

# 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