello, el sistema debe contar al menos con:

- Sensores de posición: miden variables que permitan calcular la posición de ciertos bloques del material por ser extraídos.

- Sistema de comunicación: transmite la información obtenida de los sensores a una unidad de procesamiento centralizada.
- Procesador central: recibe datos de sensado, los interpreta y entrega al usuario u operador.

## 2.2.1. Sensores de posición

Los sensores de posición son dispositivos que permiten conocer la posición de un cuerpo de interés, con un cierto grado de incertidumbre, mediante la medición de alguna magnitud física. Existen diversos tipos de sensores de posición, por ello se describirá a continuación algunos de los más utilizados en la actualidad.

### 2.2.1.1. Sistema de navegación inercial

El sistema de navegación inercial (*inertial navigation system*, INS) se utiliza como soporte a la navegación, entregando la posición de un objeto móvil mediante la técnica de navegación por estima (*dead reckoning*); donde la posición se estima por medio de la trayectoria que ha seguido el móvil.

Los INS se componen de una unidad de medición inercial (*inertial measurement unit*, IMU), computadoras de navegación, una interfaz de usuario y una fuente de poder. Cada componente realiza las siguientes funciones:

- Unidad de medición inercial: entrega las mediciones de los sensores, los calibra y controla.
- Computadora de navegación: procesa las salidas obtenidas de la IMU, con objeto de estimar la posición del móvil.
- Interfaz de usuario: permite visualizar los datos obtenidos y, en ocasiones, utilizar alguna medida de control de trayectoria en el móvil.
- Fuente de poder: energiza el sistema completo.

Generalmente, las unidades de medición inercial se clasifican en dos categorías[5], los sistemas de suspensión de cardán (*gimballed systems*); denominados también sistemas flotantes, y los sistemas fijos (*strapdown systems*). La diferencia entre ellos es que los sistemas flotantes tienen el ensamble de sensores inerciales (*inertial sensor assembly*, ISA); parte del IMU donde están los sensores, aislado de las rotaciones del móvil. En cambio en los sistemas fijos el ISA es cuasiestático respecto al móvil y sus rotaciones.

A continuación se describe los sensores que caracterizan la IMU de un sistema fijo de INS, esto debido a que estos sistemas presentan la ventaja de ser más pequeños y no necesitar

una referencia inercial; siendo más apropiados para la aplicación pertinente a este trabajo de título.

#### 2.2.1.1.1. Acelerómetros

Los acelerómetros son sensores que miden la aceleración de un cuerpo. Luego, basados en la segunda ley de Newton; donde la fuerza total de un cuerpo cumple la relación

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (2.1)$$

De la Ecuación 2.1 se puede obtener la posición de un cuerpo integrando la expresión dos veces en el tiempo; siempre que se conozca su posición y velocidad inicial.

El funcionamiento de este tipo de sensores difiere según la tecnología que se utilice, analizándose solo el caso mecánico dentro de este trabajo. Generalmente, para conocer la aceleración de un cuerpo se utiliza una masa de prueba. Al ser la aceleración fuerza por unidad de masa, basta conocer las fuerzas sobre esta masa de prueba para obtener la información requerida.

La medición que entrega el sensor es denominada fuerza específica ( $\vec{f}$ ), y corresponde a la sumatoria de fuerzas sobre el cuerpo exceptuando la gravitacional. Esto se debe a que la masa de prueba se encuentra en un sistema no inercial, donde los efectos de la gravedad afectan tanto a la masa como a los elementos mecánicos del sensor[4].

#### Acelerómetro mecánico

Este tipo de sensor permite calcular la posición de un cuerpo de interés mediante la medición de fuerzas mecánicas sobre una masa de prueba. La medición de estas fuerzas es proporcional a la aceleración del cuerpo, ya que el sensor se encuentra acoplado a este.

**Ejemplo básico de acelerómetro mecánico.** El acelerómetro mecánico más simple de construir es el que se muestra en la , donde el desplazamiento medido de la masa de prueba es proporcional a su fuerza específica. Este modelo de sensor permite entender de forma sencilla el principio de funcionamiento de este tipo de acelerómetro.

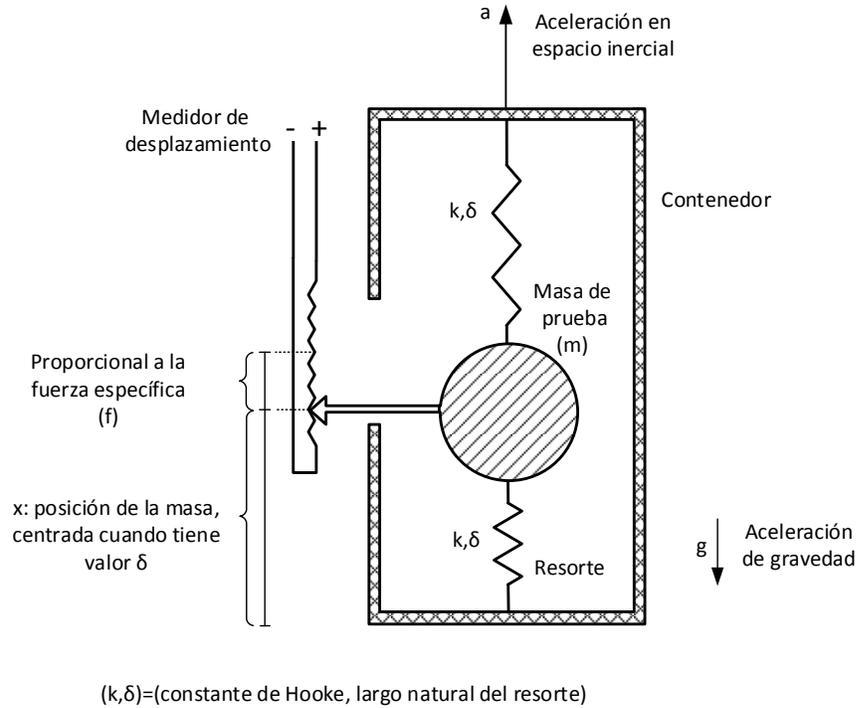


Figura 2.3: Acelerómetro mecánico simple [4]

De la Figura 2.3 se puede ver que las ecuaciones que gobiernan el movimiento de la masa de prueba ( $m$ ) son:

$$\begin{aligned}
 ma &= mf - mg \\
 &= F_{r1} - F_{r2} - mg \\
 &= 2k(x - \delta) - mg
 \end{aligned}$$

donde el desplazamiento de la masa respecto al centro corresponde al valor  $\Delta x = x - \delta$ , por lo que el valor de la fuerza específica se calcula con la fórmula de la Ecuación 2.2

$$f = \frac{2k\Delta x}{m} \quad (2.2)$$

Es importante notar que si el sensor se encuentra en caída libre la deformación en los resortes será nula. Esto se debe a que las partículas de los resortes aceleran de la misma forma que la masa de prueba, y por tanto solo se verá afectada por las fuerzas distintas a la gravitacional. Finalmente la aceleración del cuerpo está dada por la Ecuación 2.3

$$a = \frac{2k\Delta x}{m} - g \quad (2.3)$$

## Errores de medición

El error de un acelerómetro de tres dimensiones, que mide la aceleración de tres ejes coordenados ortogonales entre sí, se puede considerar como la diferencia entre el valor medido de fuerza específica y su valor real. En general, el error de medición de un acelerómetro se puede modelar de la forma que muestra la Ecuación 2.4[3]:

$$\begin{pmatrix} \delta f_x \\ \delta f_y \\ \delta f_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} aB_x \\ aB_y \\ aB_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} aSF_x & aMA_{xy} & aMA_{xz} \\ aMA_{yx} & aSF_y & aMA_{yz} \\ aMA_{zx} & aMA_{zy} & aSF_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} aW_x \\ aW_y \\ aW_z \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

donde cada término es:

- $aB_i$ : Sesgo del acelerómetro en el eje i.
- $aSF_i$ : Factor de escala del acelerómetro en el eje i.
- $aMA_{ij}$ : Desalineamiento del acelerómetro del eje i respecto al eje j.
- $aW_i$ : Ruido blanco en el acelerómetro en el eje i.

Se puede agregar más términos al modelo, que consideren asimetría de factores de escala o sensibilidades cuadráticas de los acelerómetros.

### 2.2.1.1.2. Giróscopo

Un giróscopo es un dispositivo que permite medir el ángulo de desplazamiento de un cuerpo, o en su defecto su velocidad angular, respecto a un eje determinado. Estos sensores se utilizan para tareas como navegación o estabilización de un cuerpo.

Los giróscopos, al igual que los acelerómetros, se pueden clasificar según su principio de funcionamiento. Existen giróscopos que se basan en principios mecánicos, de resonancia magnética nuclear, hidrodinámica, electrostática, óptica, entre otros.

## Errores de medición.

El error de un giróscopo de tres dimensiones, que mide la rotación respecto a tres ejes coordenados ortogonales entre sí, se puede considerar como la diferencia entre el valor medido de velocidad angular y su valor real. En general, el error de medición de un giróscopo se puede

modelar de forma análoga a la del acelerómetro según muestra la Ecuación 2.5 [3]:

$$\begin{pmatrix} \delta g_x \\ \delta g_y \\ \delta g_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} gB_x \\ gB_y \\ gB_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} gSF_x & gMA_{xy} & gMA_{xz} \\ gMA_{yx} & gSF_y & gMA_{yz} \\ gMA_{zx} & gMA_{zy} & gSF_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} gW_x \\ gW_y \\ gW_z \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

donde cada término es:

- $gB_i$ : Sesgo del girómetro del eje i.
- $gSF_i$ : Factor de escala del girómetro del eje i.
- $gMA_{ij}$ : Desalineamiento del girómetro del eje i respecto al eje j.
- $gW_i$ : Ruido blanco en girómetro del eje i.

### 2.2.1.2. Sistema de posicionamiento global

El sistema de posicionamiento global (*global positioning system*, GPS) es parte de un sistema de navegación basada en satélites. Fue desarrollada por el departamento de defensa de los Estados Unidos, bajo el programa de satélites NAVSTAR[5].

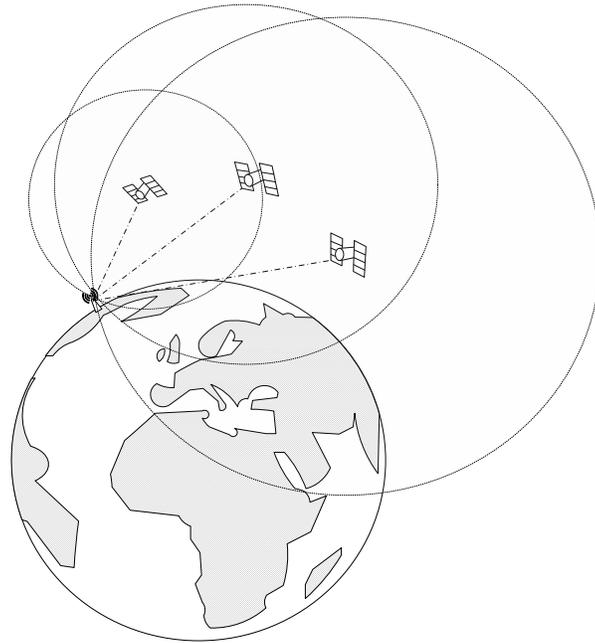
GPS consta con más de 24 satélites activos, dispuestos uniformemente alrededor de seis órbitas circulares, con cuatro o más satélites en cada una de ellas. Las órbitas están inclinadas en un ángulo de  $55^\circ$  relativos al Ecuador y separadas entre ellas por ángulos múltiplos de  $60^\circ$  de ascensión recta. El radio de las órbitas es de aproximadamente 26.560 km, lo que significa que se ubican a de 20.000 km de altura respecto al nivel mar. El sistema de GPS está diseñado de forma que se pueda tener visibilidad con tres o más satélites desde la mayor parte la Tierra.

La comunicación entre los satélites se realiza por medio de radioenlaces, utilizando *spread spectrum*, moduladas en dos portadoras; una centrada en la frecuencia de  $f_0 = 1,575,42$  MHz y otra  $f_1 = 1,227,60$  MHz. Las modulaciones en las portadores se realizan generando un código de ruido pseudoaleatorio (*pseudo random noise*, PRN), enviados mediante *binary phase-shift keying*, BPSK.

Para obtener la posición de un móvil se debe contar con un aparato receptor de GPS, el cual capta las señales emitidas por los satélites. El receptor requiere captar la señal de al menos tres satélites para realizar una triangulación, y de esta forma, calcular la posición del móvil. Las señales enviadas por los satélites constan de la información de la posición y el reloj del satélite, de esta forma por medio del retardo es capaz de calcular la distancia a la que se encuentra de él.

Una de las principales condiciones para el uso de esta tecnología es que los dispositivos

tengan vista directa entre sí (*line of sight*, LOS). De no cumplirse esta condición es imposible comunicar los dispositivos entre sí.



[5]

Figura 2.4: Triangulación en GPS.

### 2.2.1.3. Ultrasónicos e infrarrojos

Este tipo de sensores existentes en el mercado son utilizados mayormente en el área de la robótica. El sensor ultrasónico basa su funcionamiento en el efecto Doppler, detectando cambios de frecuencia en la onda mecánica en caso de existir movimiento. En cambio, el sensor infrarrojo mide la potencia de un laser originado por el mismo, reflejado por un objeto cercano.

Ambos sensores requieren que el objeto en que se refleja la onda, ya sea de luz o sonido, se encuentre inmóvil. En el caso en que el objeto se encuentra en movimiento, el sensor es incapaz de determinar si es el objeto el que se movió o el mismo sensor.

### 2.2.2. Unidades de procesamiento

Dentro del proyecto se requiere dos unidades de procesamiento: la del dispositivo de trazado y la central del sistema. Para el caso del dispositivo trazador se utiliza un microcontrolador y para el sistema central un computador o servidor. Esto debido a los requerimientos de procesamiento de cada etapa.

### 2.2.2.1. Microcontroladores de baja potencia

El microcontrolador es un dispositivo utilizado ampliamente en la industria electrónica, y su función dentro del sistema de trazado es coordinar y controlar la interacción entre el proceso de sensado y comunicación de cada sensor. En definitiva, el microcontrolador se puede considerar como un pequeño computador que provee inteligencia a cada IMU y su respectivo sistema de comunicación.

Una unidad de microcontrol (*microcontroller unity*, MCU) es un tipo de microcontrolador de bajo consumo energético desarrollado por Texas Instruments (TI). Fue diseñado para utilizarse en aparatos de medición de flujos, aparatos médicos portables, redes de sensores, comunicaciones inalámbricas, control de motores, dispositivos de seguridad, entre otros. En general, este tipo de microcontrolador posee los siguientes componentes electrónicos:

- CPU de 16-bit con arquitectura ” *Reduced instruction set computing*”, RISC, con velocidad desde 8 a 20 MHz.
- Memoria de acceso aleatorio (*random access memory*, RAM) de 128 B a 64 KB.
- Memoria FRAM (*ferroelectric RAM*) de 0,5 KB a 512 KB.
- Osciladores y relojes (sistema flexible de relojes).
- Periféricos integrados, como

ADC10	Timers	USB
ADC12	Watchdog timer(WDT)	SPI
SD16	RTC	I2C
SD24	PMM	UART
Comparator	Brownout reset (BOR)	LIN/IrDA
DAC12	SVS	SCAN_IF
DMA	RF Front End	ESP430
Mulplier	A-POOL	LCD
OpAmp	AES	Capacitive Touch

## 2.3. Ecuaciones de movimiento del sistema

### 2.3.1. Sistemas de referencia

El sistema de referencia en que se realizan las mediciones de los sensores inerciales no corresponde necesariamente en el cual se encuentra referenciado el móvil de interés, o dispositivo trazador. La referencia que se utilice depende tanto de los datos que se desee adquirir como la forma en que se desea presentarlos. Por este motivo, resulta fundamental comprender qué sistemas de referencia existen y de qué modo afecta las ecuaciones de movimiento el uso

de uno u otro.

Todos los sistemas de referencia que se explicarán a continuación consisten en una tríada de vectores ortonormales entre sí, denominados marco o *frame*. Cada marco referencial es caracterizado por su origen, donde apunte cada eje y las ecuaciones de movimiento del mismo (traslaciones y rotaciones a lo largo del tiempo).

### 2.3.1.1. Marco referencial centrado en la tierra, fijo en la tierra (ECEF)

Marco de referencia cuyo origen está en el centro de la tierra y se mueve junto con ella. Generalmente uno de sus ejes corresponde al eje de rotación de la tierra y otro está situado en el Ecuador. Cualquier vector o matriz representado en este sistema de referencia se le identifica por un super índice  $e$ .

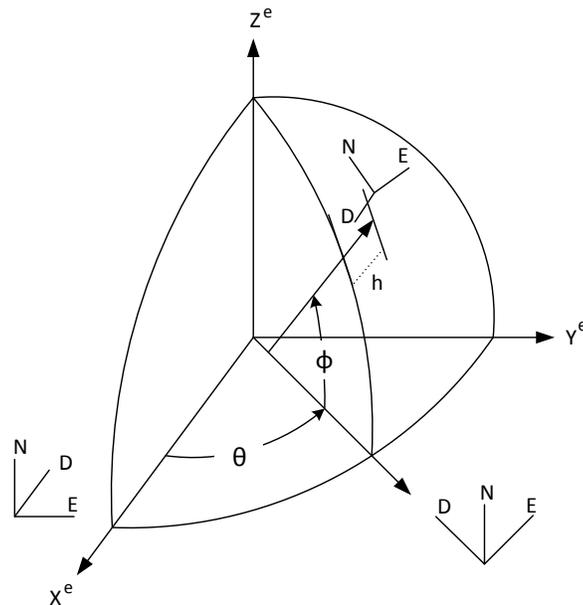


Figura 2.5: Ejemplo de ECEF. [3]

En la Figura 2.5 se aprecia un ECEF, cuyo eje  $z$  es paralelo al de rotación de la tierra, y un marco referencial geográfico local que permite referenciar un cuerpo cualquiera ubicado en la tierra respecto al ECEF; que ocupa los puntos cardinales como referencia.

### 2.3.1.2. Marco referencial inercial

Este tipo de *frame* tiene una referencia inercial que puede ser distinta a la tierra. Uno de los más utilizados es el marco referencial inercial centrado en la tierra (ECI), que es similar

al ECEF con la diferencia de que sus velocidades relativas pueden ser distintas entre sí. Generalmente se utiliza de referencia para este marco inercial una estrella. Cualquier vector o matriz representado en este sistema de referencia se le adiciona el super índice  $i$ .

### 2.3.1.3. Marco referencial del cuerpo

Está centrado en el vehículo que acarrea el sistema, y su dinámica de movimiento es la misma que la del cuerpo que lo lleva. Cualquier vector o matriz representado en este sistema de referencia se caracteriza por tener un super índice  $b$ .

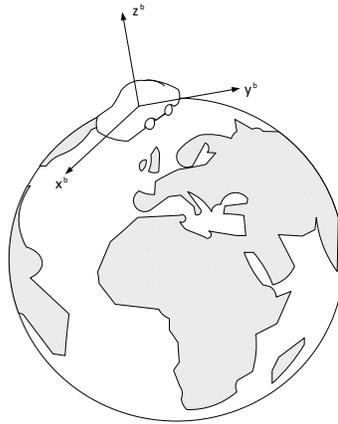


Figura 2.6: Ejemplo de un marco referencial de cuerpo de un móvil.

### 2.3.1.4. Marco referencial de navegación.

Es un marco referencial escogido arbitrariamente, idealmente lo más estático posible. Este *frame* es el que referencia los resultados entregados por el INS. A cualquier vector o matriz representado en este sistema de referencia se le pondrá el super índice  $n$ .

## 2.3.2. Traspaso de un marco referencial a otro

### 2.3.2.1. Matriz direccional de coseno

Un marco referencial se diferencia de otro por dos aspectos básicos, su orientación y origen. Para traspasar un vector de un sistema referencial a otro se debe aplicar una transformación que proyecte dicho vector en el otro sistema coordenado, considerando los aspectos básicos nombrados con anterioridad.

Si el origen de ambos sistemas es el mismo, basta aplicar la transformación dada por la denominada matriz direccional de coseno (*directional cosine matrix*, DCM). Esta matriz

permite realizar rotaciones de un vector en cualquier dirección deseada, aunque es importante tener en consideración que las rotaciones no son conmutativas; por lo cual es fundamental el orden en que se usan.

La DCM que traspassa un vector de un marco referencial tridimensional  $i$  a otro  $j$ , ambos con el mismo origen, se puede generar por medio de tres rotaciones consecutivas en una de las direcciones canónicas de los marcos referenciales resultantes de cada rotación realizada. Matemáticamente se describe mediante la matriz descrita en la Ecuación 2.6

$$C_i^j = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\cos\phi\text{sen}\psi + \text{sen}\phi\text{sen}\theta\cos\psi & \text{sen}\phi\text{sen}\psi + \cos\phi\text{sen}\theta\cos\psi \\ \cos\theta\text{sen}\psi & \cos\phi\cos\psi + \text{sen}\phi\text{sen}\theta\text{sen}\psi & -\text{sen}\phi\cos\psi + \cos\phi\text{sen}\theta\text{sen}\psi \\ -\text{sen}\theta & \text{sen}\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

El proceso para obtener la DCM es el siguiente: se rota el *frame*  $i$  respecto al eje  $z^i$  en un ángulo  $\psi$ , resultando un vector representado en un nuevo marco referencial que se denomina arbitrariamente 1. Luego este es rotado en torno a  $y^1$  en un ángulo  $\theta$  caracterizándolo en otro sistema coordenado denotado 2. Finalmente, se realiza una última rotación respecto al eje  $x^2$  en  $\phi$  radianes, obteniéndose la representación del vector en el marco referencial  $j$ .

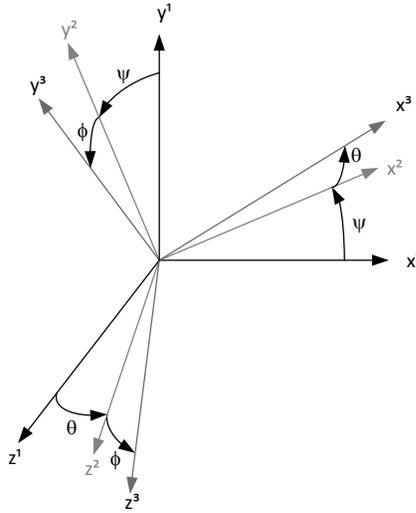


Figura 2.7: Rotación consecutiva en tres ejes coordenados distintos.

Luego, si se quiere representar el vector  $r^i$  en el eje coordenado  $j$  se utiliza la relación en la Ecuación 2.7.

$$r^j = C_i^j \cdot r^i \quad (2.7)$$

Estas matrices cumplen propiedades particulares, dentro de las que se encuentra:

- $|C_i^j| = 1, \forall i, j$

- $C_i^j = C_j^{iT}, \forall i, j$

### 2.3.2.2. Representación de DCM en cuaterniones

Un cuaternión pertenece a un conjunto numérico similar a los complejos, más bien una extensión a cuatro dimensiones de los mismos, y se definen por el conjunto:

$$\mathbb{H} = \{(a + ib) + j(c + id) : a + ib, c + id \in \mathbb{C}\} \subseteq \mathbb{C}^2$$

Es posible representar la matriz de direccional de coseno mediante cuaterniones, y de esta forma encontrar una formulación en variables de estado del sistema que considerará la evolución temporal de los mismos.

Sea  $\Omega_a^b$  la DCM que rota el marco referencial  $a$  para obtener otro  $b$ . La transformación de ejes de un sistema de referencia a otro se realiza considerando dos aspectos: un eje de rotación  $\vec{r}$  y el ángulo de giro  $\delta$ . Definiendo el cuaternión  $q = (q_0 + iq_1) + j(q_2 + iq_3)$  con sus componentes dadas por:

$$q_0 = \cos\left(\frac{\delta}{2}\right), q_1 = \frac{\langle \vec{r}, \hat{x}^a \rangle}{\|\vec{r}\|_2} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right), q_2 = \frac{\langle \vec{r}, \hat{y}^a \rangle}{\|\vec{r}\|_2} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right), q_3 = \frac{\langle \vec{r}, \hat{z}^a \rangle}{\|\vec{r}\|_2} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

donde  $\hat{x}^a, \hat{y}^a$  y  $\hat{z}^a$  son las direcciones canónicas del marco referencial  $a$ . Luego, la DCM se puede calcular de acuerdo a la Ecuación 2.8[2]:

$$\Omega_a^b(q) = \frac{1}{\|q\|_2} \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

### 2.3.2.3. Evolución temporal de cuaterniones

La evolución temporal de los cuaterniones es dada por la siguiente Ecuación 2.9:

$$q[k+1] = q[k] \exp \frac{1}{2} T_s \begin{bmatrix} 0 & w_z & -w_y & w_x \\ -w_z & 0 & w_x & w_y \\ w_y & -w_x & 0 & w_z \\ -w_x & -w_y & -w_z & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

donde  $T_s$  es el tiempo de muestreo y  $w_x, w_y$  y  $w_z$  son las velocidades angulares entre los marcos referenciales en que determinan la DCM, en torno a los ejes canónicos del *frame* que interesa rotar[2].

### 2.3.3. Ecuación de movimiento de un sistema de navegación inercial.

Para cualquier sistema de referencia de navegación a nivel local, se puede expresar la evolución de la velocidad de un móvil con la siguiente ecuación[3]

$$\dot{v}^n = f^n + g^n - (\Omega_{e/n}^n + 2\Omega_{i/e}^n)v^n \quad (2.10)$$

donde cada término en la ecuación se encuentra referenciado en el sistema de navegación y corresponde a:

- $\Omega_{e/n}^n$ : matriz de rotación de ECEF respecto al *frame* de navegación.
- $\Omega_{i/e}^n$ : matriz de rotación de *frame* inercial respecto a ECEF.
- $v^n$ : velocidad del móvil.
- $f^n$ : fuerza específica.
- $g^n$ : aceleración de gravedad.

La Ecuación 2.10 es válida tanto para sistemas fijos como flotantes. Las especificaciones de la referencia utilizada sólo se explicita mediante las matrices de rotación  $\Omega$ .

Las mediciones obtenidas de giroscopios y acelerómetros en un sistema INS se encuentran referenciados respecto al marco referencial del cuerpo del sensor, y no del sistema coordinado donde uno espera representar las variables de interes. Idealmente se desea representar dichas mediciones en un sistema de navegación local, donde se pueda interpretar la información obtenida y calcular la velocidad y posición de los móviles.

Para hacer el cambio de coordenadas de las mediciones de la fuerza específica del sistema, se plantea el modelo de la Figura 2.8. Se puede notar en el modelo que la gravedad no es medida por los acelerómetros, por tanto se requiere estimar su valor dependiendo de la localización global donde se encuentre el móvil.

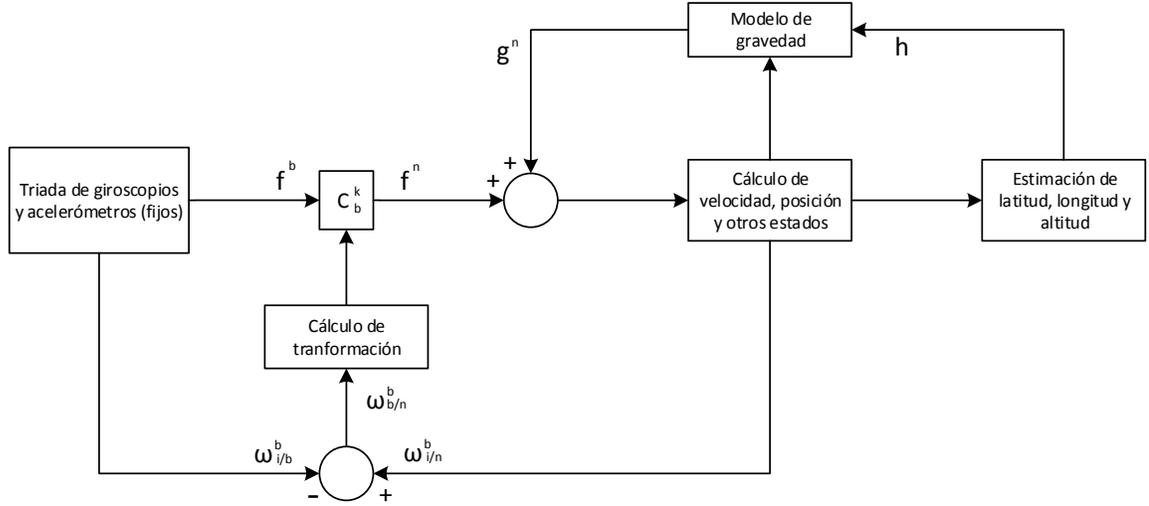


Figura 2.8: Obtención de datos de sistema INS referenciado en el frame de navegación.

### 2.3.4. Método de navegación por estima

El método de navegación por estima (*Dead reckoning method*, DR) es el proceso de calcular la posición actual basado en información previa, conocida o estimada, del curso y velocidad que ha llevado el móvil de interés.

En el caso de un móvil cualquiera, su velocidad en el marco de navegación puede caracterizarse por la Ecuación 2.11,

$$v^n[k+1] = v^n[k] + T_s \dot{v}^n[k], \quad (2.11)$$

donde se asume un cambio de velocidad constante por un periodo de tiempo  $T_s$ , y corresponde a una aproximación de Taylor de primer orden respecto al tiempo continuo  $T_s k$  evaluada en  $T_s(k+1)$ . Si  $r^n$  es la posición del cuerpo en el eje de navegación, entonces se obtiene la Ecuación 2.12

$$r^n[k+1] = r^n[k] + \int_{T_s k}^{T_s(k+1)} v^n dt \quad (2.12)$$

luego, utilizando la regla de aproximación del trapecioide en la integración, y reemplazando  $v^n[k+1]$  usando las ecuaciones anteriores, la posición del cuerpo se determina por la

Ecuación 2.13

$$r^n[k + 1] = r^n[k] + T_s v^n[k] + \frac{T_s^2}{2} \dot{v}^n[k] \quad (2.13)$$

# Capítulo 3

## Diseño e implementación

### 3.1. Prototipo de sistema de trazado inteligente de flujo de material

El sistema de trazado de flujo de material tiene como finalidad determinar la posición de ciertos bloques de mineral en un yacimiento minero, tal que se disminuya los costos de extracción y procesamiento asociados a la dilución del mineral. En este trabajo de memoria se busca analizar que tan certeros son los datos de posición entregados por los trazadores, y de esta forma determinar la factibilidad de uso de estos mismos en un sistema de rastreo aplicado en la industria. Además, en el futuro se pretende utilizar el prototipo en un modelo a escala de minería extensiva. Esto último, con la finalidad de realizar pruebas de laboratorio en estudios mineros, que permitirán obtener nuevos modelos matemáticos de estos sistemas.

El diseño estructural del prototipo considera dos clases de nodo: de seguimiento y de cómputo. El nodo de cómputo se ubica fuera del área de interés de sensado, y es quien recibe la información de los sensores del sistema para ser procesada y posteriormente entregada al usuario. Por otro lado, los nodos de seguimiento consisten en dispositivos que miden alguna variable que permita calcular su posición respecto a un marco referencial de navegación dado, para luego enviar dicha información al nodo cómputo. La comunicación entre los distintos nodos no involucra necesariamente una comunicación directa, que en este caso es mediante el uso de una topología de comunicación en malla.

#### 3.1.1. Nodo de cómputo

El nodo cómputo se compone por los siguientes bloques funcionales: módulo de comunicación, centro de cómputo, interfaz de usuario y fuente de alimentación. A continuación, se describe la función de cada uno de estos.

- Módulo de comunicación: permite recibir la información enviada por otros nodos.
- Centro de cómputo: es quien procesa la información antes de ser entregada al usuario.
- Interfaz de usuario: interacción entre el usuario y el sistema, permitiendo la configuración del mismo.
- Fuente de alimentación: entrega la energía necesaria para el funcionamiento del nodo.

Para efectos prácticos del proyecto, el nodo de cómputo corresponde a un computador conectado a un módulo de comunicación que utiliza el mismo protocolo que los nodos de seguimiento.

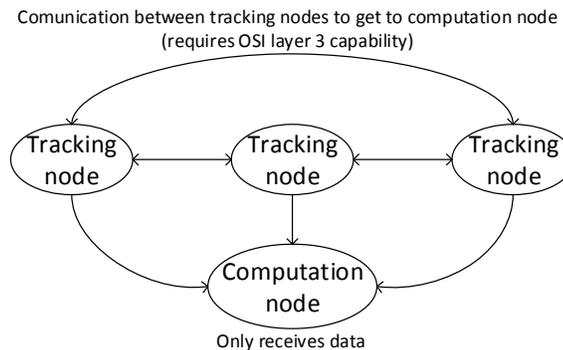


Figura 3.1: Diagrama de bloques de prototipo del sistema.

### 3.1.2. Nodo de seguimiento

El nodo de seguimiento está compuesto por los siguientes bloques funcionales: microcontrolador, módulo de comunicación, sensor, visualizador y fuente de alimentación. El microcontrolador es quien coordina las funciones de los otros bloques, y puede procesar la información entregada por cada uno de ellos. Por otra parte, el visualizador consiste en un conjunto de leds que se utiliza para ver los estados en que se encuentra el dispositivo; encendido, enviando información, entre otros. El resto de los módulos cumple la misma función descrita en el nodo central, exceptuando el sensor; quien entrega información que permite estimar la posición del nodo.

### 3.1.3. Operación

La obtención de datos de la posición de los trazadores ubicados dentro de un bloque de minería extensiva contempla múltiples consideraciones, es por esto que para comenzar el proyecto, el diseño del primer prototipo sólo se enfoca en el tipo de sensores que se podría utilizar en el sistema real. Los sensores al estar kilómetros bajo tierra, no tendrían visibilidad

directa con ningún satélite, por lo que ocupar sistemas de rastreo GPS resulta imposible. A la vez, al estar los bloques contiguos en constante movimiento, se imposibilita usar cualquier tipo de sensor con referencia inercial a otro bloque o componente de la mina.

En esta primera etapa, la comunicación entre los dispositivos se abstraerá de toda restricción exceptuando el permitir libre movimiento de cualquier móvil del sistema. Esto conlleva al uso de sistemas de comunicación inalámbrica, idealmente de bajo consumo energético.

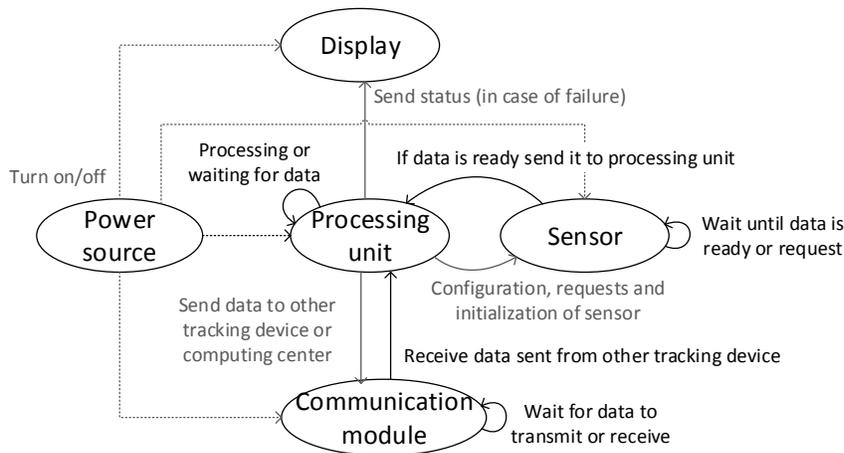


Figura 3.2: Diagrama de bloques del trazador.

## 3.2. Requerimientos

Los requerimientos para el diseño del prototipo están ligados directamente a los tipos de sensores que se puede utilizar dentro de la mina, y la aplicación dentro del modelo en el laboratorio. Para no obstruir con el movimiento del material dentro del modelo se solicitó los siguientes requerimientos por parte del laboratorio:

- El dispositivo de trazado no debe tener dimensiones superiores a 4 cm x 4 cm x 4 cm.
- La comunicación entre dispositivos debe ser inalámbrica.

El hardware necesario para la construcción del dispositivo de trazado se limita a los bloques funcionales que lo componen. Principalmente se requiere seleccionar: microcontrolador, sensor IMU, módulo de comunicación y antena. Dentro de la selección hay que considerar que se busca un prototipo que tenga bajo consumo energético, ya que los dispositivos serán utilizados durante tiempos prolongados en el yacimiento.

El candidato para microcontrolador del trazador debe cumplir con:

- Tener un bajo consumo energético para maximizar el tiempo de vida de la batería.

- Poseer temporizadores en tiempo real, para muestreo en tiempo discreto.
- Ser compatible con el sensor y el módulo de comunicación, es decir, poder comunicarse con ellos en tiempo real.

El último punto compromete compatibilidad de los protocolos de comunicación entre el microcontrolador y los demás bloques, los que normalmente utilizan los protocolos *inter-integrated circuit* (I<sup>2</sup>C), *serial perispherical interface* (SPI) o *universal asynchronous receiver/transmitter* (UART).

El sensor debe entregar la información suficiente para poder estimar las posiciones de los trazadores, y ser de tamaño pequeño para suplir las condiciones de dimensiones del circuito. Además de cumplir con las restricciones mencionadas en la sección anterior de este documento.

### 3.3. Diseño de trazadores

#### 3.3.1. Selección de componentes

La selección de componentes contempla principalmente tres grandes dispositivos. Estos se encuentran ligados con las funcionalidades de medición, comunicación y procesamiento de información. El resto de los componentes como conectores, resistencias, capacitores, entre otros, no se detalla en este documento; y su elección se realizó según recomendaciones de los fabricantes de los componentes principales.

Para el diseño de placas se comenzó seleccionando la unidad de medición inercial MPU-9150, fabricada por Invensense, actuando como el bloque de sensor del trazador. Este IMU contiene un sensor acelerómetro, magnetómetro y girócopo; de 3 ejes cada uno. Las especificaciones del circuito se muestran en las Tablas 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4. La elección de un circuito tipo MEMS como unidad de medición inercial del trazador se debe a las restricciones de espacio y recursos destinados al proyecto, siendo este tipo de circuitos la única opción viable.

El segundo elemento seleccionado es el transceptor CC2520, fabricado por Texas Instruments, compatible con el estándar 802.15.4. Sus especificaciones se muestran en la Tabla 7.5. La elección del transceptor fue arbitraria, y consideró que el estándar de comunicación es de bajo consumo energético. Además de tener un sistema de comunicación serial SPI, común en microcontroladores.

Para seleccionar el microcontrolador, se consideró que debe tener módulos SPI e I<sup>2</sup>C para poder comunicarse con el transceptor CC2520 y la unidad de medición MPU-9150 respectivamente. Además, tener temporizadores en tiempo real para *timestamps*, memoria RAM de al menos 512 B para el buffer del módulo de comunicación, bajo consumo energético y un reloj con velocidad ajustable para regular su potencia. Dado estas condiciones, se optó por

el modelo de microcontrolador MSP430F5437A, fabricado por Texas Instruments, cuyas especificaciones pueden ser vistas en la sección de anexos, en la Tabla 7.6.

### **3.3.2. Diseño final de placas**

El diseño de placas se realizó mediante el software EAGLE, de CadSoft. Este programa permite realizar esquemáticos de circuitos, para luego generar un archivo en el cual se re-agrupa la disposición física de las componentes del esquemático, y así obtener el diseño de la placa PCB. Dada las restricciones de tamaño del circuito, se decidió diseñar utilizando una pila de placas interconectadas entre sí en vez de solo una. Todas restringidas a un diámetro inferior a 4 cm (se puede ver sus dimensiones en la Figura 3.3).

Cada placa contempla distintas funciones descritas a continuación

- Placa superior o de comunicación: presenta todas las funcionalidades de comunicación.
- Placa intermedia o de medición y procesamiento: realiza el sensado y coordina los procesos de comunicación.
- Placa inferior o de alimentación: es quien supe la energía a las placas superiores.

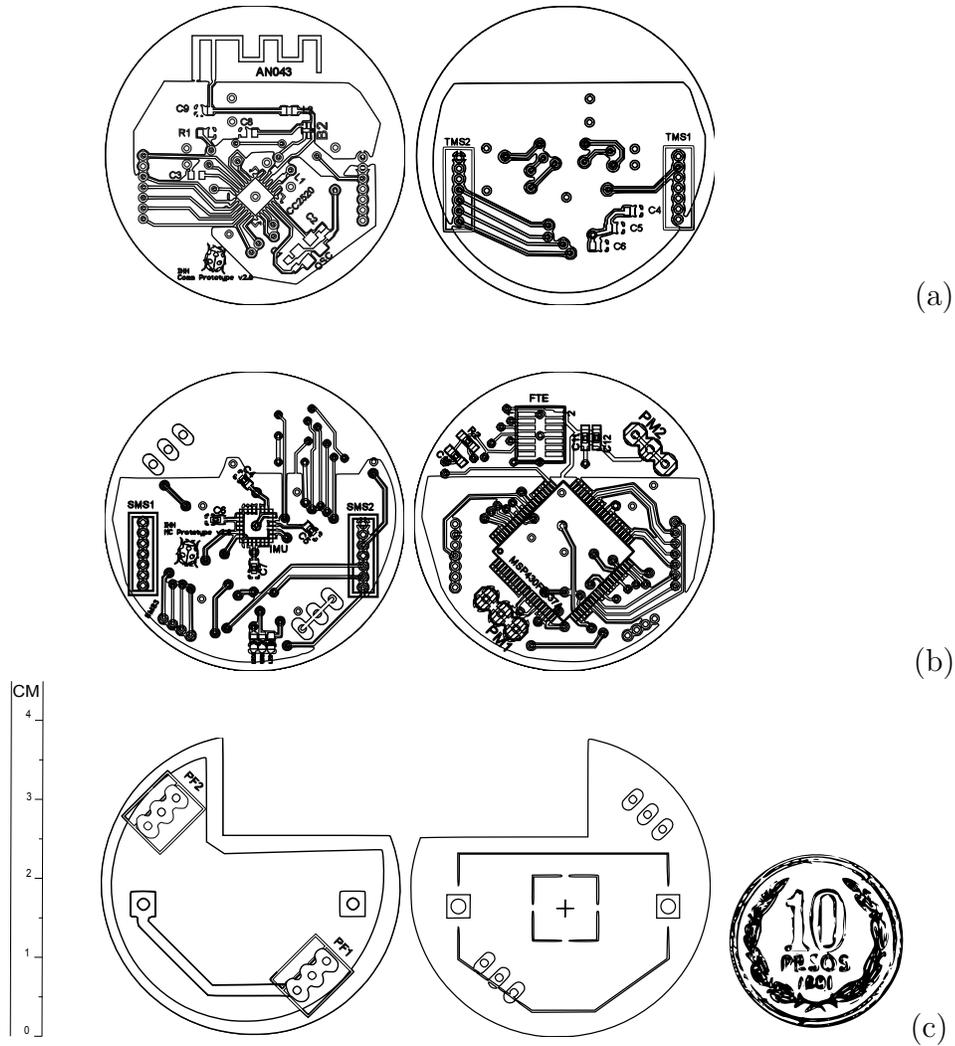


Figura 3.3: Placas de comunicación (a), medición y procesamiento (b), y alimentación (c).

## 3.4. Desarrollo de firmware

### 3.4.1. Programación de microcontrolador

El microcontrolador MSP430F54237A puede ser programado tanto en el lenguaje de programación *Assembly* como en C. Durante este trabajo se decidió programarlo en C, por su simplicidad de uso y abstracción de la arquitectura computacional del dispositivo. La configuración realizada al microcontrolador contempla la velocidad del reloj, configuración de módulos de comunicación y coordinación de procesos (cuando enviar la información y que procesar al momento de recibirla).

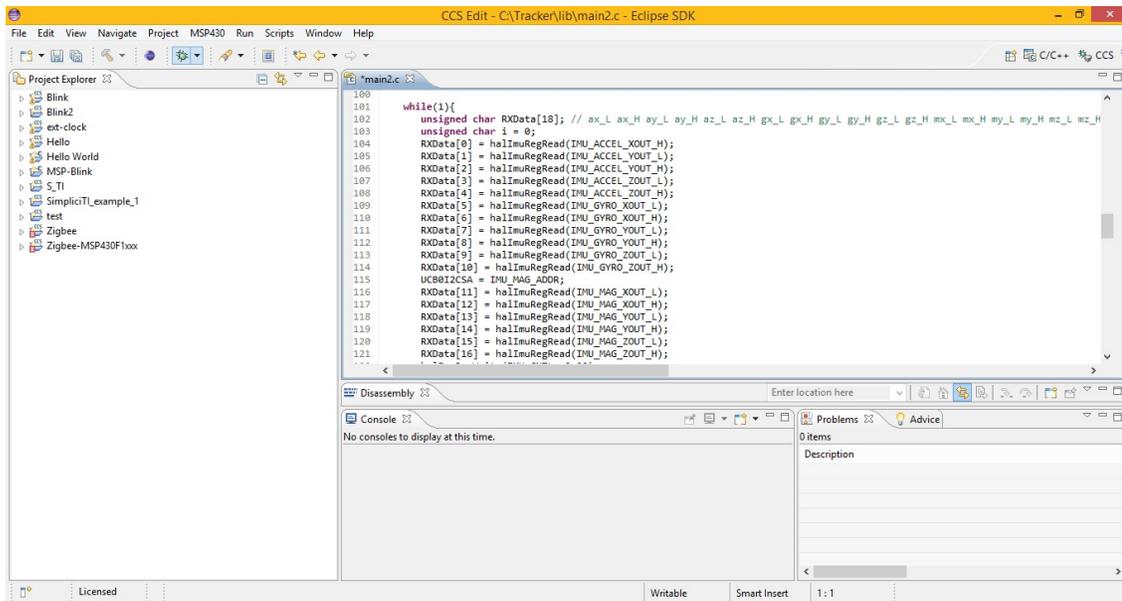


Figura 3.4: Software Code Composer Studio, utilizado para programar los dispositivos en lenguaje C.

La velocidad del reloj se mantuvo en 1 MHz, como viene por defecto. Al no estar utilizando el módulo de comunicación por el momento y considerando que el sensor IMU toma muestras a 1 kHz, esta velocidad resulta más que suficiente para el funcionamiento normal del sistema.

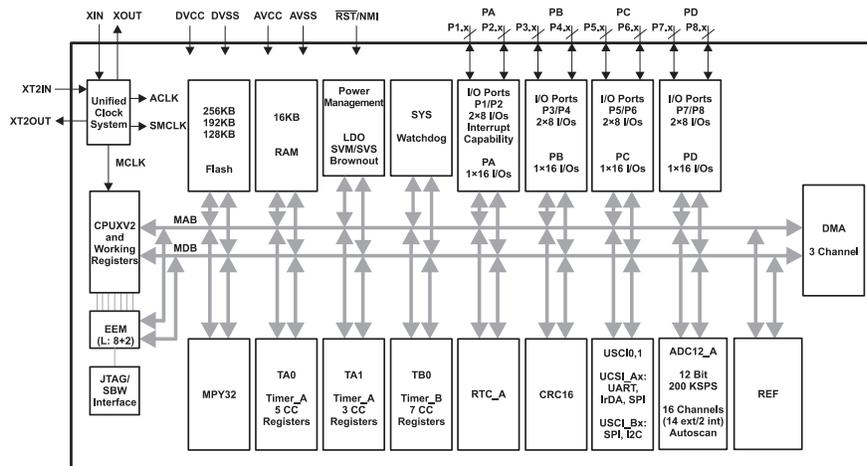


Figura 3.5: Microncontrolador MSP430F5437A y sus módulos funcionales.

### 3.4.1.1. Configuración de módulos de comunicación

El diseño del sistema consta con tres módulos de comunicación: SPI, I<sup>2</sup>C y UART. Los primeros dos protocolos de comunicación son utilizados cuando hay transferencia de datos con

el dispositivo CC2520 y MPU-9150, respectivamente. En cambio, el último fue añadido para comunicarse con un computador, como una alternativa de comunicación cuando no esté habilitada la comunicación inalámbrica; y se utiliza principalmente para comprobar el correcto funcionamiento del IMU.

La comunicación en todos los casos se programó de acuerdo a los diagramas de estados entregados por TI en la guía de programación para la familia de microcontroladores MSP430F5XXX/MSP430F6XXX [6], y los códigos de ejemplo dispuestos en su página web. En el caso de la comunicación UART y SPI los códigos fueron utilizados sin mayores modificaciones, bastando configurar algunos aspectos básicos según se describe en las hojas de datos de los dispositivos esclavos unidos al microcontrolador. La mayor dificultad estuvo en programar el dispositivo  $I^2C$ , ya que no existen códigos de ejemplo que no utilicen interrupciones, por tanto se tuvo que ver el diagrama de estados dispuesto en la Figura 7.1 para poder programar la comunicación.

#### **3.4.1.2. Procesamiento de datos**

El sistema de trazado de flujo de material requiere el traspaso de información de los sensores desde el IMU hasta la unidad de procesamiento. En esta primera etapa del proyecto, al no estar construido el módulo de comunicación, se entrega dicha información a un computador mediante comunicación UART. Para obtener correctamente los valores y no tener problemas de sincronización al momento de transmitir desde el dispositivo trazador al terminal se utiliza un prefijo y un sufijo en los datos enviados.

data	start	Ax_l	Ax_h	Ay_l	Ay_h	Az_l	Az_h	Mx_l	Mx_h	My_l	My_h	Mz_l	Mz_h	Gx_l	Gx_h	Gy_l	Gy_h	Gz_l	Gz_h	Ts_l	Ts_h	end	
bytes	0	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	28

start	Envía el string "start" codificado en ASCII
Ax_l	8 bit de menor significancia para la medición del acelerómetro en el eje x
Ax_h	8 bit de mayor significancia para la medición del acelerómetro en el eje x
Ay_l	8 bit de menor significancia para la medición del acelerómetro en el eje y
Ay_h	8 bit de mayor significancia para la medición del acelerómetro en el eje y
Az_l	8 bit de menor significancia para la medición del acelerómetro en el eje z
Az_h	8 bit de mayor significancia para la medición del acelerómetro en el eje z
Mx_l	8 bit de menor significancia para la medición del magnetómetro en el eje x
Mx_h	8 bit de mayor significancia para la medición del magnetómetro en el eje x
My_l	8 bit de menor significancia para la medición del magnetómetro en el eje y
My_h	8 bit de mayor significancia para la medición del magnetómetro en el eje y
Mz_l	8 bit de menor significancia para la medición del magnetómetro en el eje z
Mz_h	8 bit de mayor significancia para la medición del magnetómetro en el eje z
Gx_l	8 bit de menor significancia para la medición del giroscópio en el eje x
Gx_h	8 bit de mayor significancia para la medición del giroscópio en el eje x
Gy_l	8 bit de menor significancia para la medición del giroscópio en el eje y
Gy_h	8 bit de mayor significancia para la medición del giroscópio en el eje y
Gz_l	8 bit de menor significancia para la medición del giroscópio en el eje z
Gz_h	8 bit de mayor significancia para la medición del giroscópio en el eje z
Ts_l	8 bit de menor significancia para la medición del timestamp en el módulo RTC
Ts_h	8 bit de mayor significancia para la medición del timestamp en el módulo RTC
end	Envía el string "end" codificado en ASCII

Figura 3.6: Trama de información enviada mediante el protocolo de comunicación UART desde el trazador a un terminal

La trama de información enviada es la que se muestra en la Figura 3.6, en la que se agregó además de los datos entregados por el MPU-9150 un timestamp programado en el microcontrolador por medio de su módulo de reloj en tiempo real o *real time clock*, RTC. Estos datos son leídos en un computador mediante un puerto serial, los que posteriormente son procesados mediante el *software* MATLAB.

## 3.4.2. Configuración de sensor

### 3.4.2.1. Calibración de sensor

Los sensores por motivos de estrés mecánico en las placas, error de soldado o problemas de fábrica tienen un sesgo asociado a sus mediciones. Para eliminarlo se desarrollaron dos técnicas, dependiendo del tipo de sensor al que se aplicará la calibración. Se distingue dos clases de sensores dentro de la unidad MPU-9150, categorizados según sus medidas al encontrarse en reposo. El primer tipo es quien da medidas similares independiente de la posición en que se disponga, en esta categoría se encuentra el giróscopo. Los otros sensores, a diferencia del anterior, entregan valores distintos según su posicionamiento; que al graficarse tienen forma elipsoidal o esférica.

Para corregir el sesgo del gir6scopo se busc6 el valor esperado de sus mediciones en reposo, asumiendo un ruido aditivo blanco Gaussiano. Bajo el supuesto de esta distribuci6n, los valores esperados corresponden al sesgo del sensor; por lo que al restarlos a las medidas que se obtienen del sensor, este es calibrado.

Los aceler6metros y magnet6metros han sido calibrados mediante un m6todo basado en m6nimos cuadrados para minimizar el sesgo en sus mediciones. La Figura 3.7 muestra las mediciones del aceler6metro de un chip MPU-9150 en una de las placas construidas, donde se aprecia la forma elipsoidal que dibuja al tenerlo en reposo y cambiar su direccinamiento. En el caso del magnet6metro se percibe el mismo comportamiento.

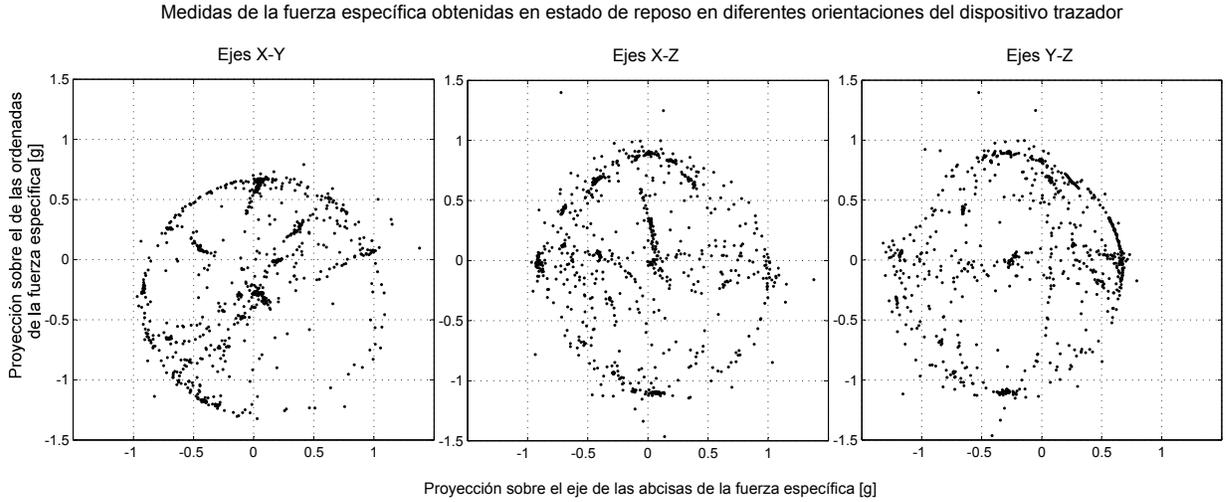


Figura 3.7: Medici6n de fuerza especfica en estado de reposo en distintas orientaciones de un sensor no calibrado.

El m6todo consiste en tomar  $N$  medidas del sensor en el marco referencial del cuerpo, formando el set de datos  $\{x_i\}_{i=1}^N$ ,  $\{y_i\}_{i=1}^N$  y  $\{z_i\}_{i=1}^N$ . Asumiendo que los datos forman una esfera de radio  $r$  centrada en las coordenadas  $(a, b, c)$ , entonces el minimizar la funci6n de error del radio al cuadrado es equivalente a la expresi6n

$$\text{m6n } \mathbb{E}\{(r^2 - \hat{r}^2)^2\} \Leftrightarrow \nabla_{(a,b,c,d)} \mathbb{E}\{(r^2 - \hat{r}^2)^2\} = 0$$

donde  $d = r^2 - a^2 - b^2 - c^2$ . Al definir  $h_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ , el resultado de la minimizaci6n es el mismo que el de el sistema de ecuaciones mostrado en la Ecuaci6n 3.1:

$$\begin{bmatrix} -2 \sum_{i=0}^N x_i^2 & -2 \sum_{i=0}^N x_i y_i & -2 \sum_{i=0}^N x_i z_i & \sum_{i=0}^N x_i \\ -2 \sum_{i=0}^N y_i x_i & -2 \sum_{i=0}^N y_i^2 & -2 \sum_{i=0}^N y_i z_i & \sum_{i=0}^N y_i \\ -2 \sum_{i=0}^N z_i x_i & -2 \sum_{i=0}^N z_i y_i & -2 \sum_{i=0}^N z_i^2 & \sum_{i=0}^N z_i \\ -2 \sum_{i=0}^N x_i & -2 \sum_{i=0}^N y_i & -2 \sum_{i=0}^N z_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{i=0}^N h_i^2 x_i \\ -\sum_{i=0}^N h_i^2 y_i \\ -\sum_{i=0}^N h_i^2 z_i \\ -\sum_{i=0}^N h_i^2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

## 3.5. Implementación

### 3.5.1. Construcción del dispositivo trazador

La construcción del dispositivo requirió soldar cada uno de sus componentes mediante soldadora de aire caliente u horno eléctrico. Las resistencias, conectores y componentes distintos a pastillas fueron soldados sin inconveniente mediante la soldadora de aire caliente, sin embargo las pastillas con paquetes del tipo QFN se tuvieron que soldar mediante equipos más sofisticados.

La alineación, exceso de soldadura o flux son factores importantes para el soldado correcto de dispositivos con paquetes QFN, por ello se utilizó la máquina de soldado *Estación Reballing Zhuo Mao ZM-R6200* del Laboratorio de Electrotecnologías del Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica de la Universidad de Chile. El equipo permite mezclar las imágenes tanto de la placa como de la pastilla a ser soldada, facilitando la alineación entre ambas para evitar posibles cortocircuitos en los *pads* de soldado.

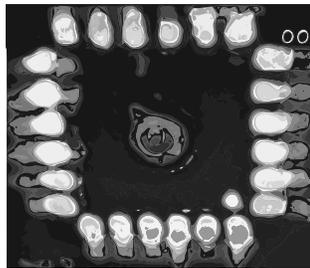


Figura 3.8: Alineación entre la placa y la pastilla a soldar.

En la Figura 3.8 se aprecia la alineación entre el sector de la placa de medición y procesamiento donde se dispone el IMU y la pastilla MPU-9150, donde la capa de soldadura en la placa tiene un color gris y la que se encuentra en la pastilla blanco. Esta imagen se capta mediante la cámara de la unidad de soldado, quien mezcla ambas imágenes por medio de un prisma, y las muestra en una pantalla.

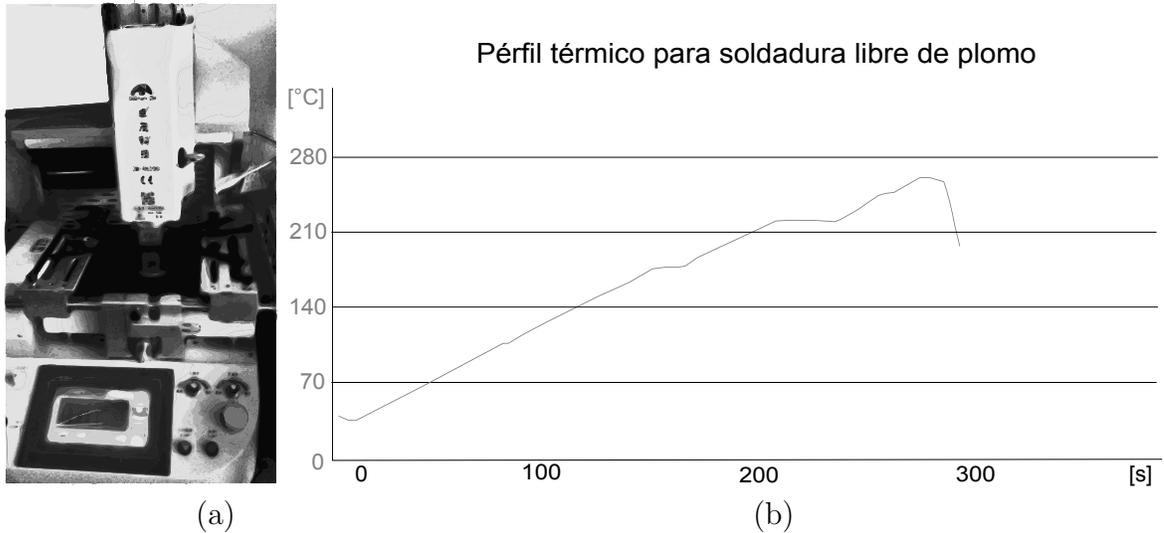


Figura 3.9: Equipo de soldado (a) y perfil térmico utilizado en el soldado del dispositivo MPU-9150 (b).

El dispositivo IMU al ser sensible al estrés mecánico requirió el uso de un perfil térmico dado por el fabricante para evitar las diferencias significativas entre la expansión térmica de la placa y la pastilla. Este perfil se encuentra determinado por la norma JEDEC J-STD-020D.01.



Figura 3.10: Prototipo trazador construido (nodo de seguimiento).

### 3.5.2. Instalación del *firmware* en el microcontrolador

La carga del programa principal del microcontrolador se realiza mediante un programador con entrada JTAG, que debido a su tamaño no fue añadido al diseño de la placa. En su defecto se agregó otro conector, el cual por medio de un adaptador se conecta a la entrada JTAG. El programador elegido es el JTAG-Tiny 2.0 de Olimex, y se utilizó en la versión gratuita del software *Code Composer Studio* 5.4.0 de Texas Instruments.

### 3.5.3. Pruebas básicas de funcionamiento

Para corroborar el correcto funcionamiento del dispositivo se procedió a realizar un *debugging*, o depuración, del programa principal ejecutado por el nodo de seguimiento. En primera instancia se utilizó un multímetro para ver si las salidas utilizadas del microcontrolador cambian acorde a la programación del circuito. Una vez corroborado esto, se comprobó la comunicación leyendo los registros de los *chips* conectados al respectivo módulo por analizar. En algunos casos se utilizó un osciloscopio para ver si la comunicación era correcta, esto en el caso de una placa de prueba que contiene el dispositivo CC2520, el cual se conecto a la placa central del trazador mediante cables; ya que la placa diseñada aún no estaba disponible.

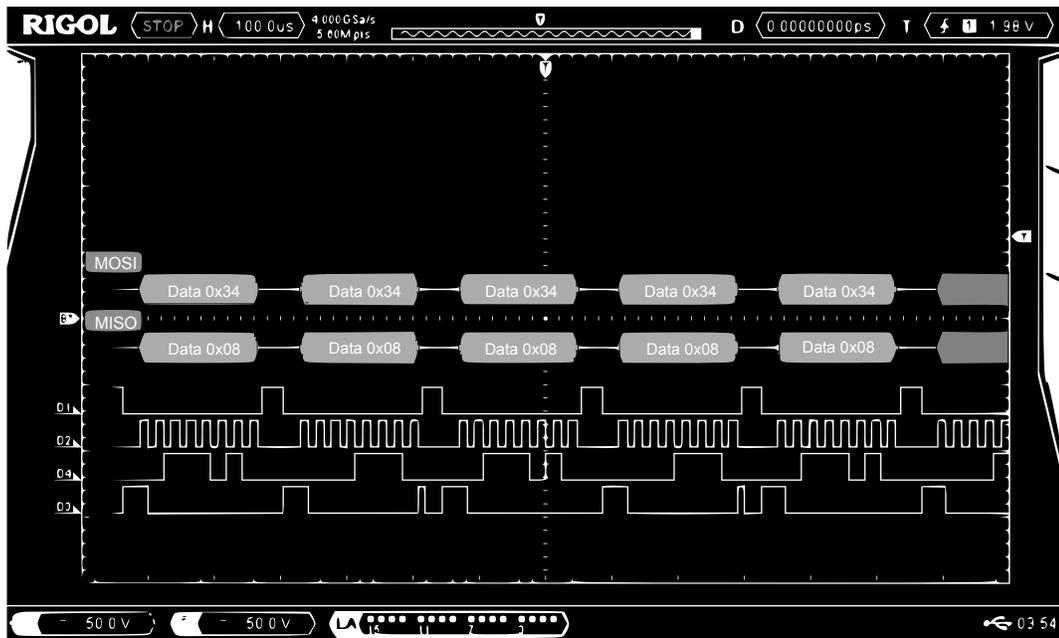


Figura 3.11: Comunicación SPI entre el microcontrolador y el *chip* CC2520.

# Capítulo 4

## Procedimiento experimental

A continuación se describen todos los procesos experimentales realizados para determinar los rangos de funcionamiento apropiados del sistema de trazado. Estos procedimientos se diseñaron para realizarse tanto fuera como dentro del modelo físico de laboratorio, dependiendo de los datos de interés por obtener.

### 4.1. Prueba de movimiento

Los resultados de sensado en pruebas de movimientos, en distintos ejes y planos del marco referencial del cuerpo, entregan información útil para determinar las condiciones en que pueden operar los dispositivos de trazado. En esta etapa preliminar, el módulo de comunicación no se encuentra completo debido a la falta de tiempo y problemas con el paquete del chip CC2520 en la placa, por lo cual los movimientos posibles a realizar son acotados por el cable que lo conecta a un computador.

Se pretende medir los errores asociados a distintos tipos de movimiento, dentro de los cuales se encuentran:

- Movimiento rectilíneo uniforme o de cuerpo en reposo.
- Movimiento no lineal arbitrario de rotación sobre un plano.

Es importante destacar que en las pruebas preliminares no existe corrección de datos más allá de filtrados simples para eliminar datos no representativos del proceso, denominados *outliers*.

### 4.1.1. Cuerpo en estado de reposo

Esta prueba tiene como objeto determinar el error aleatorio de medición y corroborar que el sensor se encuentre calibrado correctamente; en particular el sesgo. Para realizar las mediciones se debe fijar el sensor sobre una base inamovible, de forma de disminuir perturbaciones externas de movimiento.

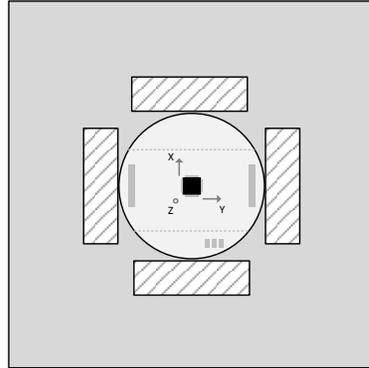


Figura 4.1: Dispositivo fijo en base inamovible.

Los datos a obtener son: medidas de fuerza específica, velocidad angular y posición del trazador según método de seguimiento por estima a lo largo del tiempo.

### 4.1.2. Movimiento en un plano en marco referencial del cuerpo

Una de las principales fuentes de error en el sensado de movimiento son producto de la falta de precisión al determinar la dirección en que se mueve el objeto. Esto se debe a que todos los cálculos de posición requieren la representación en el marco referencial de navegación y no en el del cuerpo. Por este motivo es importante corroborar que la medición de movimientos de rotación en los distintos planos coordenados funcionen correctamente.

Idealmente se pretendía realizar las pruebas de rotación según las configuraciones mostradas en la Figura 4.2. Sin embargo, por razones de facilidad de implementación, se realizará sólo las pruebas de rotación entorno al eje z del marco referencial del cuerpo. Estas pruebas contemplan medir la aceleración cuando hay una velocidad de rotación constante y la dirección del trazador en el marco de referencia de navegación dada rotaciones arbitrarias.

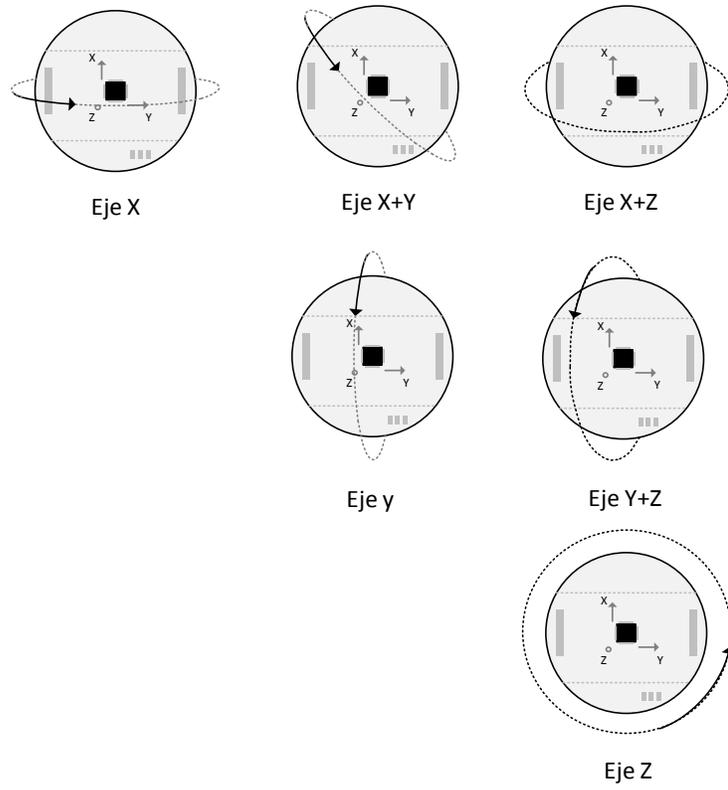


Figura 4.2: Configuraciones en prueba de rotación sobre ejes referenciales del cuerpo.

# Capítulo 5

## Análisis y resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de los procedimientos experimentales presentados en el capítulo anterior.

### 5.1. Cuerpo en estado de reposo

Los resultados de las mediciones al dejar el sensor en una posición arbitraria en estado de reposo para cada uno de los sensores son los siguientes:

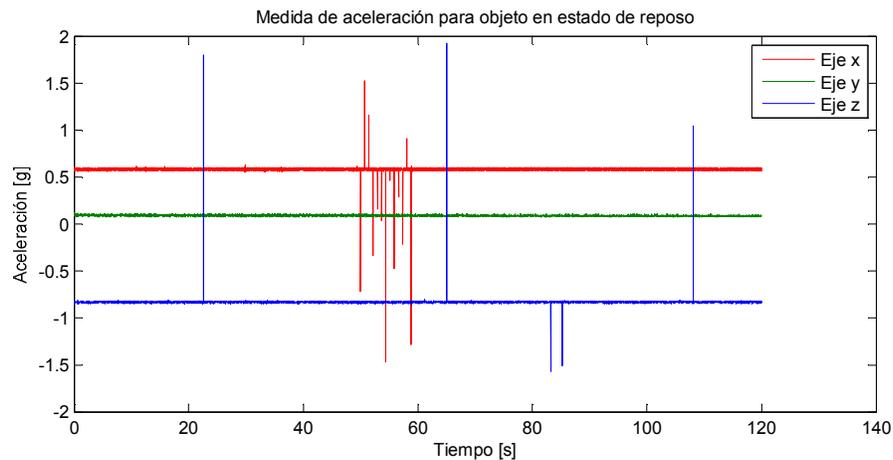


Figura 5.1: Resultados de acelerómetro en prueba de cuerpo en estado de reposo

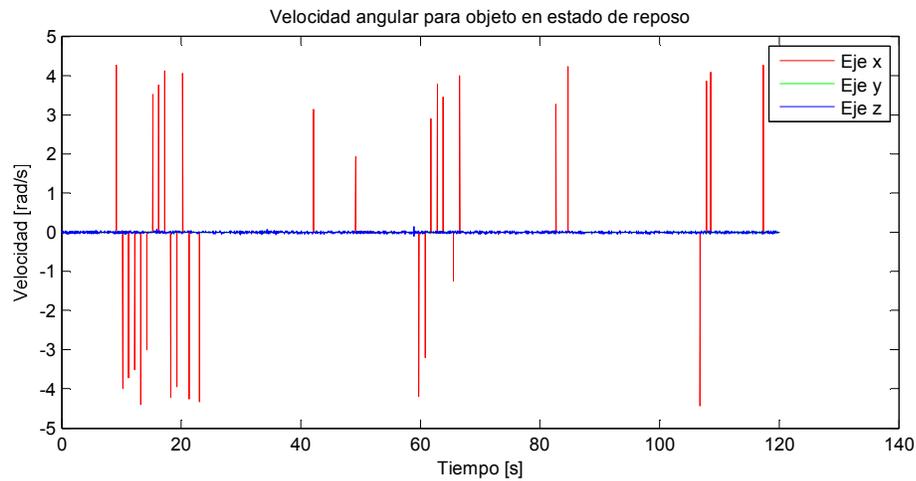


Figura 5.2: Resultados de giróscopo en prueba de cuerpo en estado de reposo

Por medio del método de seguimiento DR con estos datos, se obtiene el siguiente resultado:

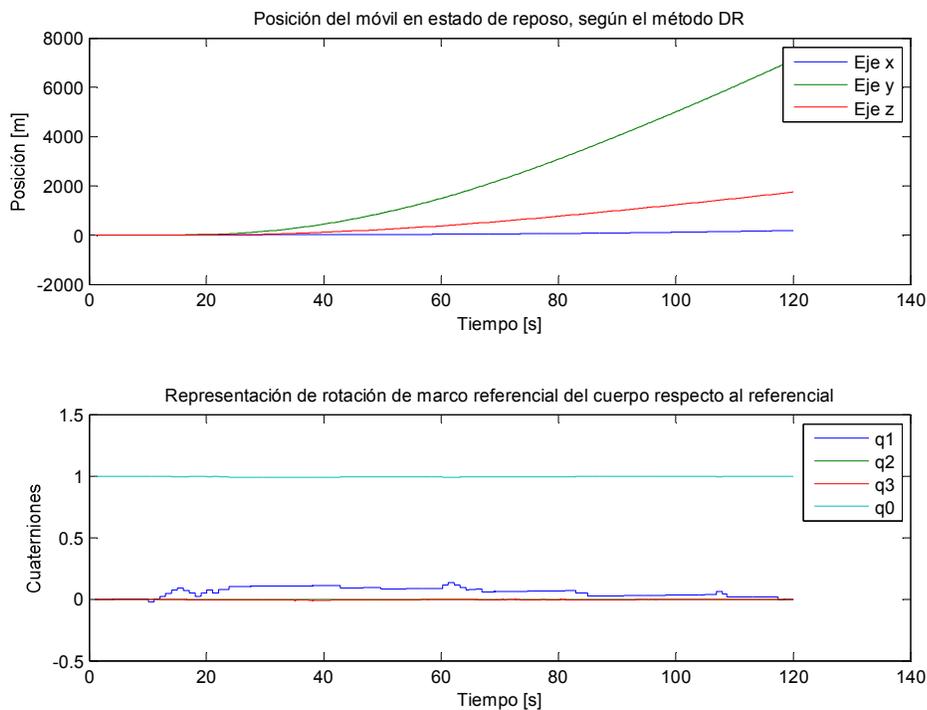


Figura 5.3: Resultados de posicionamiento del móvil con datos en estado de reposo en bruto

De las Figuras 5.1, 5.8, 5.3 se observa que los resultados traen consigo un gran error, debido en parte a los *outliers* en las mediciones, y el sesgo en la velocidad angular producto de estos mismos.

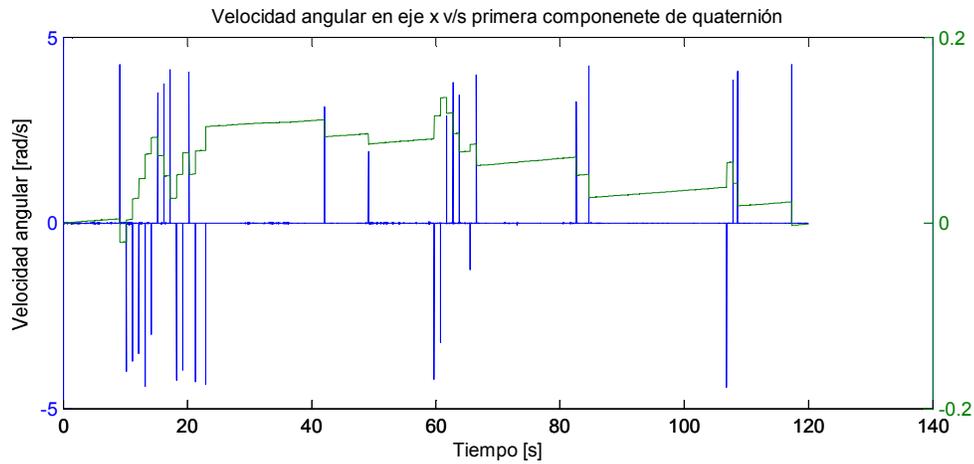


Figura 5.4: Efecto de outliers sobre rotación medida del móvil

Considerando que los movimientos en la aplicación donde se utilizará el dispositivo no son bruscos y que la toma de muestras obtenidas por los sensores tienen una frecuencia de 85 Hz aproximadamente, se determinó de forma empírica, que dentro de 10 muestras no hay un cambio significativo en el movimiento; mediante ensayo y error. De manera que un *outlier* se percibe si supera en cierto umbral el promedio de las muestras contiguas a él.

Para eliminar el dato *outlier*, se verificó que se cumpla la condición del umbral nombrada con anterioridad y se aplicó un filtro de mediana con un tamaño de bloque igual a tres elementos, como viene por defecto programado en MATLAB. Los resultados de los datos tomados luego del procesamiento son los siguientes:

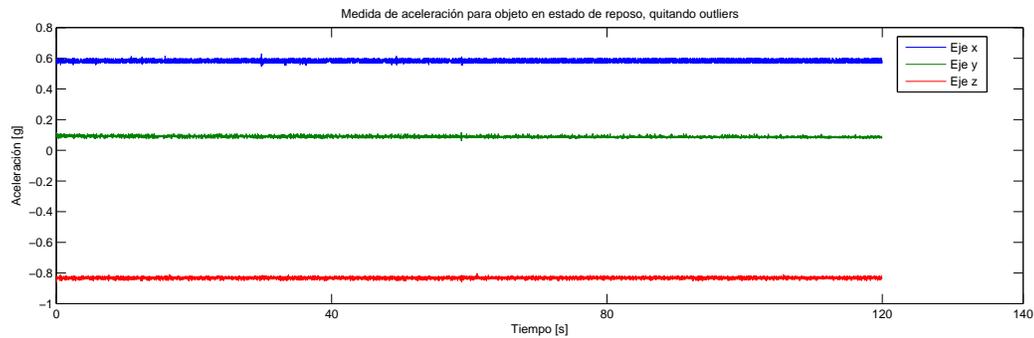


Figura 5.5: Resultados de acelerómetro con datos filtrados

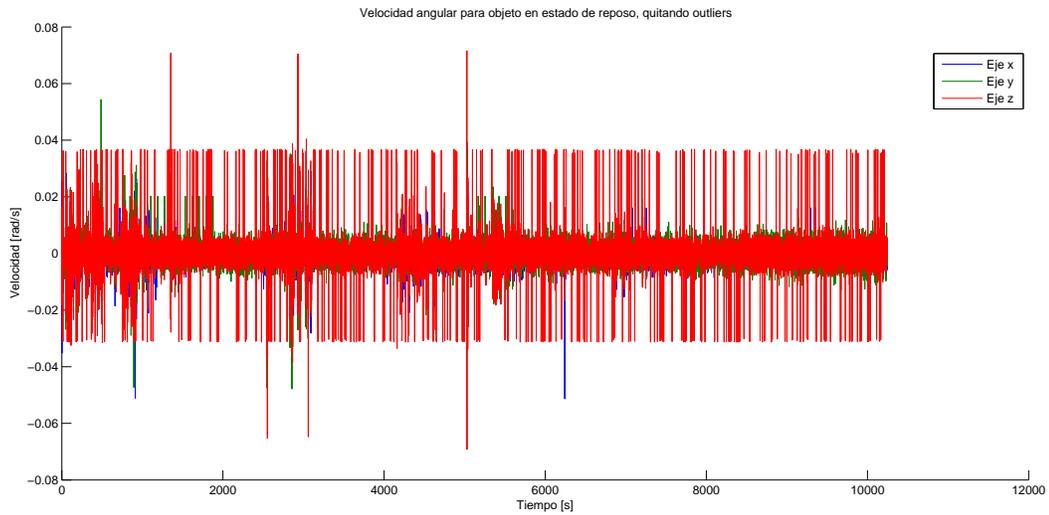


Figura 5.6: Resultados de gir6scopo con datos filtrados

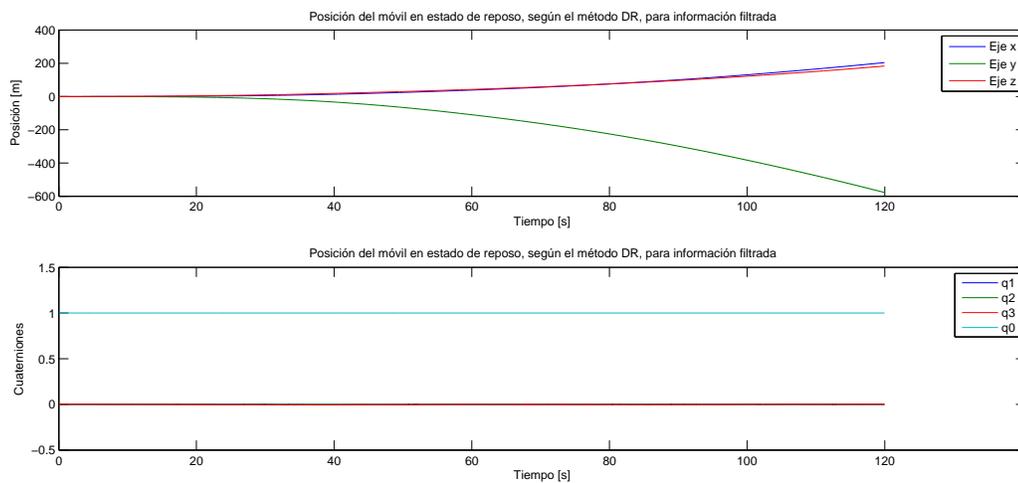


Figura 5.7: Resultados de posicionamiento del m6vil con datos filtrados

Utilizando los datos filtrados de las Figuras 5.5 y 5.6, el error luego de dos minutos para el mismo set de mediciones disminuye alrededor de 13 veces respecto a los datos brutos. Como 6ltima prueba para el m6vil en estado de reposo, se consider6 10 mediciones de aproximadamente 11 segundos cada una, en las que se calcul6 su posici6n en cada eje utilizando el mismo m6todo que para las mediciones anteriores, como se ve en la Figura 5.7.

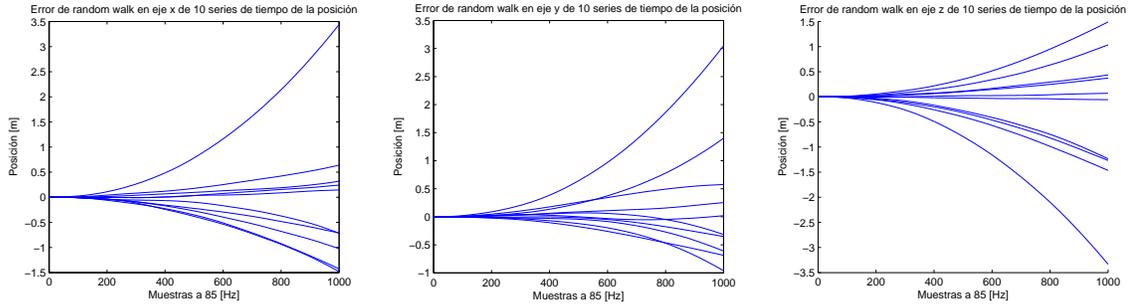


Figura 5.8: Resultados de posicionamiento del móvil para distintas realizaciones

### 5.1.1. Movimiento en un plano en marco referencial del cuerpo

La primera prueba de movimiento realizada fue el giro en torno al eje z del marco referencial del cuerpo a velocidad angular constante. Los resultados luego de quitar los datos *outliers* son los observados en la Figura 5.9:

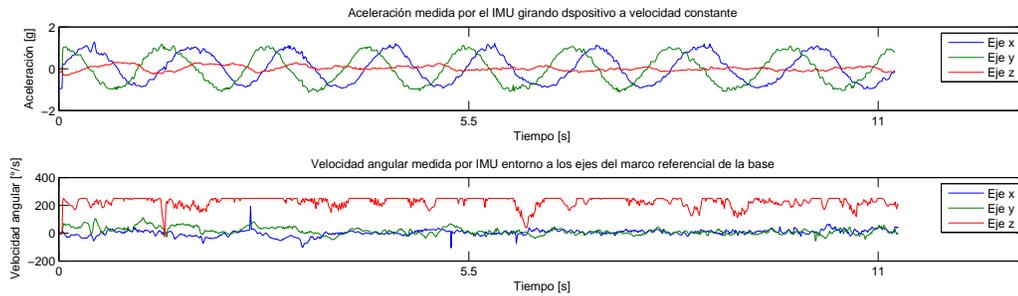


Figura 5.9: Resultados de acelerómetro y giróscopo para rotación a velocidad angular constante en torno al eje z del marco referencial del cuerpo

La velocidad constante en la Figura 5.9 fue obtenida manualmente, con problemas asociados a la interferencia en el movimiento producto del cable que conecta el dispositivo al computador. La velocidad de giro supera los 260 grados por segundo, y dado que la sensibilidad del dispositivo es de 250 grados por segundo, es posible apreciar la saturación en la velocidad angular.

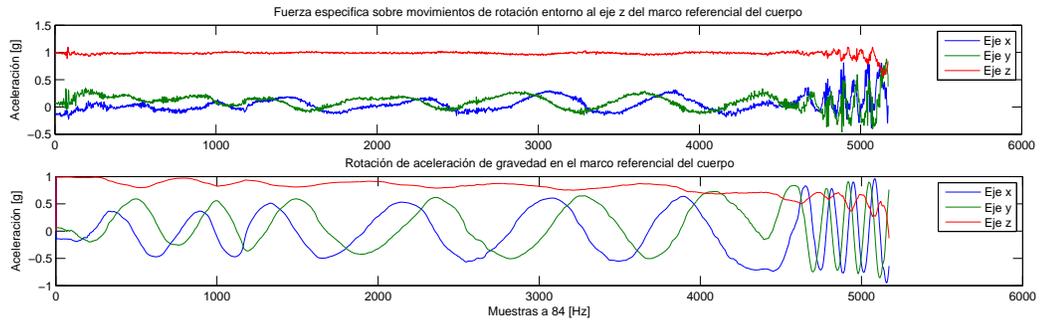


Figura 5.10: Resultados de acelerómetro y direccionamiento para rotaciones arbitrarias entorno al eje z del marco referencial del cuerpo

La segunda prueba contempló giros en dirección antihoraria por aproximadamente 50 segundos y el resto giros en dirección horaria a una velocidad angular promedio superior. Al igual que en la primera prueba el proceso se realizó con los mismos impedimentos. Los resultados presentados muestran como el dispositivo es capaz de medir la dirección del dispositivo de trazado, presentados en la Figura 5.10.

# Capítulo 6

## Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

La construcción del diseño del sistema trazador fue exitosa, cumpliendo las funcionalidades planteadas en su totalidad. No hubo problemas en los módulos de comunicación, comunicándose correctamente con los dispositivos MPU-9150, CC2520 y PC. Durante su implementación física, los procesos de soldado de paquetes QFN no tuvieron inconvenientes luego de utilizarse la Estación Reballing Zhuo Mao ZM-R6200 para alinear sus pads con los de la placa, lo que facilita enormemente la construcción de nuevas placas para futuros usos.

En base a los resultados obtenidos en el capítulo quinto se puede observar que los errores en las mediciones tienen un alto impacto en el cálculo de la posición mediante el método de seguimiento por estima. La eliminación de datos no representativos y preprocesamiento de filtrado básico puede mejorar el desempeño del estimador de posición. Sin embargo, se debe tener cuidado con los posibles sesgos que estos pueden agregar a las medidas; dadas componentes DC añadidas por el filtrado. Por lo tanto, los procesos de calibración como preprocesamiento de datos, resultan fundamentales para disminuir sustancialmente los errores.

Durante las pruebas, el sistema se mostró sensible a cambios de variables como la gravedad, direccionamiento y perturbaciones. La sintonización de los factores de escala de los sensores resulta fundamental para mejorar las medidas. Sin embargo, se requiere de algún sensor de referencia para hacerlo. Por este motivo, en este trabajo de título no se pudo realizar dicha labor. No obstante, los valores de los factores de escala resultaron ser satisfactorios para las pruebas realizadas.

Las pruebas de rotación muestran un seguimiento adecuado de la dirección del marco referencial del cuerpo respecto al de navegación. Si bien en la Figura 5.10 los valores de las rotaciones de la gravedad no coinciden del todo con los valores medidos por el acelerómetro, esto se explica porque existen términos asociados a la dinámica de movimiento que se encuentran añadidos a la fuerza específica distintas a las de la gravedad.

## 6.2. Trabajos futuros

Quedan bastantes trabajos futuros que quedan bastantes por realizar. En particular, mejorar en los siguientes temas: sistema de corrección de errores, sistema de comunicación inalámbrico y encapsulamiento mecánico del dispositivo.

Se recomienda utilizar filtros Bayesianos para la corrección de los datos obtenidos por el sensor y detección de estados de reposo, esto mejoraría drásticamente las medidas de posición. También tener en consideración las restricciones que tiene la evolución del sistema, y agregarlas a la corrección de datos. De esta forma se espera mejorar la precisión del trazador y permitir el funcionamiento del sistema por un tiempo más prolongado.

El sistema de comunicación a implementar en el dispositivo final, según el juicio del autor, debe tener la mayor penetración posible en el medio rocoso de manera que recorra distancias mayores. Téngase en consideración que se debe tener una tasa de transmisión mínima requerida para transmitir los datos suficientes de un dispositivo a otro.

En cuanto a la protección mecánica de la electrónica, es necesario mantener encapsulado los circuitos del trazador; aislándolos del medio. A la vez se requiere considerar que se debe poder comunicar al exterior por medio de ondas de radio esto implica diseñar un encapsulado que resista las grandes presiones que hay dentro del yacimiento y su material de construcción sea un buen dieléctrico, de forma que las pérdidas radioeléctricas sean menores.

# Bibliografía

- [1] D.S. Whiteman, *The Smart Marker system - A new tool for measuring underground ore body flow in block and sub-level mines*, Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australia, p. 604, 2010.
- [2] Angelo M. Sabatini, *Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing*, IEEE Transactions on biomedical engineering, 2006.
- [3] Robert M. Rogers, *Applied mathematics in integrated navigation systems*, 2da edición, Blacksburg, 2003.
- [4] David H. Titterton y John L. Weston, *Strapdown inertial navigation technology*, 2da edición, 2004.
- [5] Mobider S. Grewgal, Lawrence R. Weill y Angus P. Andrews, *Global positioning systems, inertial navigation and integration*, 2da edición, 2007.
- [6] *MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User Guide (SLAU208)*, Texas Instruments, 2013.

# Anexos

## Especificaciones técnicas de pastillas utilizadas en diseño de dispositivo trazador

Tabla .1: Especificaciones giróscopo, MPU-9150

Parámetro	Condiciones	Min	Típico	Máx	Unidades
<b>Sensibilidad</b>					
Rangos de escala completa			±250		°/s
			±500		°/s
			±1000		°/s
			±2000		°/s
Largo de palabra del CAD			16		bits
No linealidad	Más lineal a 25°C		0,2		%
Sensibilidad entre ejes			±2		%
Respuesta a rotación cero	de-40°C a 80°C		±20		°/s
<b>Desempeño de ruido</b>					
Ruido total RMS			0,06		°/s-rms
Tasa de densidad espectral de ruido	a 10Hz		0,05		°/s/√Hz
<b>Frecuencias mecánicas</b>					
Eje X		30	33	36	kHz
Eje Y		27	30	33	kHz
Eje Z		24	27	30	kHz

Tabla .2: Especificaciones acelerómetro, MPU-9150

Parámetro	Condiciones	Min	Típico	Máx	Unidades
<b>Sensibilidad</b>					
Rangos de escala completa			±2		g
			±4		g
			±8		g
			±16		g
Largo de palabra del CAD			16		bits
Tolerancia de calibración inicial			±3		%
No linealidad	Más lineal a 25°C		0,5		%
Cambios de sensibilidad	rango 2g, de -40°C a 80°C		±0,02		%/°C
<b>Desempeño de ruido</b>					
Densidad espectral de potencia	X, Y y Z @ 10 Hz		400		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Ruido RMS total	rango 2g @ 100 Hz		4		mg-rms

Tabla .3: Especificaciones magnetómetro, MPU-9150

Parámetro	Condiciones	Min	Típico	Máx	Unidades
<b>Sensibilidad</b>					
Rango de escala completa			±1200		$\mu\text{T}$
Largo de palabra del CAD			13		bits
<b>Salida campo nulo</b>					
Tolerancia a calibración inicial		-1000		1000	LSB

Tabla .4: Especificaciones eléctricas, MPU-9150

Parámetro	Condiciones	Min	Típico	Máx	Unidades
Voltaje de alimentación (VDD)		2.375		3.465	V
Voltaje de referencia (VLOGIC)		1.71		VDD	V
Corriente de operación	Encendidos acelerómetro giroscópio y magnetómetro		4.25		mA
Rango de temperatura		-40		80	°C
<b>Interface serial</b>					
I <sup>2</sup> C		100		400	kHz

Tabla .5: Especificaciones generales, CC2520

Parámetro	Condiciones	Min	Típico	Máx	Unidades
<b>Rangos de máximos absolutos</b>					
Voltaje de alimentación	Cualquiera	-0.3		3.9	V
Voltaje en pin digital	Cualquiera	-0.3		VDD + 0.3 (máx 3.9)	V
Temperatura de guardado		-50		150	°C
Soldadura por refusión				260	°C
Nivel de entrada RF				10	dBm
<b>Rangos de operación</b>					
Voltaje de alimentación		1.8		3.8	V
Temperatura ambiente		-45		125	°C
<b>Protocolo de comunicación</b>					
802.15.4 / Zigbee					
<b>Interface serial</b>					
SPI y pines GPIO				8	GHz

Tabla .6: Especificaciones generales, MSP430F5437A

Parámetro	Condiciones	Min	Típico	Máx	Unidades
Voltaje de alimentación (VDD)		1.8		3.6	V
Frecuencias de operación		0.0032		32	MHz
Módulos USART	SPI, I <sup>2</sup> C y UART	0.0032		32	MHz

# Diagrama de funcionamiento de módulo de comunicación SPI

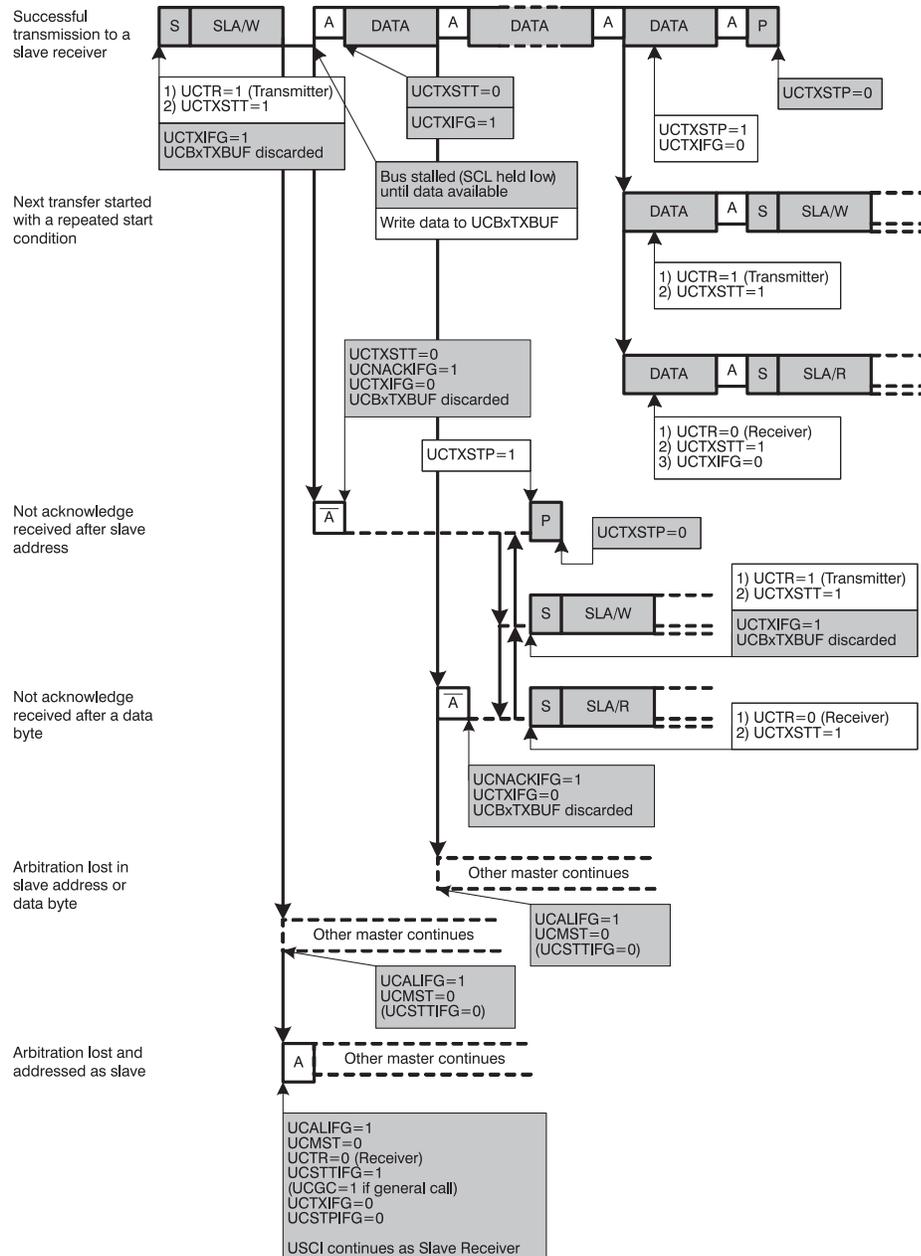


Figura .1: Diagrama de funcionamiento de módulo SPI en microcontrolador MSP430.

# Código MATLAB usado para calcular método de seguimiento por estima

```
function [r, qs, err] = position(r0, v0, q0, accel, gyro, time)
    if(length(accel)==length(gyro))
        r = r0;
        v = v0;
        err = [1 0 0];
        qs(1,:) = q0;
        g = -mean(accel(1:5,:))';
        for i=2:length(accel(:,1))
            qs(i,:) = nqau(qs(i-1,:), gyro(i-1,:), time(i-1));
            err(i,:)=-DCM(qs(i,:))*g;
            v(i,:)=v(i-1,:)+(time(i-1)*9.8*(DCM(qs(i,:))'*accel(i-1,:)'*g))';
            r(i,:)=r(i-1,:)+time(i-1)*v(i-1,:)+
            (time(i-1)^2/2*9.8*(DCM(qs(i,:))'*accel(i-1,:)'*g))';
        end
    end
end

function omega = DCM(q)
    omega = 1/norm(q)*[q(4)^2+q(1)^2-q(2)^2-q(3)^2 2*(q(1)*q(2)+q(4)*q(3))
        2*(q(1)*q(3)-q(4)*q(2));2*(q(1)*q(2)-q(4)*q(3)) q(4)^2-q(1)^2+q(2)^2-q(3)^2
        2*(q(2)*q(3)+q(4)*q(1)); 2*(q(1)*q(3)+q(4)*q(2)) 2*(q(2)*q(3)-q(4)*q(1))
        q(4)^2-q(1)^2-q(2)^2+q(3)^2];
end

function q = nqau(pqua, gyro, time)
    q = pqua*expm(0.5*time*[0 gyro(3) -gyro(2) gyro(1);
        -gyro(3) 0 gyro(1) gyro(2);
        gyro(2) -gyro(1) 0 gyro(3);
        -gyro(1) -gyro(2) -gyro(3) 0]);
end
```