

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SENSORES TIPO SONDA
DE BAJO COSTO QUE BRINDE INFORMACIÓN RELEVANTE PARA
MONITOREO DE DESLIZAMIENTO DE MASAS DE TIERRA”**



ANDRES FELIPE SALAMANCA ROJAS

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
POPAYÁN, NOVIEMBRE 2016**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SENSORES TIPO SONDA
DE BAJO COSTO QUE BRINDE INFORMACIÓN RELEVANTE PARA
MONITOREO DE DESLIZAMIENTO DE MASAS DE TIERRA”**



Andrés Felipe Salamanca Rojas

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero en Electrónica

Director

Ing. Yamir Hernando Bolaños Muñoz

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
POPAYÁN, NOVIEMBRE 2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Popayán 2017

El director y los jurados del trabajo de grado en modalidad trabajo de investigación denominado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SENSORES TIPO SONDA DE BAJO COSTO QUE BRINDE INFORMACIÓN RELEVANTE PARA MONITOREO DE DESLIZAMIENTO DE MASAS DE TIERRA”, realizado por el estudiante Felipe Salamanca, una vez revisado el informe final y aprobado la sustentación del mismo autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar por el título profesional de Ingeniería Electrónica.

Juan Pablo Diago Rodríguez

Jurado Evaluador

John Robert Muñoz Chavez

Jurado Evaluador

Yamir Hernando Bolaños Muñoz
Director

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

Tabla de contenido

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPITULO 1	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.1.1. Pregunta de investigación.	4
1.2. Justificación.....	4
1.3. Objetivos.	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
CAPITULO 2	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes.....	7
2.2. Bases teóricas	14
2.2.1. Taludes.....	14
2.2.2. Sensores de inclinación.....	18
2.3. Representación matemática de la orientación	21
2.3.1. Medición de ángulo de inclinación con acelerómetro	22
2.3.2. Medición de ángulo de inclinación con giroscopio.....	24
2.4. Filtro de Kalman	25
2.4.1. Filtro de Kalman Discreto	26
2.5. Matriz de cosenos directores	30
2.5.1. Matriz de rotación con señal de giroscopio.....	32
2.5.2. Renormalización	33

2.6. Medición de ángulos de inclinación y filtro de Kalman	35
CAPÍTULO 3	37
IMPLEMENTACIÓN HARDWARE DEL SISTEMA.....	37
3.1. Selección de dispositivos	38
3.1.1. Selección de dispositivos de nodos esclavo	38
3.1.2. Selección de dispositivos de nodo maestro	50
3.2. Diseño electrónico.....	51
3.2.1. Diseño electrónico de nodos esclavo	52
3.2.2. Diseño electrónico de nodo maestro	52
CAPÍTULO 4	54
IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE DEL SISTEMA	54
4.1. Proceso de comunicación	54
4.2. Implementación filtro de Kalman	56
4.3. Implementación software de nodos esclavo.....	60
4.4. Implementación software de nodo maestro.....	61
4.5. Implementación firmware de adquisición de datos.....	64
4.6. Implementación software interfaz gráfica de usuario	65
CAPÍTULO 5	68
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	68
5.1. Caracterización de sensores de inclinación IMU-9250.....	68
5.1.1. Procedimiento de caracterización de sensores MPU-9250	68
5.1.2. Caracterización IMU#1	69
5.1.3. Caracterización IMU#2	71
5.1.4. Caracterización IMU#3	72
5.1.5. Caracterización IMU#4	73

5.1.6. Prueba de caracterización con algoritmo de Kalman.....	75
5.2. Prueba para obtención de ángulos Pitch Roll Yaw	82
5.3. Pruebas de laboratorio con la red de sensores	85
5.3.1. Procedimiento para pruebas en laboratorio	85
5.3.2. Resultados prueba en laboratorio #1	87
5.3.3. Resultados prueba en laboratorio #2.....	89
5.3.4. Resultados prueba en laboratorio #3.....	91
CAPÍTULO 6	94
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	94
6.1. Conclusiones.....	94
6.2. Trabajos futuros	95
BIBLIOGRAFÍA	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Digital MEMS Inclinometer System. Fuente: [8]	8
Figura 2. DIS-500 inclinometer Digital Inclinometer System. Fuente: [9]	9
Figura 3. Inclinómetro OG310S. Fuente: [10].....	10
Figura 4. Sensor inclinómetro y sistema de alimentación. Fuente: [11]	11
Figura 5. GK-604D Sistema de inclinación digital de Geokon Fuente: [12].....	12
Figura 6. Sistema inclinómetro clásico Digitilt. Fuente [13]	13
Figura 7. Clasificación de taludes según su origen. Fuente [4]	15
Figura 8. Nomenclatura de taludes y laderas. Fuente [4].	16
Figura 9. Nomenclatura de un deslizamiento. Fuente [4]	18
Figura 10. Sensor de inclinación capacitivo. Fuente [16]	19
Figura 11. Inclinómetro MEMS. Fuente [16].	20
Figura 13. Inclinómetro biaxial DMG2. Fuente [16].	20
Figura 14. Inclinómetro de referencia inercial IMU. Fuente [16].....	21
Figura 15. Principio de medida de inclinación. Fuente [14].	23
Figura 16. Diagrama en bloques red de sensores. Fuente propia.....	37
Figura 17. Diagrama en bloques nodo esclavo. Fuente propia.	39
Figura 18. MPU-9052. Fuente [22].	40
Figura 19. Sensor IMU SparkFun 9 Degrees of Freedom - Sensor Stick. Fuente: [23]	41
Figura 20. MPU- LSM9DS1. Fuente: [25].	41
Figura 21. Tarjeta de desarrollo Arduino Nano. Fuente [30]	46
Figura 22. Tarjeta de desarrollo Arduino Pro Mini. Fuente: [32]	47
Figura 23. Tarjeta de programación FTDI SmartBasic de Sparkfun. Fuente: [32].	47
Figura 24. Tarjeta de desarrollo Arduino Pro Micro. Fuente: [34].	48
Figura 25. Diagrama en bloques nodo maestro. Fuente propia.	51
Figura 26. Diseño esquemático de tarjeta electrónica de nodos esclavo. Fuente propia	52
Figura 27. Diseño esquemático de tarjeta electrónica de nodo maestro. Fuente propia	53
Figura 28. Diagrama de flujo firmware de nodos esclavo. Fuente propia.....	61

Figura 29. Diagrama de flujo firmware de nodo maestro. Fuente propia.....	63
Figura 30. Diagrama de flujo firmware de adquisición de datos para caracterización de IMU. Fuente propia.....	64
Figura 31. Interfaz gráfica de usuario. Fuente propia.....	65
Figura 32. Panel de programación. Fuente propia	66
Figura 33. Montaje para para caracterización de IMU-9250. Fuente propia	69
Figura 34. Grafica de aceleración de IMU #1. Fuente propia.....	70
Figura 35. Grafica de giro de IMU #1. Fuente propia.	71
Figura 36. Grafica de aceleración de IMU #2. Fuente propia.....	71
Figura 37. Grafica de giro de IMU#2. Fuente propia.	72
Figura 38. Grafica de aceleración de IMU #3. Fuente propia.....	73
Figura 39. Grafica de giro de IMU#3. Fuente propia.	73
Figura 40. Grafica de aceleración de IMU #4. Fuente propia.....	74
Figura 41. Grafica de giro de IMU #4. Fuente propia.	74
Figura 42. Filtro de Kalman aplicado a la aceleración sobre eje x IMU1. Fuente propia	76
Figura 43. Comparación entre las aceleraciones X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman para la IMU#1. Fuente propia.....	76
Figura 44. Comparación entre los giroscopios X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#1. Fuente propia.....	77
Figura 45. Comparación entre las aceleraciones X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#2. Fuente propia.....	78
Figura 46. Comparación entre los giroscopios X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#2.....	78
Figura 47. Comparación entre las aceleraciones X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#3. Fuente propia.....	79
Figura 48. Comparación entre los giroscopios X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#3. Fuente propia.....	80
Figura 49. Comparación entre las aceleraciones X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#4. . Fuente propia.....	81

Figura 50. Comparación entre las aceleraciones X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#4. . Fuente propia.....	81
Figura 51. Ángulos de IMU#1 frente a una trayectoria aleatoria. Fuente propia. ..	83
Figura 52. Ángulos de la IMU#2 frente a una trayectoria aleatoria. Fuente propia.	83
Figura 53. Ángulos de la IMU# 3 frente a una trayectoria aleatoria. Fuente propia.	84
Figura 54. Ángulos de la IMU#4 frente a una trayectoria aleatoria. Fuente propia.	85
Figura 55. Disposición de red de sensores para movimientos aleatorios. Fuente propia	87
Figura 56. Disposición de los sensores. Fuente propia.....	88
Figura 57. Datos obtenidos en prueba de laboratorio #1. Fuede propia	89
Figura 58. Respuesta de la red de sensores a una estimulo aleatorio. Fuente propia.	90
Figura 59. Disposición de los sensores para la prueba. Fuente propia.....	92
Figura 60. Datos obtenidos por los sensores sobre el plano de inclinación. Fuente propia.	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aportes de trabajos relacionados de sección antecedentes.....	13
Tabla 2. Características principales de buses de comunicación.	44
Tabla 3. Características de tarjeta de desarrollo Arduino Nano	46
Tabla 4. Características de tarjeta de desarrollo Arduino Pro Mini.....	47
Tabla 5. Características de tarjeta de desarrollo Arduino Pro Micro.	48
Tabla 6. Tabla de comparación de tarjetas de desarrollo Arduino.	49
Tabla 7. Estructura de trama de comunicación	54
Tabla 8. Códigos para identificar nodos esclavo de la sonda de inclinación.	55
Tabla 9. Materiales para caracterización de sensores de medida de referencia inercial.....	68
Tabla 10. Materiales para caracterización de sensores de medida de referencia inercial.....	86

RESUMEN

En el presente documento se plantea la investigación, diseño y desarrollo tanto a nivel hardware como a nivel software de una red de sensores de bajo costo que brinde información relevante para el monitoreo de posibles deslizamientos de masas de tierra. A lo largo del documento se presentan los procesos realizados para la obtención de las tarjetas electrónicas que componen el sistema, así como el modelado matemático necesario para el procesamiento y compensación de los datos adquiridos, con el fin de obtener el ángulo de inclinación del terreno caso de estudio, lo cual es fundamental para determinar un posible deslizamiento de una masa de tierra.

En los siguientes capítulos se presenta el proceso de investigación, diseño, implementación y pruebas en laboratorio de la red de sensores, así como los resultados obtenidos durante todo el proceso de desarrollo. El presente documento se divide en cinco capítulos donde en el primer capítulo se describe el planteamiento del problema, en el segundo capítulo se tratan temas referentes al marco teórico, posteriormente en el capítulo tres se presenta la implementación hardware de la red de sensores seguido del capítulo cuatro donde se describe la implementación software y finalmente en el capítulo cinco se presentan las pruebas realizadas, los resultados, conclusiones y propuestas de trabajos futuros.

Palabras clave: Deslizamiento de masas de tierra, ángulo de inclinación de una masa de tierra, sensor de inclinación.

INTRODUCCIÓN

El diseño y desarrollo de herramientas tanto software como hardware de bajo costo en el área de la geología brinda equipos con costos accesibles a municipios de escasos recursos, con el fin de monitorear posibles deslizamientos de tierra evitando catástrofes por pérdidas humanas y de infraestructura.

Así mismo brinda a las instituciones educativas posibilidades de adquirir equipos, lo cual facilita los procesos de apropiación de conocimiento en los estudiantes ya que mediante las experiencias prácticas, se aplica y refuerzan los conocimientos teóricos adquiridos.

Mediante la realización de este proyecto se busca construir una red de sensores de bajo costo que brinde información sobre los ángulos de inclinación del lugar en el que se instalan, permitiendo así monitorear de forma local posibles deslizamientos de masas de tierra.

Para construir la red de sensores se plantearon las siguientes fases:

- Conceptualización e investigación
- Diseño
- Implementación
- Desarrollo software
- Pruebas del sistema

Las anteriores fases serán desarrolladas en cada capítulo del presente proyecto.

CAPITULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1. Planteamiento del problema

Luego de que el gobierno expidiera la ley 1523 de 2012, todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales con el fin de desarrollar planes de prevención, desarrollo seguro y gestión ambiental territorial sostenible [1].

Colombia, por ser un país con una topología diversa, con grandes ríos, fuertes pendientes, amplios periodos de lluvias y según información suministrada por el DANE el 86% de los colombianos se encuentran bajo un nivel de riesgo sísmico importante [2]. Según Martha Calvache, subdirectora de Ingeominas, sería imposible detectar todos los lugares que están en riesgo en el país porque cualquier sitio, con un deslizamiento muy pequeño, podría causar muertes y tragedias [3].

Según estudios de zonificación de amenazas naturales realizados por la Corporación Autónoma Regional Del Cauca 38 de los 42 municipios del departamento del Cauca, presentan altos índices de amenaza sísmica, lo cual es un agravante a los problemas de inestabilidad de suelos que generan los deslizamientos de tierra [4, 5].

Existe una relación directa entre los niveles de pobreza y las capacidades institucionales, factores que además inciden en el diseño y la implementación de acciones de reducción del riesgo y de recuperación frente a un desastre. Entre los municipios con más concentración de riesgo relativo, desde el punto de vista económico, con respecto al Producto Interno Bruto (PIB) y por exposición a la amenaza sísmica, se destaca el departamento del Cauca, por lo cual presenta

mayor potencial de pérdidas económicas debido a la baja cobertura de infraestructura sanitaria básica, menores niveles de escolaridad y salubridad, infraestructura productiva y de servicios más deficiente, ingresos reducidos, debilidades en su desempeño institucional, presenta menor capacidad de recuperación económica y social [6].

En las obras civiles es de uso obligatorio instrumentos para la medición de inclinaciones que muestren un posible deslizamiento de tierra sobre un área de riesgo inminente, estas herramientas permiten evaluar las características del terreno haciendo un seguimiento detallado del comportamiento del área estudiada lo que a su vez brinda información para generar planes de prevención minimizando el riesgo de avalancha, esto con el propósito de reducir pérdidas humanas de materiales e infraestructura.

Comercialmente se cuenta con referencias de diferentes proveedores que desarrollan sistemas de medida de inclinación, tal como RST Instruments con el Digital MEMS Inclinometer System o el DIS-500 inclinometer de RocTest Telemac. Cabe resaltar que los costos de estos equipos son muy elevados, lo cual dificulta su integración como herramientas de prospección en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT) con el fin de generar planes de prevención.

1.1.1. Pregunta de investigación.

¿Cómo prevenir oportunamente catástrofes por deslizamientos de tierra empleando tecnologías de bajo costo?

1.2. Justificación.

El presente proyecto tiene como objetivo permitir la adquisición de datos relevantes para la implementación de planes de prevención de catástrofes por deslizamientos de masas de tierra; lo anterior apoyado en el desarrollo e

implementación de una tecnología de bajo costo, aplicando conocimientos de instrumentación y electrónica adquiridos a lo largo de la carrera.

Según el artículo 1 de la ley 1523 de 2012, la gestión del riesgo de desastres, tiene el propósito puntual de contribuir a la seguridad y bienestar de las personas y al desarrollo sostenible, lo anterior a través de la implementación de procesos sociales orientados a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres [7].

Por otro lado las altas susceptibilidades, debidas a factores topográficos, geológicos y climáticos combinados con movimientos sísmicos pueden activar deslizamientos de tierra, generando grandes pérdidas tanto de seres vivos como materiales; tal es el caso ocurrido en la avalancha de Páez en Colombia en 1994, la cual se generó luego de un sismo de magnitud 6.4, en una temporada de intensas lluvias, en un área de fuertes pendientes topográficas donde se produjo el deslizamiento total de áreas muy grandes [4].

Fenómenos como los sismos fuertes y las erupciones volcánicas severas, por lo general ocasionan grandes pérdidas concentradas en un territorio y en un lapso de tiempo relativamente corto, por esto han sido denominados riesgos intensivos (EIRD, 2011). Estos eventos pueden ser poco frecuentes pero con grandes impactos [6].

En el departamento del Cauca 38 municipios tienen laderas con zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran [4, 5].

La presente propuesta pretende brindar información relevante para la generación de planes preventivos a catástrofes por deslizamientos de masas de tierra, a través de la implementación de tecnologías de bajo costo, que permitan el desarrollo de un sistema de fácil adquisición por parte de los entes encargados de la formulación y ejecución de dichos planes.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Obtención de un ángulo de inclinación de una masa de tierra a partir del diseño e implementación de una red de sensores tipo sonda.

1.3.2. Objetivos específicos.

1. Diseñar una red de sensores de inmersión para la adquisición de un ángulo de inclinación tipo sonda.
2. Implementar una red de sensores de inmersión para la adquisición de un ángulo de inclinación tipo sonda.
3. Diseñar e implementar un sistema de monitoreo local.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO.

2.1. Antecedentes.

En el área de estudio de medición de inclinación de suelos se encuentran varias herramientas a nivel comercial y un acercamiento a nivel académico, correspondiente a un trabajo de grado; a continuación se describe cada una de las tecnologías tipo sonda investigadas. Al final de esta sección se encuentra una tabla donde se resalta los aportes al proyecto desarrollado en el presente documento.

Digital MEMS Inclinometer System

El Digital MEMS Inclinometer System de RST Instruments está compuesto por una sonda digital para medir la inclinación, cable, carrete de control con alimentación, terminal de usuario con sistema operativo Windows, que funciona como dispositivo de lectura, análisis y almacenamiento de datos [8].

Las principales características del sistema son la comunicación Wireless entre el carrete de control y el terminal de usuario que asegura la facilidad de uso y fiabilidad en la adquisición de datos, ya que elimina el uso de conectores frágiles y la exactitud y eficiencia en la adquisición de datos [8].

Las principales aplicaciones son en medición de:

- Movimiento lateral de tierra o estructuras
- Derrumbes

- Rellenos de terraplén
- Estabilidad adyacente a la excavación de galerías
- Deflexión de pilotes, muelles, pilares y muros de contención

En la Figura 1 se observa el sistema Digital MEMS Inclínometer System de la empresa RST Instruments.



Figura 1. Digital MEMS Inclínometer System. Fuente: [8]

DIS-500 Digital Inclínometer System

El sistema de inclinómetro biaxial de Roctest Telemac está compuesto por una sonda, carrete de cable y PDA. La sonda está equipada con ruedas guía y contiene dos acelerómetros MEMS de medición en planos A y B. el cual está conectado por un cable al carrete para ser graduado. El botón de "leer" en la PDA, o activador de mando a distancia, permite guardar las lecturas de los acelerómetros, las lecturas se transmiten vía Bluetooth. El cable de Kevlar reforzado proporciona fuerza al tiempo que reduce de forma significativa el peso [9].

La conexión inalámbrica entre el instrumento de adquisición de datos y la PDA hace que la toma lecturas sea rápida y simple [9].

En la Figura 2 se observa el sistema DIS-500 inclinometer Digital Inclinometer System de la empresa Roctest Telemac [9].



Figura 2. DIS-500 inclinometer Digital Inclinometer System. Fuente: [9]

Inclinómetro OG310S

El sistema OG310S de la empresa Suministros Andaluces de Perforación, S.L. está conformado por una sonda inclinométrica OG310S, cable con recubrimiento de poliuretano OG388, un terminal de adquisición de datos OG387 con 64 Kb para el sistema operativo, 128 Kb para almacenar hasta 20 mediciones y programa para Sonda Inclinométrica en entorno Windows que permite capturar datos como: Nombre, zona, datos de medida, datos originales, identificador numérico, corrector Azimut, corrección de ángulo, sensibilidad, etc [10].

Este sistema de inclinómetro es utilizado para el seguimiento de deslizamientos, taludes, presas, muros de contención, etc [10].

Pueden ser utilizados en el interior de tubería Inclinométrica de 48 mm a 75 mm (diámetro interior) [10].

En la Figura 3 se observa el sistema Inclinómetro OG310S de la empresa OG310S de la empresa Suministros Andaluces de Perforación, S.L [10].



Figura 3. Inclínómetro OG310S. Fuente: [10]

Desarrollo de una aplicación capaz de monitorizar taludes mediante inclinómetros en una red de sensores inalámbrica

Proyecto de grado en el cual se desarrolla un sistema encargado de monitorear taludes con riesgo de desprendimiento. El desarrollo se implementa a través de una red de sensores inalámbrica, que funciona en tiempo real y sin la intervención humana por largos periodos de tiempo [11].

El sensor utilizado es un inclinómetro con referencia LCF196, el cual es un sensor de inclinación de doble eje empaquetado en una carcasa de 22mm de diámetro de acero inoxidable el ángulo de inclinación máximo es de 14.5° [11].

El proyecto propuesto pretende implementar un sistema modular conformado por dispositivos de fácil manipulación que a su vez se fabriquen con elementos disponibles en el mercado comercial de modo que lo convierta en un sistema de rápida reproducción. Adicionalmente el sistema contara con módulos de comunicación inalámbrica (Zigbee) en cada nodo de la red de sensores para realizar la transmisión de datos [11]. El costo de los materiales y dispositivos

electrónicos empleados en el desarrollo del proyecto en mención es de 3.722 euros aproximadamente.

En la Figura 4 se observa los componentes del sistema desarrollado en el proyecto de grado citado [11].

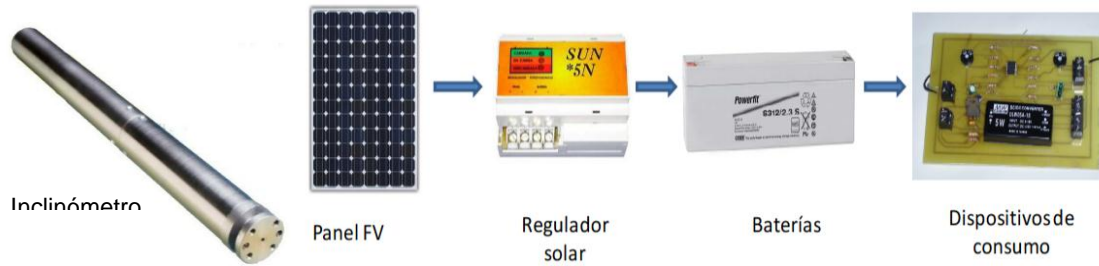


Figura 4. Sensor inclinómetro y sistema de alimentación. Fuente: [11]

GK-604D Sistema de inclinación digital

El sistema de inclinación digital GK-604D de Geokon está conformado por una sonda de inclinación digital modelo 6100D, un carrito de control y un PC FPC-2 para uso en campo. La sonda contiene la electrónica necesaria para convertir el voltaje analógico obtenido de los sensores, en una señal digital, la cual es transmitida por un cable de control al carrito que contiene una interfaz que se comunica vía Bluetooth con un dispositivo donde se almacenan los datos adquiridos durante la prueba, el cual se llama FPC-2 y cuenta con 4GB de almacenamiento, sistema operativo Windows Mobile 6.1 y pantalla VGA de 3.5” [12].

En la Figura 5 se observa el sistema de inclinación digital GK-604D de la empresa Geokon [12].



Figura 5. GK-604D Sistema de inclinación digital de Geokon Fuente: [12]

Sistema inclinómetro clásico Digitilt

El sistema inclinómetro clásico Digitilt de Slope Indicator está compuesto por [13]:

- Sonda: consta de un cuerpo de acero inoxidable, un conector para cable de control, y dos conjuntos de ruedas pivotantes.
- Cable de control para uso pesado: El cable de control se utiliza para controlar la profundidad de la sonda, alimentar el inclinómetro y transmitir las señales de lectura.
- Digitilt DataMate II: terminal de usuario, se encarga de registrar los datos de las sondas y es capaz de almacenar hasta 320 encuestas.
- DigiPro2: software encargado de gestionar los datos del inclinómetro, generar informes y gráficos.

En la Figura 6 se observa el sistema inclinómetro clásico Digitilt de la empresa Slope Indicator.



Figura 6. Sistema inclinómetro clásico Digitilt. Fuente [13]

En la Tabla 1 se presenta un resumen donde se resaltan los principales aportes de los trabajos mencionados en la sección antecedentes.

Tabla 1. Aportes de trabajos relacionados de sección antecedentes.

TITULO	AUTORES	PRINCIPAL APORTE
Digital MEMS Inclinometer System	RST Instruments	Implementa comunicación Bluetooth Emplea inclinómetro tipo MEMS
DIS-500 inclinometer Digital Inclinometer System	Roctest Telemac	Emplea inclinómetro tipo MEMS
Inclinómetro OG310S	Suministros Andaluces de Perforación S.L.	Herramienta comercial de alta precisión
Desarrollo de una aplicación capaz de monitorizar taludes mediante inclinómetros en una red de sensores inalámbrica	Roberto Fernández Martínez	Alimentación por panel solar

GK-604D Sistema de inclinación digital	Geokon	Implementa comunicación Bluetooth
Sistema inclinómetro clásico Digitilt	Slope Indicator	Implementa comunicación Bluetooth

2.2. Bases teóricas

En la siguiente sección se presentan conceptos básicos de geotecnia a manera de introducción.

2.2.1. Taludes

Un talud o ladera es una masa de tierra que posee pendiente o cambios de altura significativos y puede ser conformado por roca, suelo natural, relleno o una combinación de ellos [4].

Los taludes se dividen según su formación en:

- Naturales, cuando se producen sin intervención humana. Se denominan ladera natural o simplemente ladera. Se pueden producir por erosión bien sea por ríos o mares, o por acumulación de materia de forma natural [4].
- Artificiales, son consecuencia de la intervención humana regularmente en obras de ingeniería y se conocen como terraplenes y cortes [4].

En la Figura 7 se observa la clasificación de taludes según su origen en naturales y artificiales.

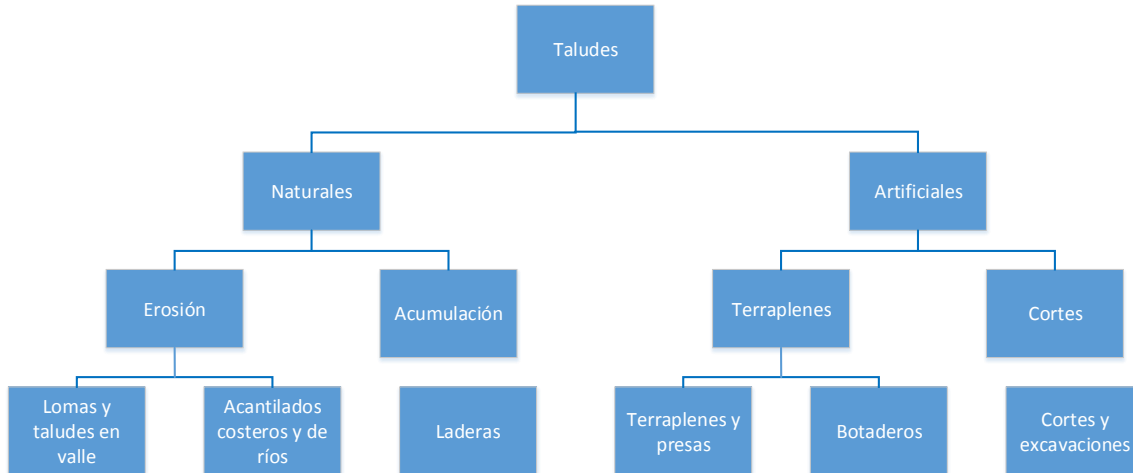


Figura 7. Clasificación de taludes según su origen. Fuente [4]

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

1. **Altura**, es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados [4].
2. **Pie**, Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior [4].
3. **Cabeza o escarpe**, se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior [4].
4. **Altura de nivel freático**, distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza [4].
5. **Pendiente**, es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

Ejemplo: Pendiente: 45°, 100%, o 1H:1V [4].

En la Figura 8 se observan de forma gráfica los elementos constitutivos de un talud descritos anteriormente.

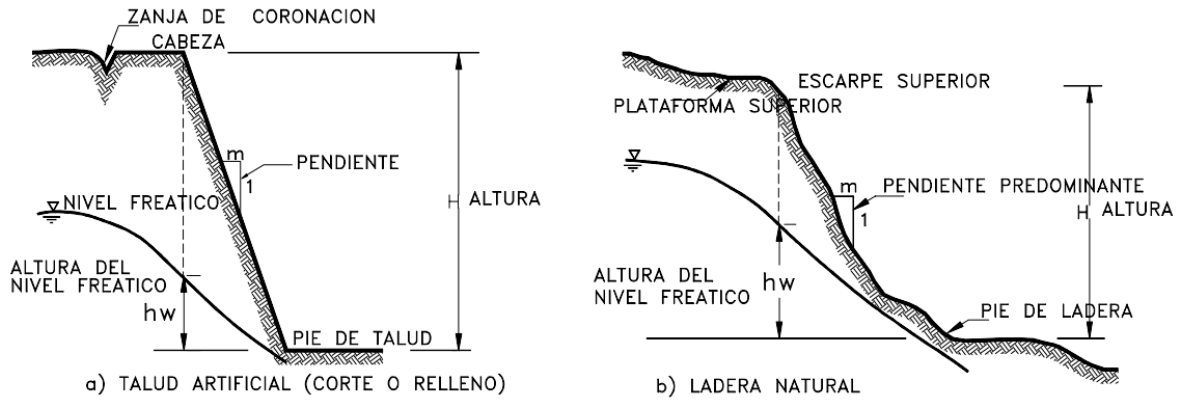


Figura 8. Nomenclatura de taludes y laderas. Fuente [4].

Los procesos geotécnicos activos de los taludes o laderas corresponden generalmente a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que lo conforman [4].

A continuación se describen las partes que conforman un deslizamiento o movimiento en masa típico:

1. **Escarpe principal:** Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla [4].
2. **Escarpe secundario:** Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve [4].
3. **Cabeza:** Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal [4].
4. **Cima:** El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal [4].
5. **Corona:** El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal [4].

6. **Superficie de falla:** Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve [4].
7. **Pie de la superficie de falla:** La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno [4].
8. **Base:** El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla [4].
9. **Punta o uña:** El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima [4].
10. **Costado o flanco:** Un lado (perfil lateral) del movimiento [4].
11. **Superficie original del terreno:** La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento [4].
12. **Derecha e izquierda:** Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

En la Figura 9 se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con las partes descritas anteriormente.

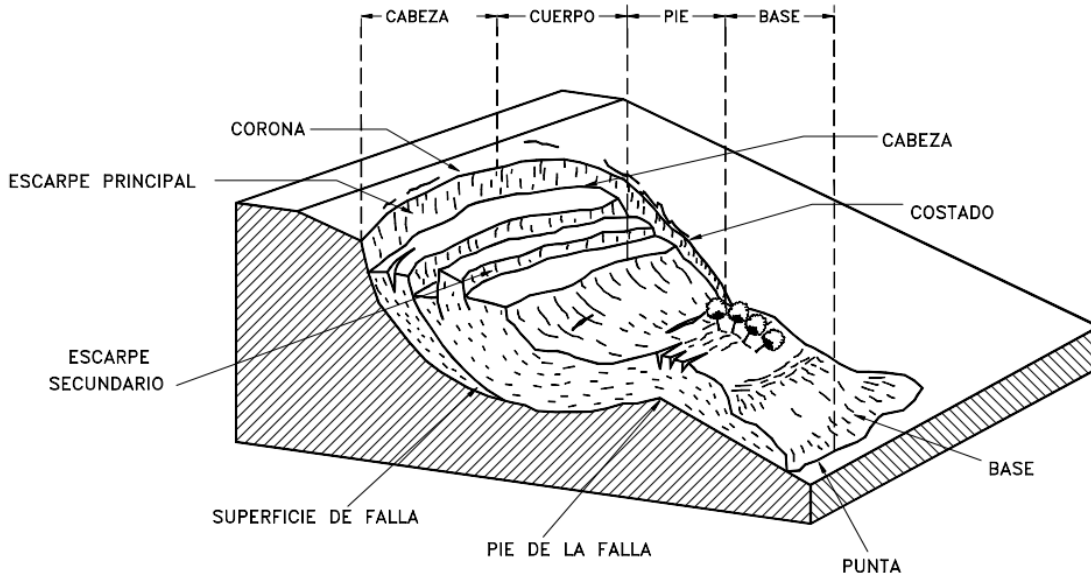


Figura 9. Nomenclatura de un deslizamiento. Fuente [4]

2.2.2. Sensores de inclinación

El funcionamiento de los sensores de aceleración o acelerómetros, se basa en el principio de la aceleración descubierto por Newton $fuerza = masa \times aceleración$ (), con el fin de aplicar la fuerza que producirá la aceleración o deceleración, es necesario que dichos dispositivos cuenten con una masa móvil, dicha masa puede estar constituida por diferentes tipos de elementos, mecánicos, capacitivos, inductivos, piezoeléctricos, etc. Además pueden actuar sobre uno o varios ejes (X, Y, Z) al controlar fuerzas transversales. Dependiendo de la señal proporcionada por el sensor de aceleración estos pueden ser de tipo analógico o digital, y establecen sus límites de funcionamiento con base en la aceleración de la gravedad ($g = 9.8 \frac{m}{s^2}$) [14].

Tipos de sensores de inclinación.

- **Sensores de inclinación capacitivos**

Los inclinómetros capacitivos son sensores de inclinación en los que la variación de inclinación se traduce en una variación de la capacitancia, resultante del

desplazamiento dieléctrico. Una aplicación común de los sensores de inclinación capacitivos es la medición de desplazamientos lineales y rotativos [15].

En esta tecnología los rangos son variados, pudiendo darse hasta giros completos de 360° [16].

Aprovechando las características de esta tecnología, los modelos capacitivos con dieléctrico líquido, filtran en parte las vibraciones mecánicas del conjunto donde está montado el sensor, lo que lo hace más robusto frente a estas vibraciones [16].

En la Figura 10 se observa una imagen de un sensor de inclinación capacitivo del fabricante alemán Seika.



Figura 10. Sensor de inclinación capacitivo. Fuente [16]

- **Inclinómetros MEMS**

Entre las mayores dificultades encontradas en el diseño de instrumentos para tomar medidas de aceleración, se encuentran el elevado costo y tamaño de los sensores. Dificultad que ha sido superada en el sector de aplicaciones de mediana precisión, con el desarrollo de los acelerómetros de tecnología *MEMS* (Micro Electro-Mechanical Systems).

Un inclinómetro tipo MEMS está compuesto por cuatro piezoresistores que se integran para medir los cambios de tensión utilizados para calcular las fuerzas y los pares aplicados entre la parte externa e interna del MEMS [17].

En la Figura 11 se observa un inclinómetro MEMS del fabricante alemán ASM.



Figura 11. Inclinómetro MEMS. Fuente [16].

- **Inclinómetros de dos ejes - biaxiales**

Los inclinómetros pueden clasificarse según el número de servo- acelerómetros que los componen, en particular los inclinómetros biaxiales miden la inclinación en dos planos perpendiculares de forma simultánea, ya que cuentan con dos sensores. Una de sus principales aplicaciones es monitorear en una superficie los movimientos horizontales de suelo y rocas [18].

En la Figura 12 se observa un inclinómetro biaxial del fabricante alemán HL PLANAR.



Figura 12. Inclinómetro biaxial DMG2. Fuente [16].

- **Sensor de inclinación de referencia inercial IMU (Inertial Measurement Unit)**

Una Unidad de Medidas Inerciales (IMU o UMI en español) es en general un sistema cerrado que es usado para detectar la orientación, localización y

movimiento de un objeto determinado [16]. Es un sensor que incorpora tres acelerómetros, tres giroscopios y dependiendo de la referencia del dispositivo algunos también incluyen tres magnetómetros.

Típicamente, una IMU detecta la aceleración y los cambios de orientación instantáneamente.

En la Figura 13 se observa un inclinómetro de referencia inercial del fabricante XSENS.

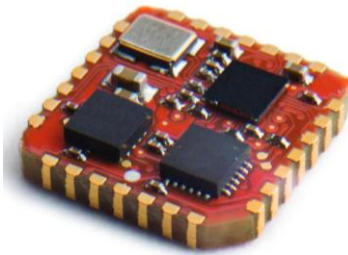


Figura 13. Inclinómetro de referencia inercial IMU. Fuente [16]

Del análisis de la investigación de los sensores de inclinación, se deduce que los inclinómetros seleccionados para realizar la implementación del presente proyecto son los basados en la tecnología MEMS, ya que combinan tres características que apoyan los objetivos del proyecto, las cuales son: la precisión, la economía y la documentación disponible que flexibiliza el proceso de implementación.

2.3. Representación matemática de la orientación

Con el objetivo de adquirir un ángulo de inclinación se debe obtener la orientación del sensor con respecto a un marco de referencia fijo, por lo cual es necesario realizar una representación matemática.

En el presente capítulo se tratarán los ángulos de inclinación según la terminología de navegación así:

- Pitch (θ): ángulo de elevación

- Roll (φ): ángulo de rotación o alabeo
- Yaw (ψ): ángulo de dirección

A continuación se expone el proceso matemático para la obtención de los ángulos de inclinación a partir de los datos de aceleración y velocidad angular los cuales son adquiridos por medio de un sensor.

2.3.1. Medición de ángulo de inclinación con acelerómetro

La aceleración se puede dividir en dos componentes, una situada en el eje Z y otra en el eje X o en el eje Y, de acuerdo con posicionamiento del sensor.

Como la aceleración sobre el eje Z es igual a la aceleración de la gravedad por el ángulo formado entre este eje y la aceleración gravitacional, la tensión de salida que proporcionara el acelerómetro es igual a la gravedad (1 g) por el coseno de dicho ángulo [14].

Para comprobarlo solo se necesita ubicar el sensor paralelo al eje de gravedad, de modo que el ángulo formado por el eje Z y la aceleración gravitacional es 0° , el coseno de 0° es uno, por lo que la aceleración en ese punto es 1 g, lo que equivale a la gravedad de la tierra. De igual manera, si su posición fuera perpendicular, entonces la aceleración sería 0g, ya que el coseno de 90° es cero [14].

En la Figura 14 se observa el principio de medida de inclinación.

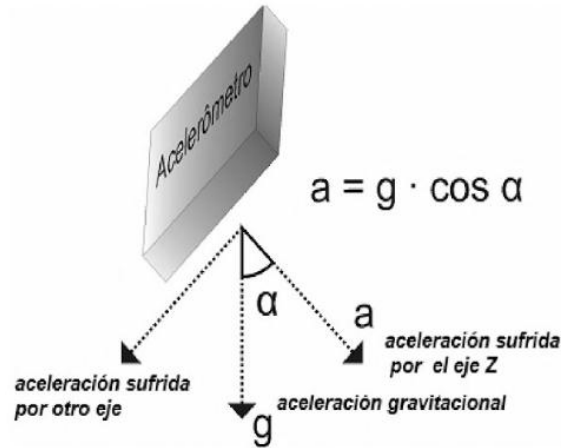


Figura 14. Principio de medida de inclinación. Fuente [14].

Mediante el acelerómetro solo es posible calcular dos de los tres ángulos de navegación pitch (θ) y roll (φ), el ángulo yaw (ψ) no es posible calcularlo ya que sin importar la variación que se presenten en el eje Z, la componente de la gravedad permanecerá constante.

Siempre que se presente un movimiento en el ángulo pitch (θ), ya sea positivo o negativo, el sensor se moverá de forma conjunta con el sistema provocando una variación en el eje Y que entregara una señal debido a la componente de la gravedad presente. Un movimiento en el eje X, producirá una variación en los datos en dicho eje, por lo cual se generará una señal debido a la componente de la gravedad presente.

Una vez se han obtenido las variaciones tanto para el eje X como para el eje Y, se calcula el ángulo en grados de la siguiente forma:

Ángulo Pitch:

$$\text{Pitch}(\theta) = \arctan \left[\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right] \quad (1)$$

Ángulo Roll:

$$\text{Roll}(\varphi) = \arctan \left[\frac{X}{\sqrt{Y^2 + Z^2}} \right] \quad (2)$$

Es importante recordar que al usar un acelerómetro no es posible obtener el ángulo de rotación Yaw (ψ) con respecto al eje vertical, como se mencionó anteriormente, por lo cual se propone el uso de un giroscopio. A continuación se presenta el cálculo de los ángulos de inclinación haciendo uso de un giroscopio.

2.3.2. Medición de ángulo de inclinación con giroscopio

Un giroscopio es un dispositivo que mide el movimiento de rotación y entrega medidas de velocidad angular [19], las unidades de velocidad angular se dan en grados por segundo ($^{\circ}/s$) o revoluciones por segundo (RPS). Para obtener el ángulo a partir del giroscopio se debe integrar la velocidad, como se muestra a continuación:

$$SG = \omega = \frac{d(\angle)}{dt} \quad (3)$$

Luego:

$$d(\angle) = \omega \cdot dt \quad (4)$$

Finalmente:

$$\angle = \omega \cdot dt \quad (5)$$

Donde:

- SG: Señal del giroscopio
- ω : Velocidad angular
- \angle : Ángulo

Con la implementación del modelado descrito anteriormente solo es posible obtener un ángulo en un instante de tiempo y para determinar los ángulos de inclinación se debe considerar que el proceso anterior se realiza en intervalos de tiempo dt , por lo cual el algoritmo queda así:

$$\angle_k = \angle_{k-1} + u_k dt \quad (6)$$

Donde:

- \angle_k : es el estado presente
- \angle_{k-1} : es el estado anterior
- u_k : es la señal del giroscopio
- dt : es el tiempo de muestreo

Uno de los problemas al calcular ángulos de inclinación con el uso exclusivo de un giroscopio es que se presenta un error acumulativo, por lo que se tendrán valores fiables en intervalos cortos de tiempo, pero al transcurrir el tiempo los valores obtenidos se alejarán de la medida real. Por lo que se hace necesario el uso de un acelerómetro.

Así mismo es necesario mencionar que con el uso de un giroscopio no se logra establecer un estado de referencia inicial, lo cual puede ser compensado con el uso de un magnetómetro.

Luego de analizar las opciones disponibles para calcular los ángulos de inclinación se concluye que es necesario usar los siguientes sensores: acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. El uso de los tres sensores combinados se hace posible mediante la implementación del filtro de Kalman el cual se encarga de atenuar los errores de cada uno de ellos.

2.4. Filtro de Kalman

Teóricamente el filtro de Kalman es un estimador para lo que se conoce como problema lineal cuadrático, que consiste en la estimación del estado actual de un sistema dinámico perturbado por ruido blanco, usando mediciones relacionadas linealmente pero corrompidas con ruido blanco aditivo. El estimador resultante es estadísticamente óptimo con respecto a cualquier función cuadrática de

estimación del error. Con el Filtro de Kalman el término filtrado asumió un significado que va más allá de la idea original de separar componentes de una mezcla. Ha llegado a incluir la solución de un problema de inversión, en el cual se conoce como representar las variables medidas como función de las principales variables de interés. En esencia, invierte la relación funcional y estima las variables independientes como funciones inversas de las variables dependientes (medidas). Estas variables de interés también pueden ser dinámicas, con dinámicas que son solo parcialmente predecibles [20].

2.4.1. Filtro de Kalman Discreto

El filtro de Kalman estima un proceso usando una forma de control realimentado. El filtro estima el proceso y se realimenta de las medidas (ruidosas). De este modo las ecuaciones que rigen el filtro se clasifican en dos grupos: actualización en tiempo o predicción y actualización de observación o corrección. Las primeras son las encargadas de obtener las estimaciones del estado y la covarianza y las siguientes son responsables de la realimentación, para tener en cuenta las últimas medidas para el estimado a priori con el fin de obtener una mejora en la estimación a posteriori [20].

Modelo del sistema

El filtro de Kalman aborda el problema general de intentar estimar el estado $X \in R^n$ de un proceso controlado en tiempo discreto que es gobernado por una ecuación diferencial lineal estocástica del tipo [20]:

$$X_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + W_{k-1} \quad (7)$$

Donde:

W_k : Variable aleatoria que representa el ruido del proceso

Con una medición $Z \in R^m$ que es:

$$Z_k = HX_k + V_k \quad (8)$$

Donde:

V_k : Variable aleatoria que representa la medición

W_k y V_k se suponen independientes una de la otra, blancas, y con una distribución de probabilidad normal.

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (9)$$

$$p(v) \sim N(0, R) \quad (10)$$

En la práctica, la matriz de covarianza del ruido del proceso Q y la matriz de covarianza del ruido de las mediciones R , pueden variar en cada paso de tiempo o medición, sin embargo se asume que son constantes. La matriz A , de dimensiones $n \times n$, relaciona el estado en el etapa anterior $k - 1$ con el estado en la etapa actual k , en ausencia de una función de entrada controladora o de ruido en el proceso. La matriz B , de dimensiones $n \times l$, relaciona la entrada de control $U \in R^l$ con el estado x . La matriz H , de dimensiones $m \times n$, en la ecuación de medición relaciona el estado con la medición Z_k [20].

Definiendo $\hat{X}_{\bar{k}}$ como la estimación a priori del estado en una etapa k conociendo el proceso en el estado del proceso antes de ésta, y $\hat{X}_{\bar{k}} \in R^m$ como el estado estimado a posteriori en la etapa k dada la medición Z_k . Por tanto, se pueden definir los errores a priori y a posteriori como [20]:

$$e_{\bar{k}} \equiv X_k - \hat{X}_{\bar{k}} \quad (11)$$

$$e_k \equiv X_k - \hat{X}_k \quad (12)$$

Luego la covarianza del error estimada a priori es:

$$P_{\bar{k}} \equiv E[e_{\bar{k}}e_{\bar{k}}^T] \quad (13)$$

Y la covarianza del error estimada a posteriori es

$$P_k \equiv E[e_k e_k^T] \quad (14)$$

Al deducir las ecuaciones del filtro de Kalman, se comienza con el objetivo de encontrar una ecuación que calcule una estimación del estado a posteriori \hat{X}_k como una combinación lineal de la estimación a priori \hat{X}_{k-1} y un promedio ponderado de la diferencia entre la actual medida Z_k y una predicción de la medida $H\hat{X}_{k-1}$ como se muestra a continuación [20].

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k-1} + K_k(Z_k - H\hat{X}_{k-1}) \quad (15)$$

El origen se encuentra en la probabilidad del estado estimado a priori \hat{X}_{k-1} condicionado a todas las mediciones anteriores Z_k (regla de Bayes). El filtro de Kalman mantiene los dos primeros momentos de la distribución del estado [20],

$$E[X_k] = \hat{X}_k \quad (16)$$

$$E[(X_k - \hat{X}_k)(X_k - \hat{X}_k)^T] = P_k \quad (17)$$

El estado estimado a posteriori de la ecuación (15) refleja que la media (primer momento) de la distribución del estado están normalmente distribuidas si se reúnen las condiciones de las ecuaciones (9) y (10) [20].

La covarianza del error estimada a posteriori refleja la varianza de la distribución de estado (el segundo momento no centrado). En otras palabras:

$$p(X_k | Z_k) \sim N\left(E[X_k], E\left[(X_k - \hat{X}_k)(X_k - \hat{X}_k)^T\right]\right) = N(\hat{X}_k, P_k) \quad (18)$$

La diferencia $Z_k - H\hat{X}_{k-1}$ en la ecuación (15) es conocida como innovación o el residuo. El residuo refleja la discrepancia entre la medida predicha $H\hat{X}_{k-1}$ y la medida actual Z_k . Un residuo de cero significa que las dos están completamente de acuerdo. La matriz K de dimensiones $n \times m$ de ecuación (15) es escogida para ser la ganancia o factor de mezcla que minimiza la covarianza del error a posteriori, ver ecuación (14) . Una de las formas de llegar a la minimización de K es [20]:

$$K_k = P_{\bar{k}} H^T (H P_{\bar{k}} H^T + R)^{-1} P_{\bar{k}} H^T = \frac{P_{\bar{k}} H^T}{(H P_{\bar{k}} H^T + R)} \quad (19)$$

Observando la ecuación (19) se puede ver cómo en el caso de que la covarianza del error de la medición R se aproxime a cero, la ganancia k le da más peso a ponderación del residuo [20]. Específicamente :

$$\lim_{R_k \rightarrow 0} K_k = H^{-1} \quad (20)$$

En el caso contrario, cuando la covarianza del error a priori $P_{\bar{k}}$ se aproxima a cero, la ganancia K le da menos peso en la ponderación al residuo [20]. Concretamente,

$$\lim_{P_{\bar{k}} \rightarrow 0} K_k = 0 \quad (21)$$

Otra forma de pensar en la ponderación realizada por K es que cuando la covarianza del error de la medición R se aproxima a cero, se confía más en la medición actual Z_k , mientras se confía menos en la medición estimada $H\hat{X}_{\bar{k}}$. Por otro lado, cuando la covarianza del error estimado $P_{\bar{k}}$ se aproxima a cero, se confiará menos en la medición actual Z_k y más en la medición estimada $H\hat{X}_{\bar{k}}$ [20].

- **Predicción**

A continuación se muestra la predicción tanto para actualización del estado como para la matriz de covarianza. La etapa de predicción es la encargada de pronosticar estimaciones a priori tanto del estado como de la matriz de covarianza del error. El pronóstico del estado a priori está basado en el valor anterior del vector de estados y la entrada, ver ecuación (22). Además, la etapa de predicción involucra el cálculo de la matriz de covarianza del error a priori, que está dada por el valor anterior de la matriz de error de covarianza y la covarianza del ruido del proceso ver ecuación (23) [20].

Ecuaciones de Predicción para el Filtro Discreto de Kalman:

$$\hat{X}_{\bar{k}} = A\hat{X}_{k-1} + Bu_k \quad (22)$$

$$P_{\bar{k}} = AP_{k-1} + A^T + Q \quad (23)$$

- **Corrección**

La primera etapa dentro de la corrección es el cálculo de K_k , llamada ganancia de Kalman ver ecuación (24). Donde el objetivo es minimizar la covarianza del error de la nueva estimación. El valor de la ganancia K_k es mínimo cuando la covarianza del error tiende a cero [20].

Posteriormente, se procede a obtener la medición, para generar un estado estimado a posteriori que incorpore dicha medición, ver ecuación (25). Finalmente, se actualiza la matriz de correlación de error ver ecuación (26) [20].

Ecuaciones de Corrección para el Filtro Discreto de Kalman [20]:

$$K_k = P_{\bar{k}} H^T (H P_{\bar{k}} H^T + R)^{-1} \quad (24)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{\bar{k}} + K_k (Z_k - H \hat{X}_{\bar{k}}) \quad (25)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_{\bar{k}} \quad (26)$$

A continuación se describe brevemente el método de matriz de cosenos directores, con el fin de obtener la posición de cada uno de los sensores que conforman el sistema.

2.5. Matriz de cosenos directores

A continuación se presenta el método de matriz de cosenos directores desarrollado por William Premerlani and Paul Bizard [21]. Hay ciertos tipos de vectores, tales como direcciones, velocidades, aceleraciones y traslaciones que se pueden transformar entre el marco de referencia rotado con una matriz de 3x3. El

área de interés será el marco de referencia del sistema [x' , y' , z'] y el marco de referencia de la tierra [x , y , z]. Es posible la rotación de vectores, multiplicándolos por la matriz de cosenos directores.

$$Q = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{bmatrix} \quad (27)$$

Las componentes del vector descrito en la ecuación (27), pueden ser aceleraciones, velocidades, posiciones, etc. Para este caso particular se tomarán velocidades angulares suministradas por un giroscopio.

La matriz de la ecuación (28) se conoce como matriz de rotación.

$$R = \begin{bmatrix} r_{XX} & r_{XY} & r_{XZ} \\ r_{YX} & r_{YY} & r_{YZ} \\ r_{ZX} & r_{ZY} & r_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Luego:

$$Q_G = R * Q_P \quad (29)$$

Donde:

- Q_P : vector Q de medida referente al sistema.
- Q_G : vector Q de medida referente a la tierra.

A continuación se muestra la relación entre la matriz de cosenos directores y los ángulos de Euler:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\psi) & \cos(\psi) \sin(\theta) \sin(\phi) - \sin(\psi) \cos(\phi) & \sin(\phi) \sin(\psi) + \cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) \\ \cos(\theta) \sin(\psi) & \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \cos(\phi) \cos(\psi) & \sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \cos(\psi) \sin(\phi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\phi) \cos(\theta) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (30)$$

Las ecuaciones (29) y (30) describen como rotar un vector en el marco de referencia del sistema para el marco de referencia de la tierra. La expresión de la ecuación (29) está dada en términos de cosenos directores.

En la ecuación (29) cada componente en el marco de referencia de la tierra es igual al producto escalar de la fila correspondiente de la matriz de rotación con el

vector en el marco del sistema. La ecuación (31) es una reformulación de la ecuación (29).

$$\begin{aligned} Q_{Gx} &= r_{XX}Q_{Px} + r_{XY}Q_{Py} + r_{XZ}Q_{Pz} \\ Q_{Gy} &= r_{YX}Q_{Px} + r_{YY}Q_{Py} + r_{YZ}Q_{Pz} \\ Q_{Gz} &= r_{ZX}Q_{Px} + r_{ZY}Q_{Py} + r_{ZZ}Q_{Pz} \end{aligned} \quad (31)$$

La matriz R posee la información necesaria para expresar la orientación del plano con respecto a la tierra, y es conocida como la matriz de cosenos directores ya que cada entrada equivale al coseno del ángulo entre un eje del plano y un eje en la tierra.

$$R^{-1} = R^T = \begin{bmatrix} r_{XX} & r_{YX} & r_{ZX} \\ r_{XY} & r_{YY} & r_{ZY} \\ r_{XZ} & r_{YZ} & r_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$Q_P = R^{-1} * Q_G = R^T * Q_G \quad (33)$$

Las ecuaciones (32) y (33) permiten observar la rotación del vector en función de sus cosenos directores.

2.5.1. Matriz de rotación con señal de giroscopio

Para determinar la matriz de rotación o DCM se asume que los cálculos se realizan aproximadamente cada 100 ms, que es el tiempo que tarda la adquisición y el procesamiento de la información para la obtención de los ángulos [20].

$$\theta = \omega * dt \quad (34)$$

Donde θ es en ángulo que rota el sistema y c es el tiempo entre cada calculo, con lo que la rotación elemental en el instante dt es [20]:

$$R(dt) = \begin{bmatrix} 1 & -d\theta_z & d\theta_y \\ d\theta_z & 1 & -d\theta_x \\ -d\theta_y & d\theta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Donde:

$$\theta_z = \omega_z * dt, \theta_y = \omega_y * dt, \theta_x = \omega_x * dt \quad (36)$$

Por la propiedad asociativa de las Matrices de Rotación, se tiene que la Matriz de Rotación para el instante $t + dt$ es igual a la del instante t multiplicada por la Rotación dt , así [20]:

$$R(t + dt) = R(t) \begin{bmatrix} 1 & -d\theta_z & d\theta_y \\ d\theta_z & 1 & -d\theta_x \\ -d\theta_y & d\theta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$R(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Por las aproximaciones que se efectúan y debido a que los cálculos no son totalmente exactos, en la Matriz de Rotación los vectores unitarios dejan de ser perpendiculares entre si y se debe realizar una *Renormalización*, proceso que se describe a continuación.

2.5.2. Renormalización

Los módulos de los vectores no son exactamente 1, para corregir esto se realiza el siguiente proceso:

- **Paso 1: Perpendicularidad de los Vectores**

El producto escalar de dos vectores es igual al producto de sus módulos por el coseno del ángulo que forman, por lo tanto el producto escalar de los vectores unitarios X e Y debería ser cero.

Si:

$$X = \begin{bmatrix} r_{xx} \\ r_{xy} \\ r_{xz} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} r_{yx} \\ r_{yy} \\ r_{yz} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Entonces:

$$\text{error} = X \cdot Y = X^T Y = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{yX} \\ r_{yy} \\ r_{yz} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Si el producto escalar no es igual a cero, el resultado da una medida de “error” (falta de perpendicularidad). Para corregir la desviación se resta a cada vector el producto de la mitad del “error” por el otro vector, como se observa en las ecuaciones (41) y (42).

En X:

$$\begin{bmatrix} r_{xx} \\ r_{xy} \\ r_{xz} \end{bmatrix}_{\text{ortogonal}} = X_{\text{ortogonal}} = X - \frac{\text{error}}{2} Y \quad (41)$$

En Y:

$$\begin{bmatrix} r_{yX} \\ r_{yy} \\ r_{yz} \end{bmatrix}_{\text{ortogonal}} = Y_{\text{ortogonal}} = Y - \frac{\text{error}}{2} X \quad (42)$$

Podría hacerse lo mismo comprobando el Z con el X e Y, sin embargo recordando que el producto vectorial de dos vectores es otro vector, perpendicular a ambos, cuyo módulo es el producto de los módulos es más sencillo hacer Z igual al producto vectorial de X e Y.

$$\begin{bmatrix} r_{xx} \\ r_{xy} \\ r_{xz} \end{bmatrix}_{\text{ortogonal}} = Z_{\text{ortogonal}} = X_{\text{ortogonal}} \times Y_{\text{ortogonal}} \quad (43)$$

- **Paso 2: igualar a 1 los módulos**

El método normal es calcular el módulo de los vectores normalizados y dividir cada componente por este valor, estos cálculos implican raíces cuadradas. Para descargar el proceso y dado que el modulo es muy próximo a uno, se aplicará una *Expansión de Taylor*, como se observa a continuación:

$$X_{\text{normalizada}} = \frac{1}{2} (3 - X_{\text{ortogonal}} \cdot X_{\text{ortogonal}}) X_{\text{ortogonal}} \quad (44)$$

$$Y_{\text{normalizada}} = \frac{1}{2}(3 - Y_{\text{ortogonal}} \cdot Y_{\text{ortogonal}})Y_{\text{ortogonal}} \quad (45)$$

$$Z_{\text{normalizada}} = \frac{1}{2}(3 - Z_{\text{ortogonal}} \cdot Z_{\text{ortogonal}})Z_{\text{ortogonal}} \quad (46)$$

La normalización permite mantener los planos ortogonales de forma que no se degeneran al obtener una rotación dando como resultado la ortogonalidad de los vectores x,y y z.

2.6. Medición de ángulos de inclinación y filtro de Kalman

A continuación se presenta el modelo para el cálculo de los ángulos de inclinación, el cual será implementado en el filtro de Kalman. Se considera el siguiente modelo como un modelo lineal.

$$\angle_{\bar{k}} = \angle_{k-1} + u_k * dt - w_{k-1} * dt \quad (47)$$

Donde:

- u_k : Señal acondicionada del giroscopio
- dt : Tiempo de muestreo
- $\angle_{\bar{k}}$: Estado estimado
- \angle_{k-1} : estado anterior
- w_{k-1} : perturbación del proceso

Cabe aclarar que la perturbación está atada a una continua variación, por lo tanto es se dificulta determinar un valor para la variable que permanezca constante a lo largo del tiempo. Por lo tanto se tomara esta variable como un dato que forma parte del vector de estados para el filtro de Kalman.

$$w_{\bar{k}} = w_{k-1} \quad (48)$$

Por otro lado se tiene el acelerómetro como parte del sistema comportándose como un observador de este. Con la medida entregada por el acelerómetro se determina el error originado entre el ángulo estimado (giroscopio) y la observación realizada en un instante de tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior se tiene el siguiente modelo para el observador:

$$z_k = Hx_k^- + v_k \quad (49)$$

Según la ecuación (49) la medida entregada por el observador presenta un margen de error (v_k) con respecto al valor estimado con base en el giroscopio donde:

$$v_k = z_k - Hx_k^- \quad (50)$$

Donde:

- v_k : margen de error respecto a valor estimado
- z_k : representa el ángulo entregado por el acelerómetro
- Hx_k^- : matriz de estado

Luego se propone el siguiente modelo para la inclusión en el filtro de Kalman.

$$\begin{bmatrix} \angle^- \\ deriva^- \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \angle \\ deriva \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} \mu_k \quad (51)$$

$$z_k = Hx_k^- + v_k \quad (52)$$

Donde:

μ_k : Velocidad angular entregada por el giroscopio

$deriva = w$: Perturbaciones en el sistema en [°/s]

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN HARDWARE DEL SISTEMA

En el presente capítulo se expone el proceso de diseño e implementación a nivel hardware de una red de sensores tipo sonda para el monitoreo de deslizamientos de masas de tierra, la cual está compuesta por:

- Una tarjeta maestro, que se encarga de encuestar los nodos esclavo y transmitir la información a un dispositivo de monitoreo local.
- Cuatro tarjetas esclavo, que se encargan de tomar los datos necesarios para obtener un ángulo de inclinación.
- Un dispositivo para monitoreo de datos en campo, el cual se encarga de recopilar los datos que suministra la red de sensores, a través del dispositivo maestro y los procesa en un software que entrega una gráfica en 3D por cada uno de los nodos de la red de sensores.

En la Figura 15 se observa una imagen del diagrama en bloques propuesto para la implementación de la red de sensores

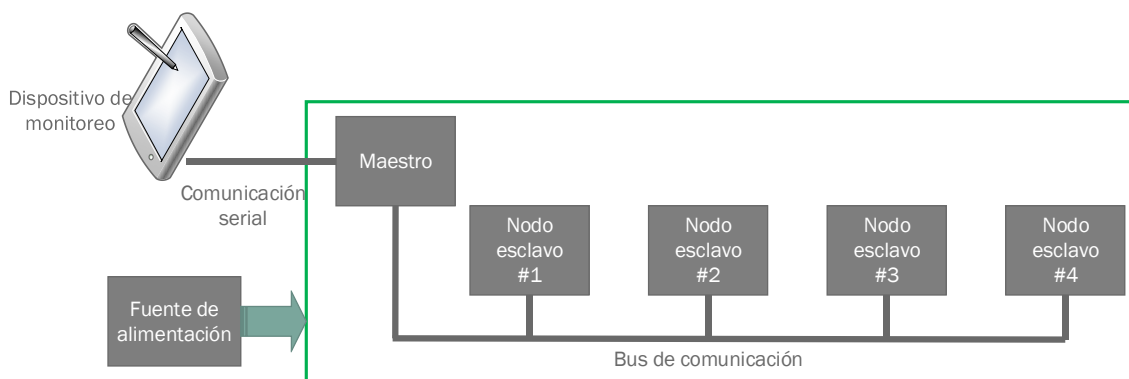


Figura 15. Diagrama en bloques red de sensores. Fuente propia.

Los temas relacionados con implementación y desarrollo de software se trataran en detalle en el capítulo 4.

3.1. Selección de dispositivos

A continuación se describe el proceso de selección de los elementos que hacen parte de la red de sensores.

3.1.1. Selección de dispositivos de nodos esclavo

El proceso de selección inicia con el diseño funcional de las tarjetas electrónicas de los nodos esclavo. A continuación se describe cada una de las etapas que componen los nodos esclavo.

Etapas de sensado: etapa encargada de obtener datos de inclinación del sitio donde se instala el nodo, de modo que posteriormente al ser procesados dichos datos se obtenga el ángulo de inclinación de lugar caso de estudio. Según el análisis del capítulo 2 esta etapa debe incluir los sensores: acelerómetro, giroscopio y magnetómetro.

Etapas de comunicación: etapa encargada de gestionar la comunicación entre cada nodo esclavo con la tarjeta maestro, donde el principal objetivo es transmitir los datos obtenidos en la etapa de sensado. Las principales características de esta etapa deben ser su robustez y alcance a largas distancias.

Etapas de adquisición y procesamiento: etapa encargada de adquirir y procesar los datos obtenidos del sensor de inclinación y esperar la encuesta del nodo maestro para responder con la transmisión de los datos procesados.

Fuente de alimentación: etapa encargada de alimentar a los nodos esclavo y al dispositivo maestro de la red de sensores. La principal característica del sistema de alimentación debe ser su fácil portabilidad.

En la Figura 16 se presenta la propuesta de un diagrama en bloques que representa la tarjeta electrónica del nodo esclavo.

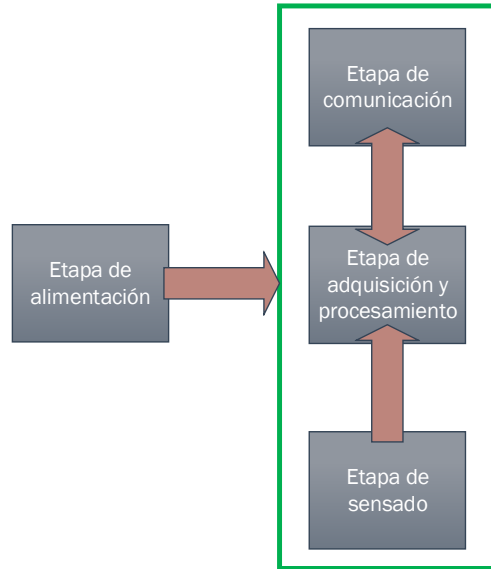


Figura 16. Diagrama en bloques nodo esclavo. Fuente propia.

A continuación se presenta el proceso de selección de los dispositivos que hacen parte de cada etapa de los nodos esclavo.

Selección etapa de sensado

En la presente sección se expone el proceso de selección del elemento sensor de la red, el cual corresponde a una Unidad de Medición Inercial IMU, que incluye acelerómetro, giroscopio y magnetómetro de nueve grados de libertad. A continuación se listan las referencias y características de los dispositivos evaluados en la selección.

Unidad de Medición Inercial MPU-9250: tiene como base el sensor MEMS de 9 ejes más reciente de InvenSense. Cada uno de estos sensores de 9 grados de libertad cuenta con una MPU-9250 con un sistema en paquete (SiP) que combina dos chips: el MPU-6500, que contiene un giroscopio de 3 ejes, así como un acelerómetro de 3 ejes, por su parte el magnetómetro de 3 ejes tiene como referencia AK8963 [22].

La MPU-9250 sustituye a la popular MPU-9150 de EOL y disminuye el consumo de energía en un 44%. Según InvenSense, "el rendimiento del ruido Gyro es 3 veces mejor, y la gama de la escala de la brújula es más de 4 veces mejor que las

ofertas competitivas". La MPU-9250 utiliza convertidores analógicos a digitales (ADC) de 16 bits para digitalizar los nueve ejes, por lo que es un dispositivo muy estable de 9 grados de libertad [22]. El costo de una MPU-9250 es de \$14.95USD.

Cabe mencionar que se encuentra gran cantidad de información sobre el uso de la MPU-9250 en línea, lo cual incluye librerías para manejo de la misma a través de tarjetas *Arduino*.

En la Figura 17 se observa una MPU-9052.

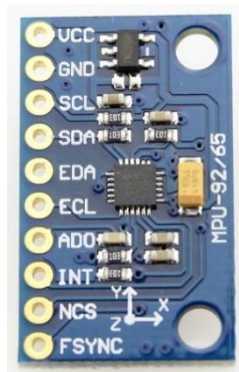


Figura 17. MPU-9052. Fuente [23].

Unidad de Medición Inercial SparkFun 9 Degrees of Freedom - Sensor Stick: es una tarjeta de sensor pequeña con 9 grados de libertad. Incluye el acelerómetro ADXL345, el magnetómetro HMC5883L y el giroscopio ITG-3200 MEMS. Tiene una interfaz I2C simple [24]. Se encuentra poca información para implementación con cualquier tipo de controlador y su costo es de \$49.95USD.

En la Figura 18 se observa la IMU de SparkFun de 9 grados de libertad.

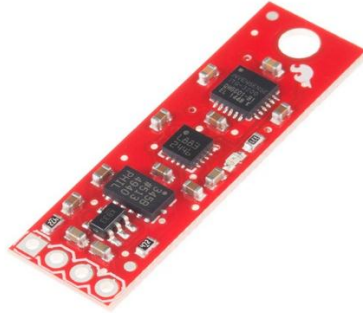


Figura 18. Sensor IMU SparkFun 9 Degrees of Freedom - Sensor Stick. Fuente: [24]

Unidad de Medición Inercial MPU- LSM9DS1: El LSM9DS1 es un sistema versátil de detección de movimiento en un chip. Alberga un acelerómetro de 3 ejes, un giroscopio de 3 ejes y un magnetómetro de 3 ejes, para un total de nueve grados de libertad (9DOF) en un solo circuito integrado. Soporta las interfaces I2C y SPI [25]. Se encuentra poca información para implementación con cualquier tipo de controlador y su costo es de \$24.95USD [26].

En la Figura 19 se observa la MPU- LSM9DS1.

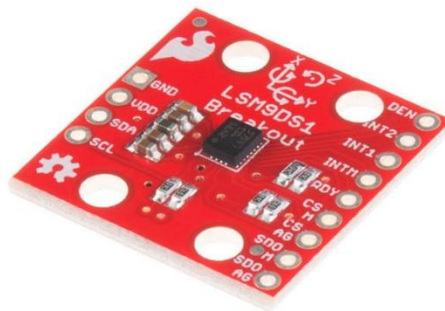


Figura 19. MPU- LSM9DS1. Fuente: [26].

Luego de analizar la información recopilada en la investigación de sensores disponibles a nivel comercial se opta por el sensor MPU-9250, ya que como se mencionó anteriormente se encuentra una gran cantidad de información en línea para su uso y presenta el menor costo de las opciones planteadas. En el anexo A se presenta la hoja técnica de datos de la MPU-9250.

Selección etapa de comunicación

Debido a que el principal uso de la red de sensores es ser enterrada en una masa de tierra para la medición de los ángulos de inclinación que caracterizan un terreno, es necesario que la etapa de comunicación sea robusta, por lo cual el proceso de selección se realiza teniendo en cuenta buses de comunicación de tipo industrial. En el proceso de selección se tendrán en cuenta las características listadas a continuación:

- Alcance.
- Cantidad de dispositivos en la red.

En el proceso de investigación se encuentran las opciones que se listan a continuación:

1. Estándar RS422
2. Estándar RS485
3. Power Line Communication (PLC)
4. Bus CAN

A continuación se describe cada una de las opciones planteadas.

Estándar RS422: Actualmente conocido por la norma europea UIT-T T-REC-V.11, también identificado como X.27 confirmada por la TIA (Telecommunications Industry Association) en 2005. La máxima capacidad de control de terminales para el estándar es de 10 equipos receptores simultáneos por emisor [27].

El alcance de la transmisión está dado por la relación existente entre el volumen de los datos a transferir y el tiempo de la señal en la portadora determinado por la velocidad de transferencia de donde se obtiene que la longitud máxima del cable es de 1.200 m y la velocidad máxima de 10 Mbps que se obtiene en una distancia de 12 m [27].

Estándar RS485: Es una de las especificaciones de la norma RS-449 publicada como estándar en 1983 en donde se especifican las características eléctricas de un circuito de comunicación digital de salida ya sea el estado “0” o “1” lógicos mediante una señal diferencial más una señal de alta impedancia o “tercer estado”

con lo cual es posible conectar más de un emisor en la red, motivo por el cual, es muy útil en redes locales industriales a dos (2) hilos. Actualmente conocido como la norma TIA-485-A.222 confirmada por la TIA (Telecommunications Industry Association) en 2003 [27].

Permite la conexión de hasta 32 emisores con 32 receptores en transmisión doble simultánea full dúplex capaz de enlazar procesadores de comunicación principal (master) con procesadores subordinados (slaves) cuyo funcionamiento (acceso priorizado) está definido por los mismos arreglos topológicos de las redes de datos [27].

Power Line Communication (PLC): es una tecnología de comunicación que envía datos a través de cables de alimentación existentes. Esta tecnología puede enviar energía y datos entre nodos de PLC de una manera half-duplex [28].

La combinación de potencia y datos en las mismas líneas permite a la tecnología PLC eliminar la necesidad de cables adicionales para interconectar dispositivos. PLC ofrece un medio de comunicación rentable para una amplia gama de aplicaciones en entornos que de otro modo podrían resultar demasiado costosos para la red. Por ser una tecnología de comunicaciones, PLC se puede dividir en dos categorías:

PLC de banda ancha: es apropiado para conexiones de red de banda ancha de alta velocidad, como Internet. Por lo general, opera a frecuencias más altas (1.8-250 MHz), altas velocidades de datos (hasta 100s de Mbps) y se utiliza en aplicaciones de menor alcance [28].

PLC de banda estrecha: es útil para aplicaciones que requieren control de banda estrecha o recolección de datos de bajo ancho de banda, donde es esencial un bajo coste y una alta fiabilidad. Por lo general, opera a frecuencias más bajas (3-500 kHz), velocidades de datos más bajas (hasta 100s de kbps), y tiene un rango más largo (hasta varios kilómetros), que se puede ampliar usando repetidores [28].

Desarrollar una solución efectiva de PLC tiene sus desafíos. Normalmente, las líneas eléctricas son ruidosas y requieren una arquitectura de sistema robusta para garantizar la fiabilidad de los datos [28].

Ya que la mayoría de las implementaciones de PLC DC deben soportar un gran número de nodos (10 – 1000) conectados a través de un único bus de línea de alimentación, y para que las transmisiones lleguen a todos los nodos sin atenuación significativa, el requisito clave es que la impedancia de origen sea menor que la impedancia de carga, se pueden conectar tantos nodos como lo permita el requisito anterior [28].

Bus Controller Area Network (CAN): es un protocolo de comunicación serial orientado a control distribuido en tiempo real, es decir todos los nodos de la red son capaces de enviar y recibir datos, así como solicitar información de cualquier otro nodo de la red. Las especificaciones de este protocolo se encuentran regidas bajo el estándar ISO-11898 [29].

Se trata de un protocolo orientado a mensajes, y no a direcciones, es decir, la información que se va a intercambiar se descompone en mensajes, a los cuales se les asigna un identificador y son encapsulados en tramas para su transmisión. Cada mensaje tiene un identificador único dentro de la red, a partir del cual los nodos deciden aceptar o no dicho mensaje. Además están priorizados. La información es enviada en la red a todos los destinos de forma simultánea. Así que los destinos habrán de saber si la información les concierne o deben rechazarla. Es posible conectar hasta 110 dispositivos en una sola red CAN [30].

A continuación en la Tabla 2 se presenta una tabla comparativa de las tecnologías a implementar para cada protocolo descrito anteriormente.

Tabla 2. Características principales de buses de comunicación.

	Estándar RS422	Estándar RS485	Power Line Communication (PLC)	Bus CAN
Circuito integrado	SN65176BDR	SN65176BDR	CY8CPLC10-28PVXI	MCP2515T-I/SO

Costo unitario [USD]	0,77	0,77	10,51	1,82
Cantidad de nodos en la red	10	32	1000	110
Alcance según protocolo	1200 metros	1200 metros	3000 metros	1200 metros

De la Tabla 2 se deduce que la mejor opción para implementar la etapa de comunicación en la red de sensores, es con el integrado SN65176BDR y el estándar RS485, debido a su amplio soporte de transceptores de carga, 32 en una red, bajo costo, ya que comparado con la tecnología PLC es aproximadamente un 92% más económico y un 52% más económico que la tecnología de BUS CAN, así mismo cabe resaltar la gran cantidad de documentación para su implementación ya que inclusive se encuentran librerías para manejo con tarjetas de desarrollo Arduino.

Selección etapa de adquisición y procesamiento

Como se mencionó en la sección 3.1.1. *Selección etapa de sensado*, existen librerías para tarjetas de desarrollo Arduino que gestionan el manejo del sensor seleccionado, MPU-9250, ya que al implementar dichas librerías se acelera el proceso de desarrollo software se propone que la etapa de adquisición y procesamiento se implemente con una tarjeta de desarrollo Arduino, teniendo en cuenta que los nodos esclavo deben ser de tamaño reducido se proponen las referencias más pequeñas en el proceso de selección.

Las principales características que debe tener la etapa de adquisición y procesamiento, se listan a continuación:

1. Tamaño reducido.
2. Bajo costo.
3. Disponibilidad de puertos seriales, tanto para depuración de código como para la comunicación con los nodos esclavo.
4. Facilidad de programación.

A continuación se presenta una corta descripción de las tarjetas de desarrollo propuestas.

Arduino Nano: es una tarjeta de desarrollo pequeña y completa, basada en el ATmega328. El Arduino Nano es una versión con dispositivos de montaje superficial integrados con un conector USB usado para programar y alimentar la tarjeta [31]. Su costo es de \$21.49USD.

En la Tabla 3 se presentan las características de la tarjeta de desarrollo Arduino Nano.

Tabla 3. Características de tarjeta de desarrollo Arduino Nano

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de entrada recomendado	7-12 V
Pines de I/O digitales	14 (6 con salida PWM)
Pines de entrada analógica	8
Memoria Flash	32 KB. 2 KB se usan para el bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Largo	45 mm
Ancho	18 mm

En la Figura 20 se observa la tarjeta de desarrollo Arduino Nano.



Figura 20. Tarjeta de desarrollo Arduino Nano. Fuente [31]

Arduino Pro Mini: es una tarjeta de desarrollo pequeña y completa, basada en el ATmega328; usada comúnmente en dispositivos instalados de forma permanente, existen dos versiones una que opera a 3.3V y 8 MHz, y la otra a 5V y 16 MHz [32]. El Arduino Pro Mini es una versión con dispositivos de montaje superficial que no cuenta con puerto de programación, por lo cual es necesario adquirir un programador que tiene un costo adicional de \$27.95USD.

En la Tabla 4 se presentan las características de la tarjeta de desarrollo Arduino Pro Mini.

Tabla 4. Características de tarjeta de desarrollo Arduino Pro Mini.

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de operación	5 V
Pines de I/O digitales	14 (6 con salida PWM)
Pines de entrada analógica	6
Memoria Flash	32 KB. De los cuales 2KB se usan para el bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Largo	33 mm
Ancho	18 mm

En la Figura 21 se observa la tarjeta de desarrollo Arduino Pro Mini.

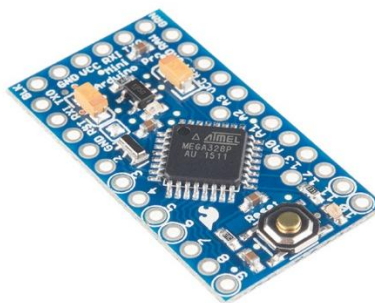


Figura 21. Tarjeta de desarrollo Arduino Pro Mini. Fuente: [33]

En la Figura 22 se observa el programador FTDI SmartBasic de Sparkfun.



Figura 22. Tarjeta de programación FTDI SmartBasic de Sparkfun. Fuente: [33]

Arduino Pro Micro: tarjeta de desarrolla que se basa en un ATmega32U4. El transceptor USB dentro de la 32U4 permite agregar conectividad USB y evitar el costo adicional de un programador externo [34]. Su costo es de \$15.95USD.

En la Tabla 5 se presentan las características de la tarjeta de desarrollo Arduino Pro Micro.

Tabla 5. Características de tarjeta de desarrollo Arduino Pro Micro.

Microcontrolador	ATmega32U4
Voltaje de operación	5 V
Pines de I/O digitales	20 (7 con salida PWM)
Pines de entrada analógica	12
Memoria Flash	32 KB. De los cuales 2KB se usan para el bootloader
SRAM	2.5 KB
EEPROM	1 KB
Largo	33 mm
Ancho	18 mm

En la Figura 23 se observa la tarjeta de desarrollo Arduino Pro Micro.

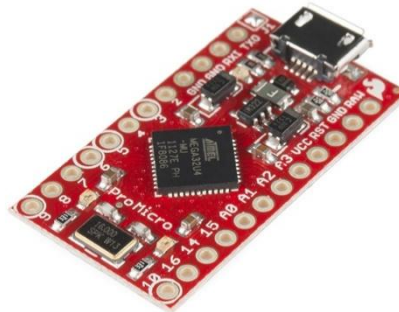


Figura 23. Tarjeta de desarrollo Arduino Pro Micro. Fuente: [35]

Luego de hacer una consulta de las características de las tarjetas de desarrollo Arduino se genera una tabla con las características más relevantes para el desarrollo de la red de sensores, con el fin de seleccionar la opción más adecuada. A continuación se presenta el resultado obtenido.

Tabla 6. Tabla de comparación de tarjetas de desarrollo Arduino.

Característica \ Tarjeta	Arduino Nano	Arduino Pro Mini	Arduino Pro Micro
Tamaño [mm]	18x45	18x33	18x33
Puerto serial	Si	Si	Si
SRAM [KB]	2	1	2,5
Puerto de programación en tarjeta	Si	No	Si
Costo tarjeta de desarrollo [USD]	21,49	9,95	15,95
Costo de componentes adicionales [USD]	0	27,95	0

Del análisis de la

Tabla 6 se obtiene como resultado que la opción más adecuada para la implementación de la etapa de adquisición y procesamiento en los nodos esclavo de la red de sensores, es el Arduino Pro Micro ya que es la más económica de las tarjetas de desarrollo analizadas y a su vez cuenta con mayor capacidad de memoria SRAM, lo cual presenta una ventaja en la adquisición de datos en los nodos del sistema.

Selección de etapa de alimentación

En el diseño de la red de sensores se plantea la implementación de una fuente de alimentación común tanto a los nodos esclavo como al dispositivo maestro del sistema; teniendo en cuenta que una de las principales características de la etapa de alimentación es que sea portable, se propone el uso de una batería seca de 12 voltios, la cual brinda suficiente autonomía a la red de sensores para realizar pruebas en campo y por su tamaño y peso es fácil de transportar.

3.1.2. Selección de dispositivos de nodo maestro

En la presente sección se describe el diseño funcional de las tarjetas electrónicas del nodo maestro de la red de sensores. A continuación se describe cada una de las etapas que componen el nodo maestro.

Etapas de comunicación: etapa encargada de gestionar la comunicación entre el nodo maestro y cada nodo esclavo. En esta etapa también se gestiona la comunicación con el dispositivo de monitoreo local. Las principales características de esta etapa deben ser su robustez, alcance a largas distancias y cantidad de nodos que se conectan a la red.

Etapas de adquisición y procesamiento: etapa encargada de encuestar a cada nodo esclavo de la red de sensores, con el fin de adquirir los datos de inclinación para luego procesarlos y finalmente enviarlos al dispositivo de monitoreo local.

Fuente de alimentación: etapa encargada de alimentar a los nodos esclavo y al dispositivo maestro de la red de sensores. La principal característica del sistema de alimentación debe ser su fácil portabilidad.

En la Figura 24 se presenta la propuesta de un diagrama en bloques que representa la tarjeta electrónica del dispositivo maestro.

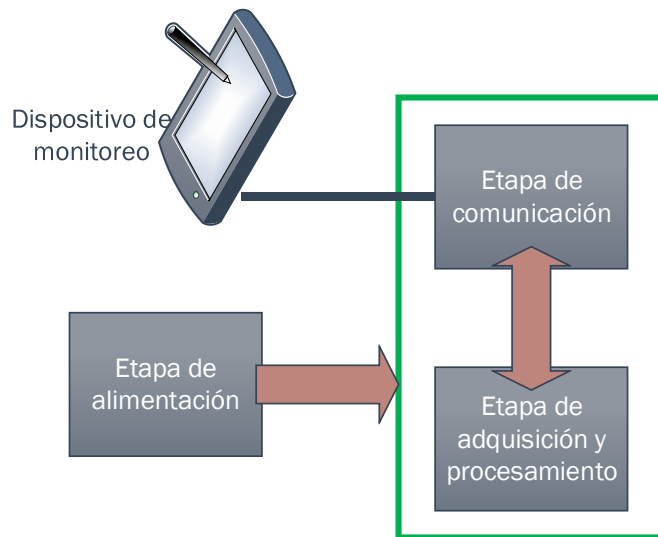


Figura 24. Diagrama en bloques nodo maestro. Fuente propia.

Como se puede ver el diseño funcional del nodo maestro es similar al de los nodos esclavo y teniendo en cuenta que, como se describió anteriormente, las etapas en los dos casos realizan tareas afines, se propone que los componentes de las etapas del nodo maestro sean los mismos usados en las etapas de los nodos esclavo.

Hasta este punto se ha realizado la selección de todos los componentes tanto de los nodos esclavo como del nodo maestro, por lo cual en la siguiente sección se describe el proceso de diseño electrónico de las tarjetas que conforman la red de sensores.

3.2. Diseño electrónico

En esta sección se presenta el resultado del diseño electrónico de las tarjetas de la red de sensores, el diseño se desarrolló con la herramienta CAD CadSoft Eagle bajo una licencia Freeware (Software gratis). A continuación se presenta el diseño electrónico de los nodos esclavo.

3.2.1. Diseño electrónico de nodos esclavo

El diseño electrónico de la tarjeta de los nodos esclavo incluye el módulo sensor de inclinación IMU-9250, es necesario aclarar que dicho módulo no requiere etapa de acondicionamiento alguna, lo cual permite realizar un diseño de dimensiones reducidas, lo cual es fundamental en pruebas de campo ya que los agujeros que se deben abrir para realizar los estudios deben ser de pequeños diámetros.

En la Figura 25 se observa el diseño esquemático de la tarjeta electrónica de los nodos esclavo, donde se encuentra cada etapa descrita en la sección 3.1.1. *Selección de dispositivos de nodos esclavo.*

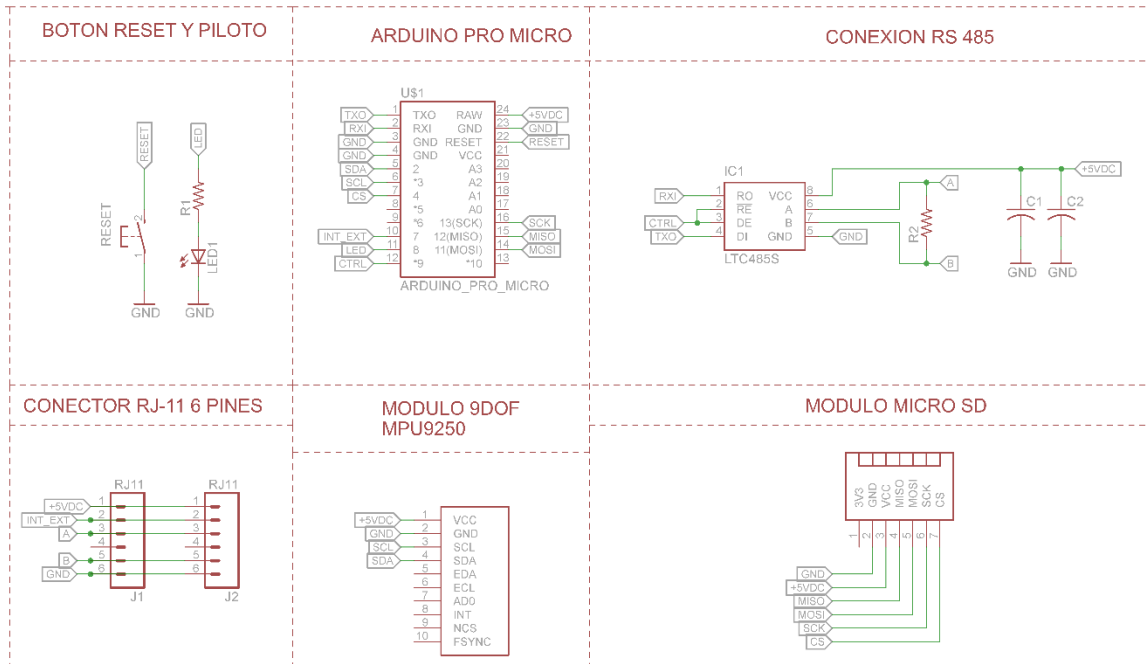


Figura 25. Diseño esquemático de tarjeta electrónica de nodos esclavo. Fuente propia

3.2.2. Diseño electrónico de nodo maestro

En la Figura 26 se observa el diseño esquemático de la tarjeta electrónica del nodo maestro, donde se encuentra cada etapa descrita en la sección 3.1.2. *Selección de dispositivos de nodo maestro.*

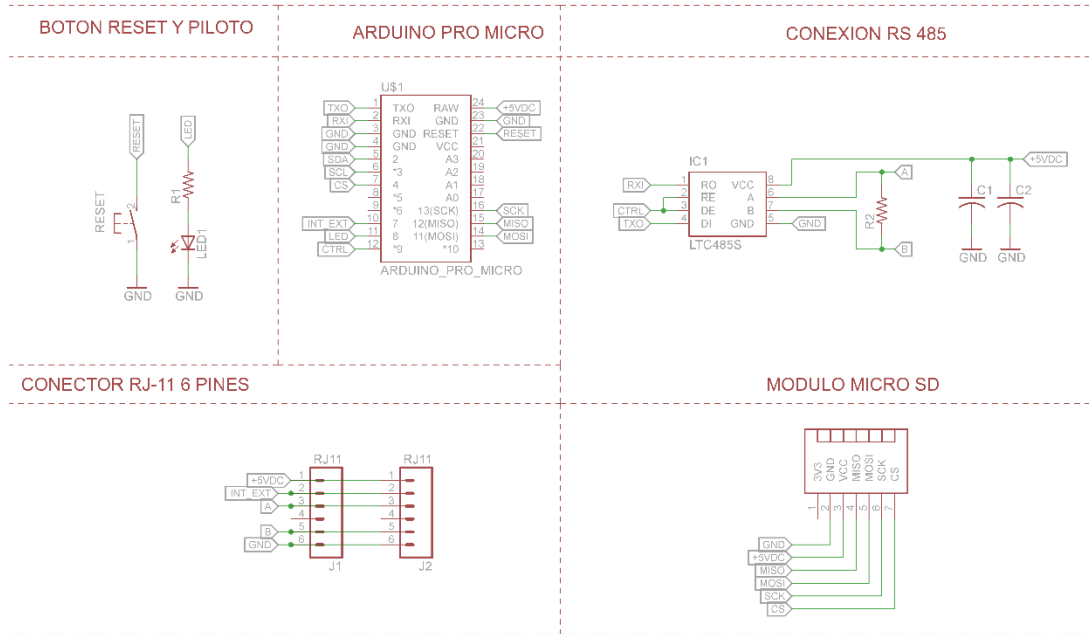


Figura 26. Diseño esquemático de tarjeta electrónica de nodo maestro. Fuente propia

Una vez se obtienen los diseños de los circuitos impresos PCB de las tarjetas de la red de sensores se procede con el proceso de caracterización de los sensores de inclinación IMU-9250, el cual se presenta en la siguiente sección.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE DEL SISTEMA

En el presente capítulo se plantea el diseño e implementación software de la red de sensores, se inicia con una breve explicación del proceso de comunicación de la red de sensores, seguido del proceso de implementación del filtro de Kalman para la tarjeta Arduino Pro Micro de los nodos esclavo y finalmente se presentan las descripciones de los programas tanto de adquisición y control como de la interfaz gráfica de usuario.

4.1. Proceso de comunicación

La topología de la red implementada es tipo bus a nivel físico y la arquitectura de transferencia de información es de tipo maestro-esclavo a través del bus RS485, solo un dispositivo puede transmitir al tiempo, el maestro es quien inicia la comunicación encuestando a todos los nodos esclavo uno por vez hasta que se recolecta toda la información.

Para direccionar la información entre los dispositivos se estructuró una trama que contiene los campos mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Estructura de trama de comunicación

Start		Longitud	ID Org.	ID Dest	Payload (Máximo 249 Bytes)			CRC	
2Byte		1Byte	1Byte	1Byte	1Byte	1Byte	-----	1Byte	1Byte
\$	@	0 – 255	0 – 255	0 – 255	0 – 255	0 – 255	-----	0 – 255	0 – 255
0x24	0x40	00-FF	00-FF	00-FF	00-FF	00-FF	-----	00-FF	00-FF

A continuación se describe cada uno de los campos que conforman la estructura de la trama.

Start: Está conformada por 2 bytes tienen la función de permitir detectar una trama entrante, los caracteres que conforman este código son \$ @.

Longitud: Indica la longitud de toda la trama que máximo puede ser de 255 bytes.

ID Origen: Indica el código de identificación del nodo o dispositivo que está generando y transmitiendo una trama, en la Tabla 8 se muestran los códigos definidos para los dispositivos del proyecto.

ID Destino: Indica el código de identificación del nodo o dispositivo al que se dirige y debe procesar la trama, en la Tabla 8 se muestran los códigos definidos para los dispositivos de la red de sensores.

Tabla 8. Códigos para identificar nodos esclavo de la sonda de inclinación.

Código identificador	Descripción
0xAA	Código identificador del dispositivo Maestro
0x01	Código identificador dispositivo Nodo 1
0x02	Código identificador dispositivo Nodo 2
0x03	Código identificador dispositivo Nodo 2
0x04	Código identificador dispositivo Nodo 4

Payload: También llamada carga útil, representa la información o contenido importante a transmitir en la trama, en ella se puede enviar la información que el usuario desee, para el presente proyecto cada nodo debe empaquetar la información del sensor y transmitirla al nodo maestro según solicitud de este último.

CRC: Código de verificación, se debe generar al transmitir la trama y en el dispositivo que la recibe se debe calcular y comparar con el recibido, si coinciden se afirma que la trama se ha recibido con éxito. El código CRC para la estructura planteada se calcula mediante una operación XOR entre los byte comprendidos entre el byte de longitud y el último byte del payload.

4.2. Implementación filtro de Kalman

En la presente sección se describe el proceso matemático para realizar la implementación del filtro de Kalman en la tarjeta de desarrollo Arduino

De las ecuaciones (51) y (52), se tiene el siguiente desarrollo del filtro Kalman.

- **Etapa de predicción**

$$\hat{X}_{\bar{k}} = \hat{A}X_{\bar{k}-1} + Bu_k \quad (53)$$

En función del modelo que se tiene:

$$\begin{bmatrix} \angle^- \\ deriva^- \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \angle \\ deriva \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k \quad (54)$$

Dónde:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (55)$$

Y

$$B = \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} \quad (56)$$

Además:

$$\hat{X}_{\bar{k}} = \begin{bmatrix} \angle^- \\ deriva^- \end{bmatrix}_k \quad (57)$$

Con lo cual la implementación en el microcontrolador estaría dada por:

$$\angle^-_k = \angle_{k-1} + u_k * dt - w_{k-1} * dt \quad (58)$$

Y

$$deriva^-_k = deriva_{k-1} \quad (59)$$

Dado:

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (60)$$

Y

$$Q = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.003 \end{bmatrix} \quad (61)$$

Donde:

- $Q[0][0] = 0.001$
- $Q[0][1] = 0$
- $Q[1][0] = 0$
- $Q[1][1] = 0.003$

La matriz de covarianza se estima mediante experimentación, los valores consignados en Q son valores comunes para el inicio del algoritmo.

Luego:

$$P_k^- = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{k[0][0]} & p_{k[0][1]} \\ p_{k[1][0]} & p_{k[1][1]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -dt & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q[0][0] & Q[0][1] \\ Q[1][0] & Q[1][1] \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$P_k^- = \begin{bmatrix} p_{k[0][0]} - dt * p_{k[1][0]} & p_{k[0][1]} - p_{k[1][1]} * dt \\ p_{k[1][0]} & p_{k[1][1]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -dt & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q[0][0] & Q[0][1] \\ Q[1][0] & Q[1][1] \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$P_k^- = \begin{bmatrix} p_{k[0][0]} - dt * p_{k[1][0]} - p_{k[0][1]} * dt + p_{k[1][1]} * dt^2 & p_{k[0][1]} - p_{k[1][1]} * dt \\ p_{k[1][0]} - p_{k[1][1]} * dt & p_{k[1][1]} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q[0][0] & Q[0][1] \\ Q[1][0] & Q[1][1] \end{bmatrix} \quad (64)$$

La implementación para la matriz estimada de covarianza está dada por:

$$P_k^- [0][0] = Q[0][0] + P[0][0] - dt * P[1][0] - dt * P[0][1] + dt^2 P[1][1] \quad (65)$$

$$P_k^- [0][1] = Q[0][1] + P[0][1] - dt * P[1][1] \quad (66)$$

$$P_k^- [1][0] = Q[1][0] + P[1][0] - dt * P[1][1] \quad (67)$$

$$P_k^- [1][1] = Q[1][1] + P[1][1] \quad (68)$$

- **Etapas de corrección**

Dado que:

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

Con:

$$\begin{aligned} H &= (1 \ 0) \\ R &= 0.05 \end{aligned} \quad (69)$$

H es la relación entre las mediciones y el vector de estado cuyo valor inicial comienza en (1 0), R es la matriz de covarianza del ruido blanco de todos los espectros, lo que permite observar la desviación que tiene el ruido en función de la señal

En función del sistema utilizado se tiene:

$$K = \frac{\begin{pmatrix} p_{k[0][0]} & p_{k[0][1]} \\ p_{k[1][0]} & p_{k[1][1]} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}}{(1 \ 0) \begin{pmatrix} p_{k[0][0]} & p_{k[0][1]} \\ p_{k[1][0]} & p_{k[1][1]} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + R} \quad (70)$$

$$K = \frac{\begin{pmatrix} p_{k[0][0]} \\ p_{k[1][0]} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} p_{k[0][0]} & p_{k[0][1]} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + R} \quad (71)$$

$$K = \frac{\begin{pmatrix} p_{k[0][0]} \\ p_{k[1][0]} \end{pmatrix}}{P_k^- [0][0] + R} \quad (72)$$

La ganancia Kalman estaría dada por:

$$K[0][0] = \frac{P_k^- [0][0]}{P_k^- [0][0] + R} \quad (73)$$

$$K[1][0] = \frac{P_k^- [1][0]}{P_k^- [0][0] + R} \quad (74)$$

Dado que:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{\bar{k}} + K_k(z_k - H\hat{X}_{\bar{k}}) \quad (75)$$

En función del sistema utilizado se tiene:

$$\begin{bmatrix} \angle \\ deriva \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \angle^- \\ deriva^- \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} K[0][0] \\ K[1][0] \end{bmatrix} \left\{ z_k - \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \angle^- \\ deriva^- \end{bmatrix}_k \right\} \quad (76)$$

$$\begin{bmatrix} \angle \\ deriva \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \angle^- \\ deriva^- \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} K[0][0] \\ K[1][0] \end{bmatrix} [z_k \quad -\angle_k^-] \quad (77)$$

$$\begin{bmatrix} \angle \\ deriva \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \angle^- \\ deriva^- \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} K[0][0] * [z_k \quad -\angle_k^-] \\ K[1][0] * [z_k \quad -\angle_k^-] \end{bmatrix} \quad (78)$$

Ahora la implementación para los datos corregidos está dada por:

$$\angle = \angle_k^- + K[0][0] * [z_k - \angle_k^-] \quad (79)$$

$$deriva = deriva_{\bar{k}}^- + K[1][0] * [z_k - \angle_k^-] \quad (80)$$

Donde:

z_k : Ángulo calculado mediante el acelerómetro

Dado:

$$P_k = [I - K_k H] P_k^- \quad (81)$$

Realizando las operaciones se obtiene:

$$P_k = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K[0][0] \\ K[1][0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} * \begin{bmatrix} P_k^- [0][0] & P_k^- [0][1] \\ P_k^- [1][0] & P_k^- [1][1] \end{bmatrix} \quad (82)$$

$$P_k = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K[0][0] & 0 \\ K[1][0] & 0 \end{bmatrix} \right\} * \begin{bmatrix} P_k^- [0][0] & P_k^- [0][1] \\ P_k^- [1][0] & P_k^- [1][1] \end{bmatrix} \quad (83)$$

$$P_k = \begin{bmatrix} 1 - K[0][0] & 0 \\ -K[1][0] & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_k^- [0][0] & P_k^- [0][1] \\ P_k^- [1][0] & P_k^- [1][1] \end{bmatrix} \quad (84)$$

$$P_k = \begin{bmatrix} P_k^- [0][0] - P_k^- [0][0] * K[0][0] & P_k^- [0][1] - P_k^- [0][1] * K[0][0] \\ P_k^- [1][0] - P_k^- [0][0] * K[1][0] & P_k^- [1][1] - P_k^- [0][1] * K[1][0] \end{bmatrix} \quad (85)$$

Ahora la implementación para la matriz de covarianza corregida estaría dada por:

$$P_k [0][0] = P_k^- [0][0] - P_k^- [0][0] * K[0][0] \quad (86)$$

$$P_k [0][1] = P_k^- [0][1] - P_k^- [0][1] * K[0][0] \quad (87)$$

$$P_k [1][0] = P_k^- [1][0] - P_k^- [0][0] * K[1][0] \quad (88)$$

$$P_k [1][1] = P_k^- [1][1] - P_k^- [0][1] * K[1][0] \quad (89)$$

Finalmente las ecuaciones a implementar en la tarjeta de desarrollo Arduino son: la ecuación (69), la ecuación (75) y la ecuación (85).

En las siguientes secciones se presenta el diseño e implementación del código de los dispositivos de la red de sensores así como de la interfaz gráfica de usuario.

4.3. Implementación software de nodos esclavo

El firmware de los nodos esclavo se implementó a través del entorno de desarrollo Arduino en la versión 1.65. El lenguaje de programación se basa en C++. En la

Figura 27 se observa el diagrama de flujo del firmware implementado en los nodos esclavo. En el anexo B se encuentra el código implementado.

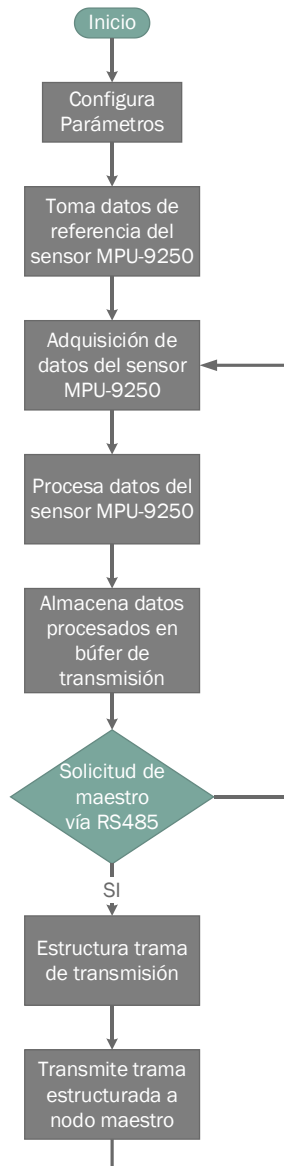


Figura 27. Diagrama de flujo firmware de nodos esclavo. Fuente propia

4.4. Implementación software de nodo maestro

El firmware del nodo maestro se implementó a través del entorno de desarrollo Arduino en la versión 1.65. El lenguaje de programación se basa en C++. En la

Figura 28 se observa el diagrama de flujo del firmware implementado en el nodo maestro. En el anexo C se encuentra el código implementado.

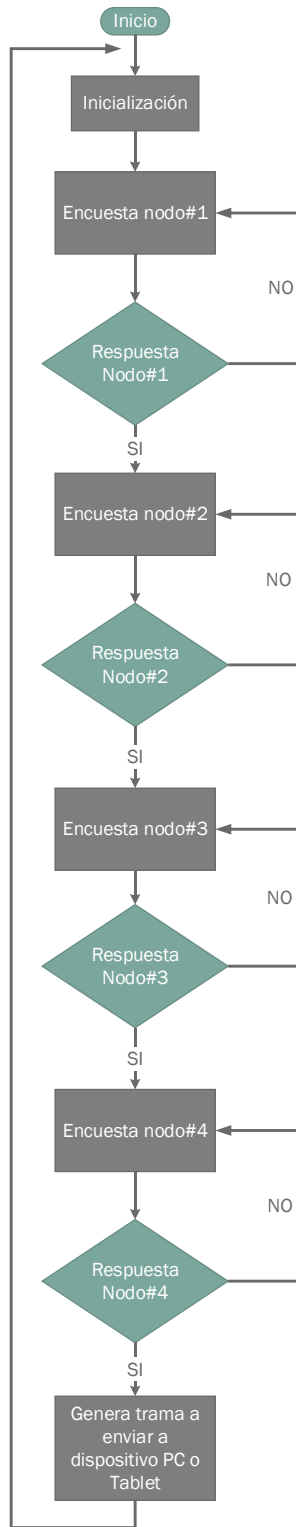


Figura 28. Diagrama de flujo firmware de nodo maestro. Fuente propia

4.5. Implementación firmware de adquisición de datos

Se implementa un firmware para una tarjeta de desarrollo Arduino con el fin de adquirir datos de los sensores de inclinación MPU-9250, de modo que sea posible caracterizar estos últimos. Dicho firmware se implementó a través del entorno de desarrollo Arduino en la versión 1.65. El lenguaje de programación se basa en C++. En la Figura 29 se observa el diagrama de flujo del firmware implementado.

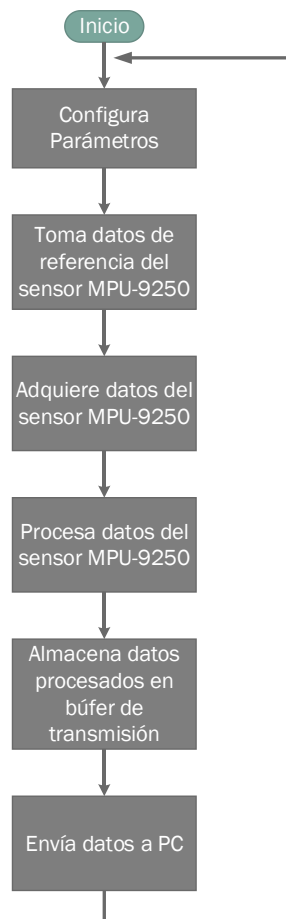


Figura 29. Diagrama de flujo firmware de adquisición de datos para caracterización de IMU. Fuente propia.

4.6. Implementación software interfaz gráfica de usuario

La interfaz gráfica de usuario se desarrolló con el software Labview de National Instruments, debido a sus grandes prestaciones en el desarrollo de aplicaciones de alto desempeño, ya que la interfaz que se propone debe entregar graficas en 3D para realizar el monitoreo de forma local, así mismo debe permitir almacenar datos en el dispositivo donde se ejecuta la aplicación. Para el desarrollo se emplea la versión estudiantil.

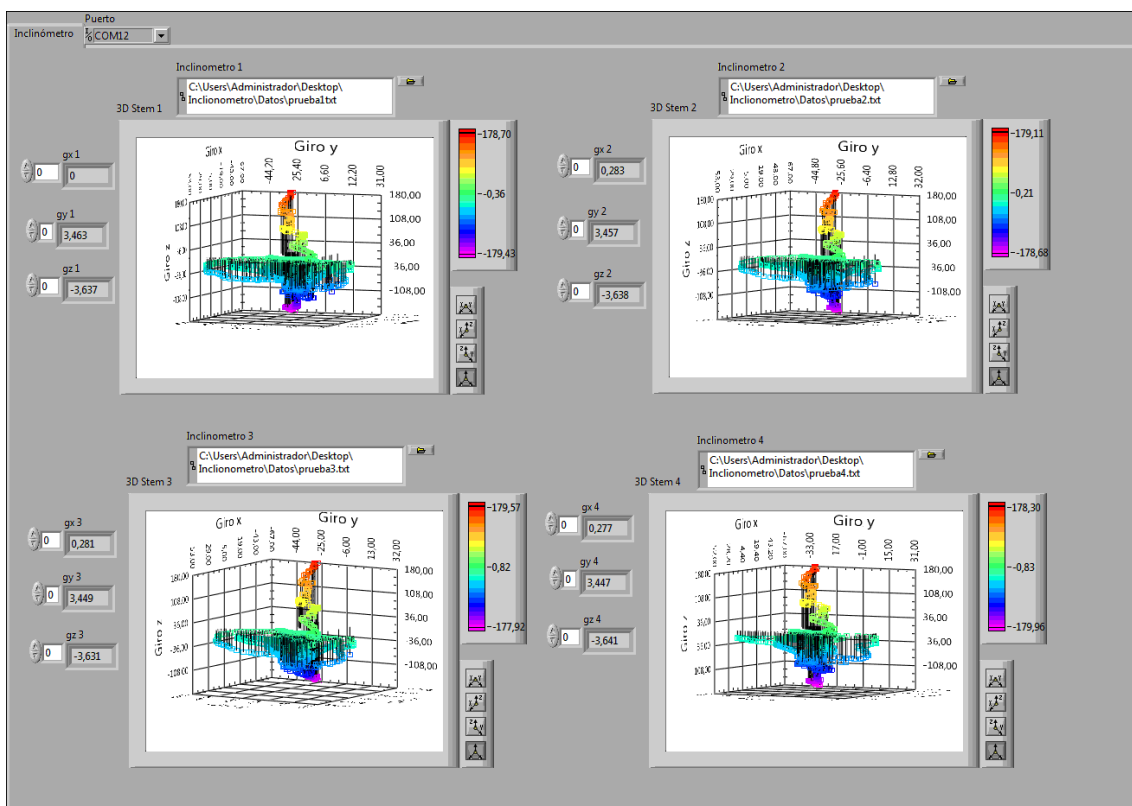


Figura 30. Interfaz gráfica de usuario. Fuente propia

Como se observa en la Figura 30 cada una de las IMU posee un ventana propia donde se despliega los valores correspondientes a los giros en cada eje, por otro lado cada ventana tiene un path donde se almacena la información proporcionada por cada nodo esclavo en una extensión CSV, dicha información puede ser analizada por cualquier plataforma que compatible con dicha la extensión.

Para el uso de la aplicación se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- La plataforma solo necesita definir el archivo donde se almacena la información si dicho archivo no se encuentra definido automáticamente sale un error de apertura de la extensión.
- Se necesita definir el puerto serial por el cual el protocolo de comunicación hará la transacción de la información entre la sonda y la aplicación si dicho puerto no se encuentra establecido la comunicación no se establece y de la misma manera saldrá un error de conexión.
- La aplicación funciona como un master dentro de la red en el protocolo de comunicación, donde secuencialmente pide los datos a cada uno de los nodos esclavos respondiendo de manera ordenada, dichos valores son pintados de manera tridimensional mostrando toda las componentes de los giros para cada una de las IMU.

El panel de programación se muestra en la Figura 31

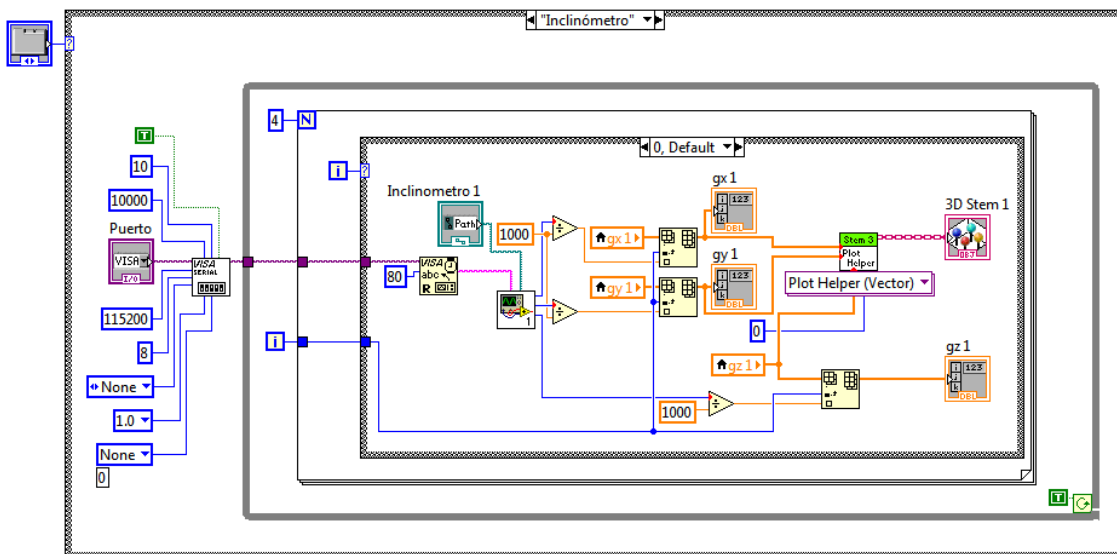


Figura 31. Panel de programación. Fuente propia

La Figura 31 muestra los VIs necesarios para graficar la información que se obtiene de las IMU, se establece el protocolo de comunicación RS-232 a una velocidad de transmisión de 115200 entre el maestro y los esclavos, dentro de un ciclo infinito se ejecuta un ciclo repetitivo de 4 veces donde cada ciclo está referenciado a cada una de las IMU, los datos se organizan en tres vectores X, Y y

Z, para cada sensor, los vectores son pasados al *VI 3D stream* el cual se encarga de graficar tridimensionalmente la información.

Al obtener información tridimensional de los cambios que sufre cada nodo esclavo en función del tiempo, es posible determinar si el terreno donde se instala la red de sensores es propenso a desplazarse o mantiene su estado original.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

El presente capítulo inicia con la descripción del proceso de caracterización de los sensores de inclinación IMU-9250, luego se muestran las pruebas realizadas en laboratorio a la red de sensores implementada con sus respectivos resultados.

5.1. Caracterización de sensores de inclinación IMU-9250

A continuación se presenta el proceso de caracterización realizado a los sensores de inclinación con el propósito de determinar algunos parámetros relevantes, tales como el error acumulativo del giróscopo y el offset de los acelerómetros, lo cuales se deben tener en cuenta para obtener una medida óptima de las aceleraciones y giros. El procedimiento de medición se hace sobre los cuatro sensores de medida de referencia inercial. Posteriormente los valores de los parámetros analizados serán compensados y corregidos mediante el filtro de Kalman.

5.1.1. Procedimiento de caracterización de sensores MPU-9250

En la presente sección se describe el procedimiento de caracterización de los sensores de medida de referencia inercial MPU-9250, el procedimiento descrito será el mismo para cada uno de los cuatro sensores.

En la Tabla 9 se listan los materiales requeridos en el proceso de caracterización.

Tabla 9. Materiales para caracterización de sensores de medida de referencia inercial.

Descripción	Cantidad
Sensor de medida de referencia inercial MPU-9250	4

Protoboard	1
Tarjeta de desarrollo Arduino	1
Computador con software de almacenamiento de datos en formato CSV	1

A continuación se describe el proceso de caracterización de los sensores de medida de referencia inercial:

1. Ubicar el sensor de referencia inercial a caracterizar en una protoboard, como se observa en la Figura 32.
2. Conectar el sensor de referencia inercial a caracterizar al puerto I2C de la tarjeta de desarrollo Arduino, como se observa en la Figura 32, el cual tiene grabado un programa de adquisición de datos, el programa implementado se describe en la sección 4.5. *Implementación firmware de adquisición de datos*.
3. Abrir el Software Interfaz de usuario desarrollado en Labview en un PC, la interfaz se describe en la sección 4.5. *Implementación software interfaz gráfica de usuario*.
4. Conectar la tarjeta de desarrollo Arduino al PC.
5. Asegurarse que el sensor inercial a caracterizar permanezca estático.
6. Esperar entre 5 y 10 segundos para que la interfaz de usuario capture los datos de la IMU a caracterizar.
7. Graficar los datos obtenidos en formatos CSV.

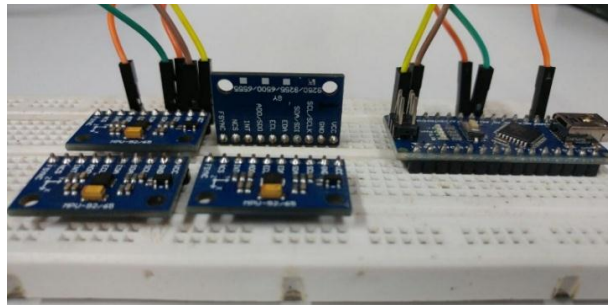


Figura 32. Montaje para para caracterización de IMU-9250. Fuente propia

5.1.2. Caracterización IMU#1

1. Se ubicó el sensor MPU-9250 paralelo a la protoboard como se observa en la Figura 32, de modo que la componente Z de la IMU coincida con el vector de gravedad.
2. Se conectó la IMU#1 al puerto I2C de la tarjeta de desarrollo Arduino.
3. Se abrió la Interfaz de usuario desarrollado en Labview en un PC.
4. Se conectó la tarjeta de desarrollo Arduino al PC por medio de un cable USB.

5. Se dejó el sensor estático durante 5 segundos.
6. Se grafican los datos de aceleración del archivo CSV obtenido y los resultados se presentan en la Figura 33, donde en color negro se presenta el eje X, en color azul el eje Z y en color rojo el eje Y.

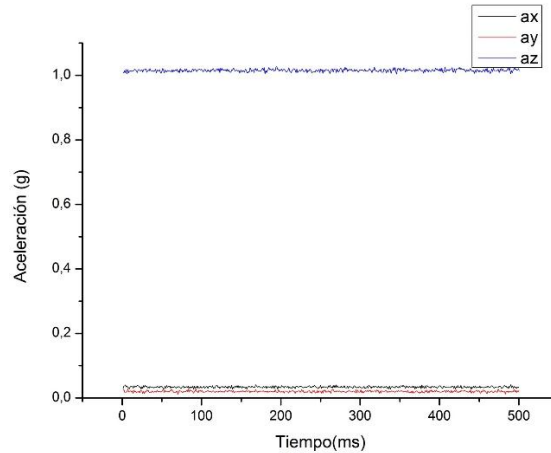


Figura 33. Grafica de aceleración de IMU #1. Fuente propia.

Como se mencionó anteriormente la componente Z de la IMU coincide con el vector de gravedad, por lo cual el eje Z experimenta una aceleración de 1g como se observa en la gráfica de *Aceleración Vs Tiempo* de la Figura 33, por otro lado cabe resaltar que las aceleraciones medidas por los ejes X e Y son valores de offset ya que dichos ejes no están sometidos a ninguna aceleración.

7. Finalmente se grafican los datos de giro del archivo CSV obtenido y los resultados se presentan en la Figura 34, donde en color negro se presenta el eje X, en color azul el eje Z y en color rojo el eje Y.

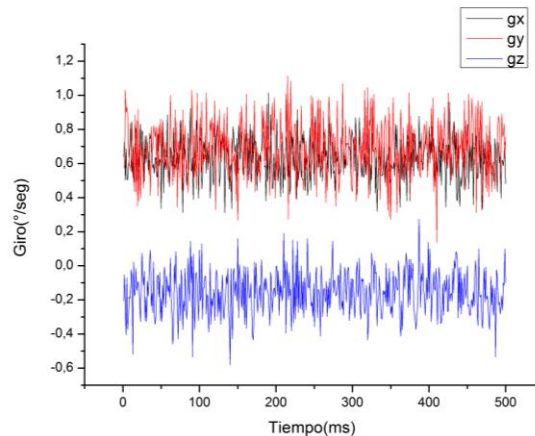


Figura 34. Grafica de giro de IMU #1. Fuente propia.

En la gráfica *Giro Vs Tiempo* se observan valores de giro pequeños pero con ruido que corresponden a los datos obtenidos por el giroscopio, dichos valores son producidos por el error acumulativo de la deriva, el cual es un error inherente al giroscopio, que será tratado mediante el filtro de Kalman para obtener el cambio en la posición de los ejes.

5.1.3. Caracterización IMU#2

Para la caracterización de la IMU#2 se repiten los pasos 1 a 7 del proceso de caracterización de la IMU#1, al graficarse los datos de aceleración del archivo CSV se obtuvo el resultado presentado en la Figura 35, donde en color negro se presenta el eje X, en color azul el eje Z y en color rojo el eje Y.

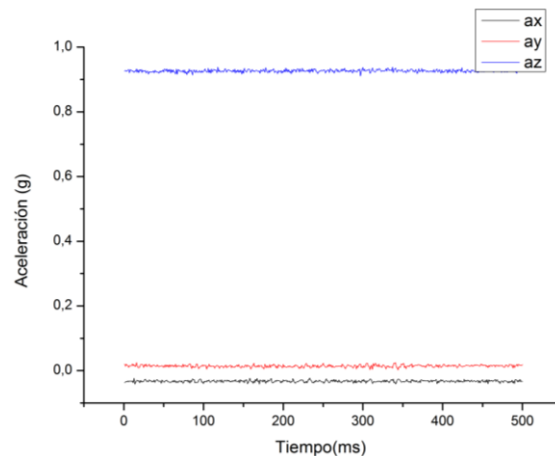


Figura 35. Grafica de aceleración de IMU #2. Fuente propia.

Según lo mencionado en el punto 1 de la caracterización, en la gráfica *Aceleración Vs Tiempo* el eje Z describe el valor de la aceleración de la gravedad, el cual en este caso no corresponde a 1g si no que está por debajo, lo que indica que los offset son distintos en cada uno de los sensores IMU-9250; por su parte los ejes Y y X presentan valores de offset. Luego se grafican los datos de giro para la caracterización de la IMU#2 y se obtiene el resultado de la Figura 35.

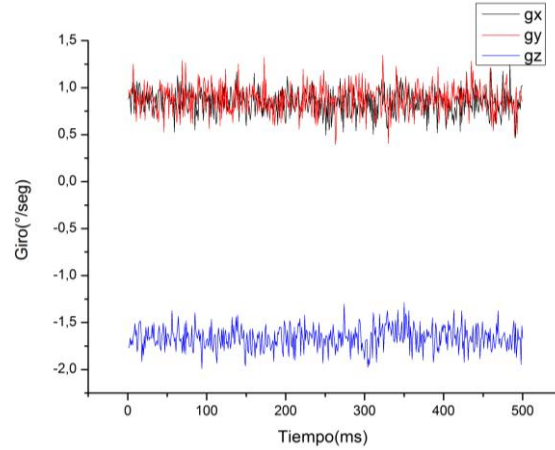


Figura 36. Grafica de giro de IMU#2. Fuente propia.

En la gráfica Giro Vs Tiempo de la IMU#2, los giros presentan un offset mayor y de gran amplitud comparado con los resultados de la IMU#1.

5.1.4. Caracterización IMU#3

Para la caracterización de la IMU#3 se repiten los pasos 1 a 7 del proceso de caracterización de la IMU#1; al graficar los datos de aceleración del archivo CSV se obtiene el resultado presentado en la Figura 37, donde en color negro se presenta el eje X, en color azul el eje Z y en color rojo el eje Y.

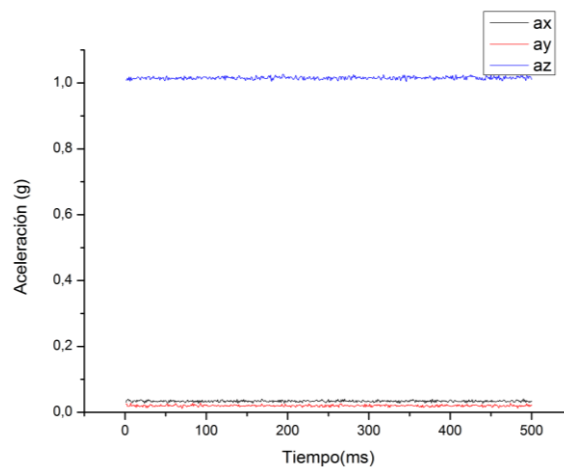


Figura 37. Grafica de aceleración de IMU #3. Fuente propia.

En la gráfica *Aceleración Vs Tiempo* de la IMU#3 se observa que el offset de los ejes X e Y son mucho menores en comparación a las respuestas de las IMU#1 e IMU#2. Seguidamente se grafican los datos de giro para la caracterización de la IMU#3 y se obtiene el resultado de la Figura 38, donde en color negro se presenta el eje X, en color azul el eje Z y en color rojo el eje Y.

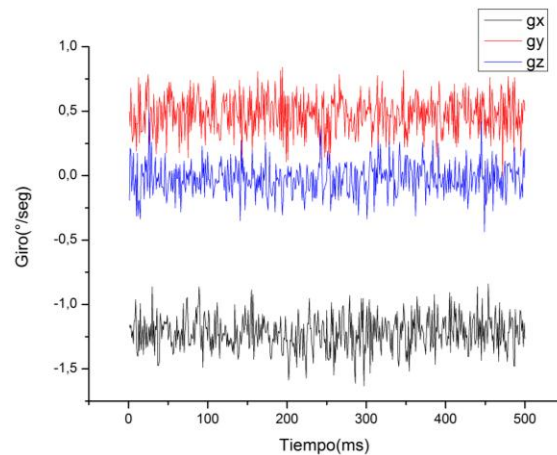


Figura 38. Grafica de giro de IMU#3. Fuente propia.

En la gráfica *Giro Vs Tiempo* donde se presenta la amplitud del ruido, se observa que la IMU#3 tiene menor amplitud en comparación con las IMU#1 e IMU#2, también cabe resaltar que el offset del giroscopio en el eje X se encuentra más alejado de los ejes Y y Z en comparación al comportamiento de las IMU#1 e IMU#2, las cuales presentaban una tendencia entre los ejes X y Y.

5.1.5. Caracterización IMU#4

Para la caracterización de la IMU#4 se repiten los pasos 1 a 7 del proceso de caracterización de la IMU#1, donde al graficar los datos de aceleración del archivo CSV se obtiene el resultado presentado en la Figura 39, donde en color negro se presenta el eje X, en color azul el eje Z y en color rojo el eje Y.

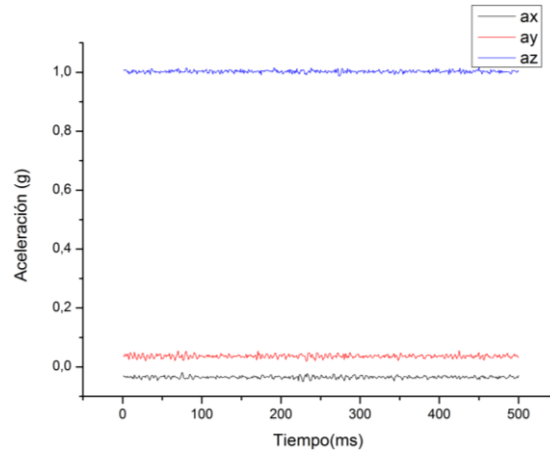


Figura 39. Gráfica de aceleración de IMU #4. Fuente propia.

La gráfica *Aceleración Vs Tiempo* de la IMU#4 presenta un comportamiento similar a la de la IMU#2, donde el eje Z describe el valor de la aceleración de la gravedad, el cual no corresponde a 1g si no que está por debajo de 1 y los ejes Y y X presentan valores de offset. Luego al graficar los datos de giro de la IMU#4 se obtiene el resultado presentado en la Figura 43, donde en color negro se presenta el eje X, en color azul el eje Z y en color rojo el eje Y; la gráfica *Giro Vs Tiempo* presenta un comportamiento diferente a las IMU caracterizadas anteriormente ya que el offset se encuentra por debajo de las demás IMU.

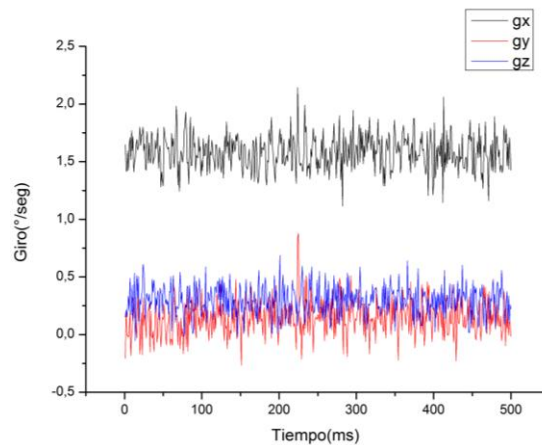


Figura 40. Gráfica de giro de IMU #4. Fuente propia.

Las gráficas permiten concluir que las mediciones se ven afectadas por el ruido inducido y por el efecto del error acumulativo, para mejorar dichos aspectos se

implementa el filtro de Kalman, con el fin de realizar un cálculo correcto de la inclinación. Las gráficas de aceleración permiten determinar el valor promedio del offset de los ejes que no se encuentran bajo la influencia de la gravedad, dichos valores se tendrán en cuenta al momento de implementar el código de cada nodo esclavo para que sea eliminado y así tomar medidas correctas de aceleración.

Con el fin de contrastar los resultados obtenidos anteriormente con datos a los cuales se les aplica el filtro de Kalman se realizan una serie de pruebas con las IMU bajo las mismas características descritas en la sección 3.3.1. *Procedimiento de caracterización de sensores MPU-9250*, a continuación se presentan los resultados.

5.1.6. Prueba de caracterización con algoritmo de Kalman

Los materiales y procedimiento para realizar las pruebas son los mismos descritos en la sección 3.3.1. *Procedimiento de caracterización de sensores MPU-9250*, la diferencia radica en la implementación del filtro de Kalman para observar la compensación tanto en el giro como en la aceleración de los datos obtenidos.

Aplicando la ecuación del filtro de Kalman mostrada en la ecuación (7) colocando el eje Z de la IMU en paralelo al vector gravedad se obtienen los resultados observados en la Figura 41.

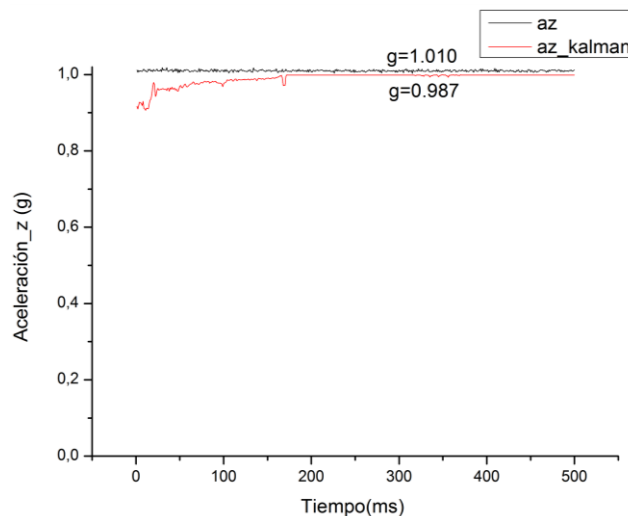


Figura 41. Filtro de Kalman aplicado a la aceleración sobre eje x IMU1. Fuente propia

La Figura 41 muestra que el valor aproximado de la aceleración es de 9.87m/s^2 y no de 10 m/s^2 , la cual coincide aproximadamente con la gravedad en la ciudad de Popayán. Se concluye que la aplicación del filtro brinda valores más aproximados a la aceleración real del sitio donde se desarrolla la prueba.

En la prueba se adquiere la información de la señal compensada y no compensada por el filtro para la IMU#1, la Figura 42 muestra los datos obtenidos por las aceleraciones sobre los tres ejes; donde se observa que los datos obtenidos por el filtro presentan una mejor respuesta al ruido ya que se elimina en gran medida los picos de las aceleraciones producidas por la intervención indirecta de ruido alrededor de la prueba.

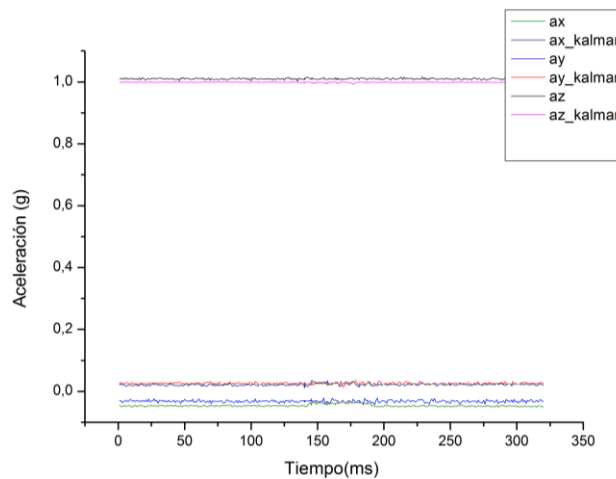


Figura 42. Comparación entre las aceleraciones X, Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman para la IMU#1. Fuente propia.

De la misma manera se observa los giros obtenidos por el filtro de Kalman en la Figura 43; donde se observan los valores del giroscopio con una compensación de giro alrededor de cero y una señal menos ruidosa en comparación con la prueba inicial, ver Figura 33.

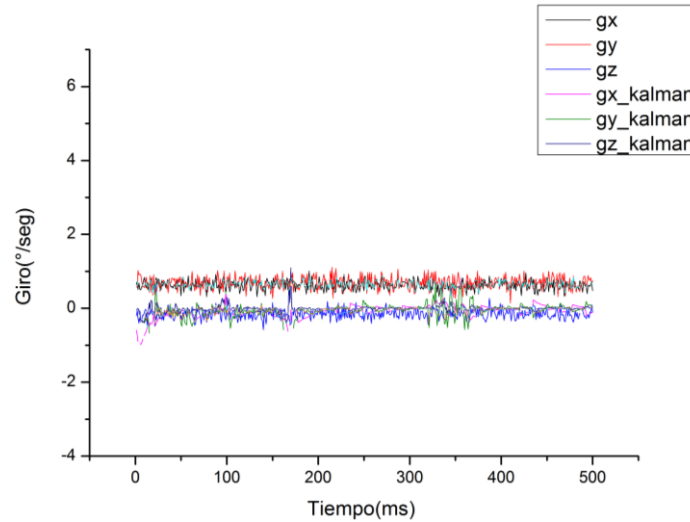


Figura 43. Comparación entre los giroscopios X, Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#1. Fuente propia.

Para la IMU# 2 los datos de aceleración compensados y no compensados por el filtro de Kalman se muestran en la Figura 44, donde se observa que la IMU#2 presenta una mejor respuesta debido a que existe una mejor alineación sobre la base XY donde se encuentre ubicada esto permite obtener niveles de offset cercanos al cero, como se observa en la Figura 44.

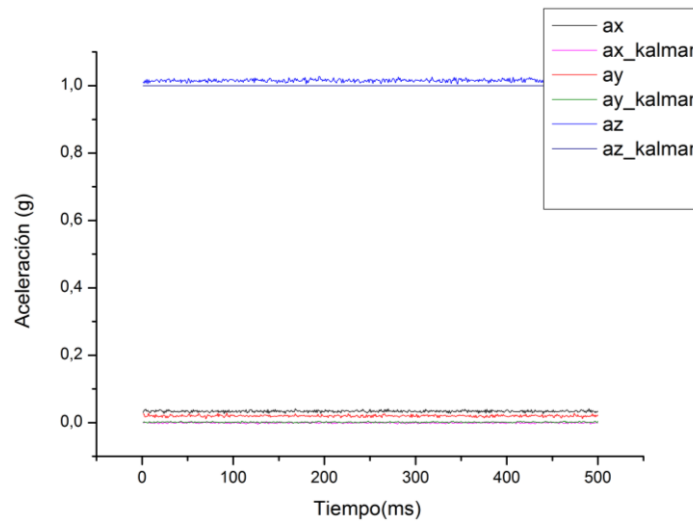


Figura 44. Comparación entre las aceleraciones X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#2. Fuente propia

Los giros obtenidos por la IMU#2 se muestran en la Figura 45; donde se presenta la compensación de los giros hechos por el filtro de Kalman como se puede observar los valores estimados se encuentran alrededor de cero para la IMU#2.

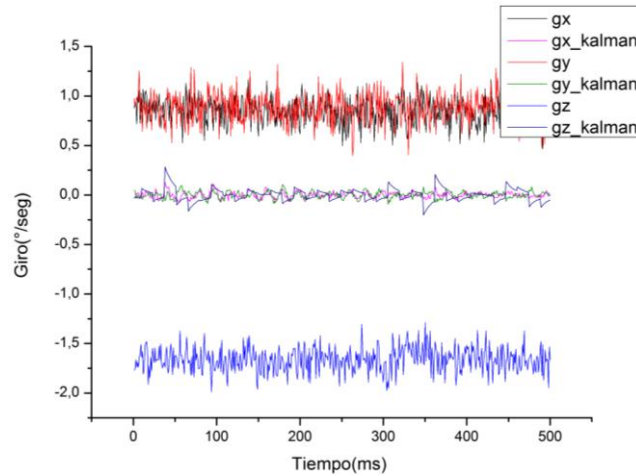


Figura 45. Comparación entre los giroscopios X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#2

De la misma manera para la IMU#3 se muestra el comportamiento de la aceleración en la Figura 46; la cual muestra que la IMU#3 posee un offset por debajo del valor nominal de 1g, a diferencia de las IMU anteriormente caracterizadas, el filtro de Kalman realiza una compensación hacia arriba tratando de llevar la medida a un valor próximo a 1g, este offset puede ser producto de la desalienación que se tiene con respecto al plano donde se conecta la IMU.

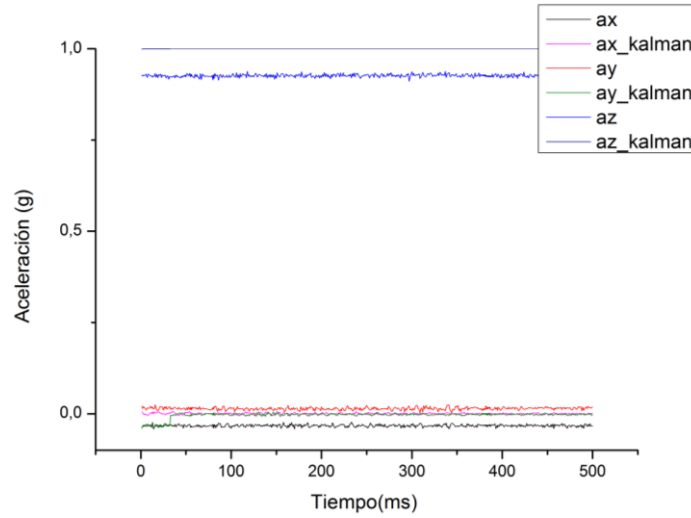


Figura 46. Comparación entre las aceleraciones X, Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#3. Fuente propia.

Los datos proporcionados por el giroscopio de la IMU#3 son mostrados en la Figura 47, donde se observa que el giro con respecto al eje Z no tiene un offset tan pronunciado y que está alrededor de cero, por tanto el filtro debe funcionar como un estimador de media, dando como resultado una línea cercana al cero, esta se observa de color rosado en la Figura 47.

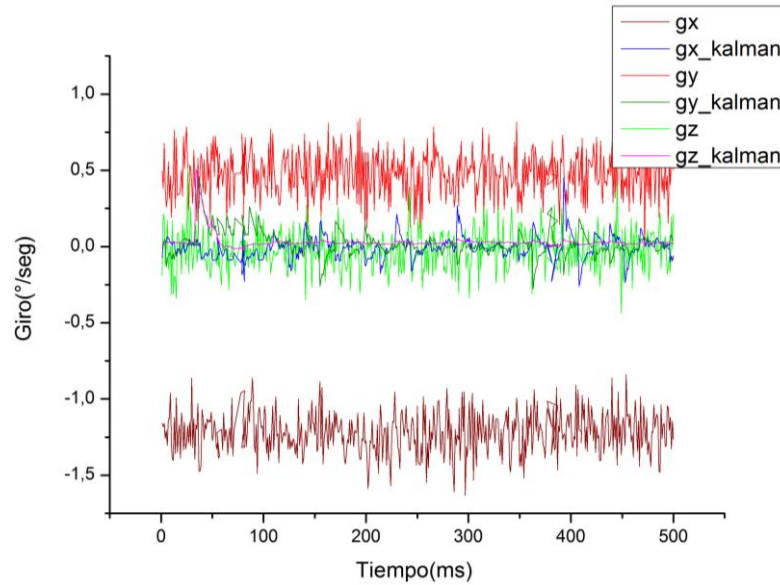


Figura 47. Comparación entre los giroscopios X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#3. Fuente propia

La Figura 48 muestra la comparación de las señales sin filtro y las señales compensadas para la IMU#4, donde se observa como la señal filtrada del eje Z sigue la señal sin filtro de del mismo eje, sobre el eje X el filtro compensa prácticamente en cero el valor de la aceleración.

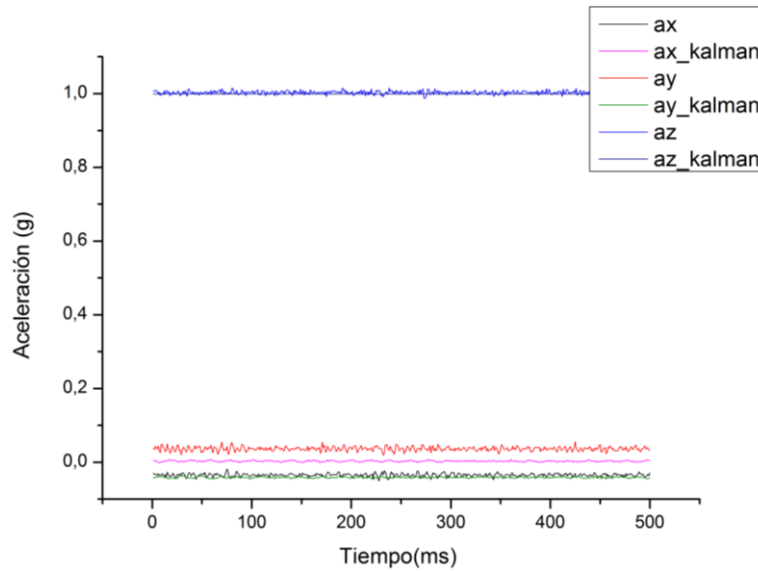


Figura 48. Comparación entre las aceleraciones X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#4. . Fuente propia.

La comparación entre los valores de giros sin filtro y compensados para la IMU#4 se muestra en la Figura 49, donde se observa una mejor respuesta en función de los giros, ya que se disminuye la distorsión sobre las señales compensadas las cuales son aproximadas a cero.

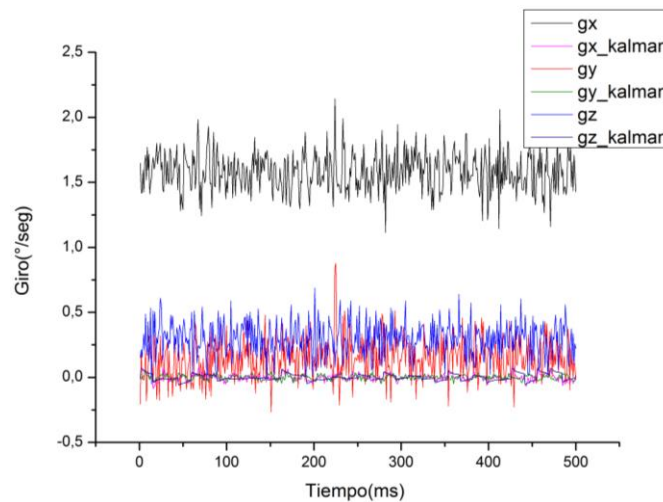


Figura 49. Comparación entre las aceleraciones X,Y y Z sin filtro y con filtro de Kalman IMU#4. . Fuente propia.

Al hacer una comparación gráfica entre las aceleraciones y giros de las IMU utilizadas es posible observar que cada uno de los sensores posee valores de

offset diferentes en variables como la aceleración y giro, por esta razón se hace necesario desarrollar una calibración antes de empezar el proceso de lectura el cual permite obtener en cada sensor una mejor medida. Los valores de offset de los sensores depende de muchos factores ambientales, como son temperatura presión o humedad, también es difícil garantizar que la superficie donde se desarrolla la calibración no posea rugosidades que en muchos casos no son perceptibles para el ojo humano; sin embargo en ocasiones generan pequeñas desviaciones que afectan considerablemente la medición, así mismo se tiene la influencia del ruido ambiental el cual es provocado por el paso de vehículos o personas cerca del sitio donde se toman los datos. Estos resultados ratifican porque el giroscopio no se puede utilizar como único sensor para realizar el cálculo del ángulo de inclinación de un terreno o superficie.

5.2. Prueba para obtención de ángulos Pitch Roll Yaw

Aplicando las ecuaciones (1) y (2) vistas en la sección 2.3.1. *Medición de ángulo de inclinación con acelerómetro*, es posible utilizar la fusión de los sensores de la IMU para el cálculo de la inclinación. Ya que la fusión de los sensores brinda una mejor respuesta es posible integrar y utilizar las ecuaciones (44), (45) y (46) para calcular el ángulo de inclinación de cada uno de los nodos esclavo dado por las IMU.

La prueba consiste en tomar trayectorias aleatorias para cada una de los sensores, lo cual se consigue al mover manualmente cada IMU sobre los tres ejes de rotación y capturar la información.

La Figura 50 muestra la respuesta de la IMU#1 frente al movimiento aleatorio de los tres ejes X, Y y Z, donde se observa un salto en aproximadamente 190 grados esto significa que al llegar a ese ángulo pasa a un valor negativo de referencia, ya que el rango de la IMU se encuentra entre más o menos 200 grados al sobrepasar este límite se encuentra automáticamente con la referencia de valor negativo esta prueba se hace con el fin de verificar los rangos de trabajo de la IMU#1.

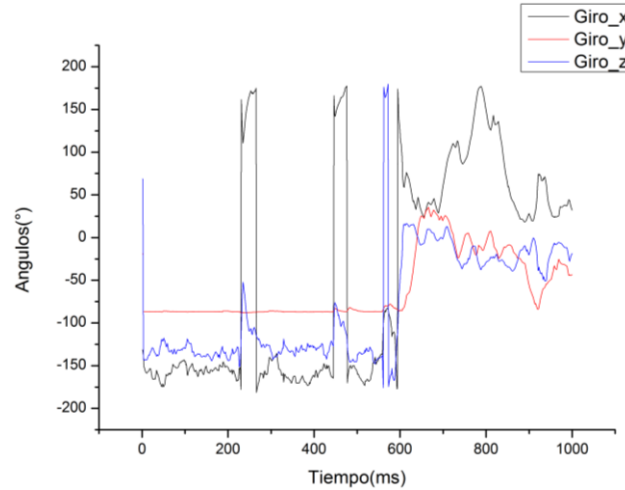


Figura 50. Ángulos de IMU#1 frente a una trayectoria aleatoria. Fuente propia.

Para la IMU#2 se desarrolla una prueba de barrido procurando abarcar todo los rangos posibles en los tres ejes de referencia, la Figura 51 muestra los resultados obtenidos, donde se observa que los recorridos fueron suaves mostrando variaciones continuas dentro de los rangos establecidos por el fabricante al no sobrepasar los topes máximos y mínimos de la IMU#2.

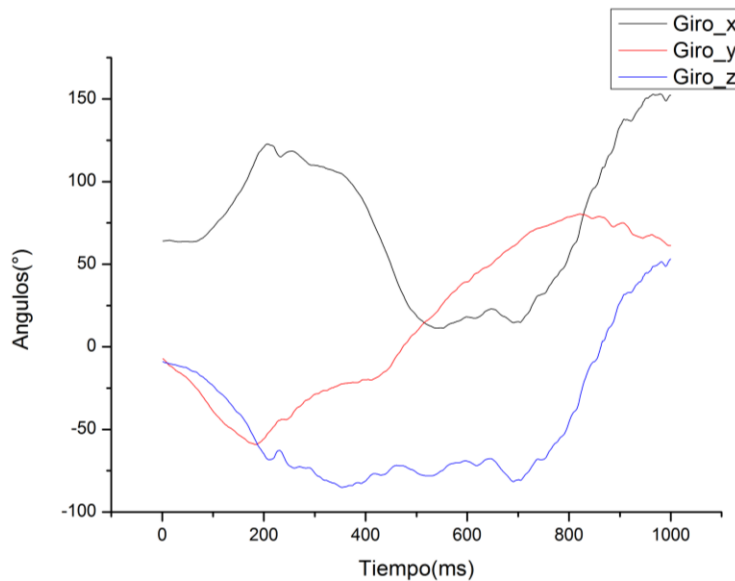


Figura 51. Ángulos de la IMU#2 frente a una trayectoria aleatoria. Fuente propia.

En la prueba de la IMU#3 se procura dejar los ejes Y y Z estaticos y mover dentro de los rangos permitidos el eje X, la Figura 52 muestra los datos obtendios, donde

se observa que para las coordenadas Y y Z inicialmente se obtuvo una buena respuesta la divergencia de Y se debe al pulso de la mano alzada aunque se corrigió durante el mismo trayecto alcanzando estabilizar los dos ejes Y y Z

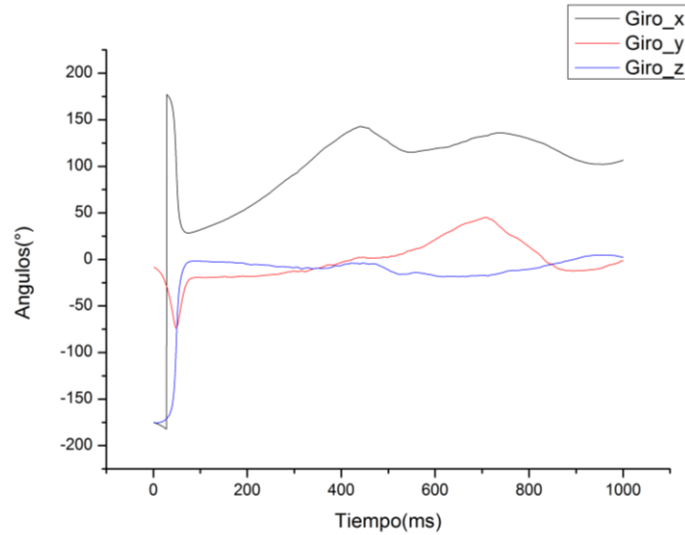


Figura 52. Ángulos de la IMU# 3 frente a una trayectoria aleatoria. Fuente propia.

La IMU#4 se dejó estática en el plano YZ y se movió de izquierda a derecha el eje X, los datos son mostrados en la Figura 53, donde se observa que si no existen rotaciones los ángulos son 0, por el contrario solo el eje sobre el cual se ejerce un cambio produce una trayectoria diferente.

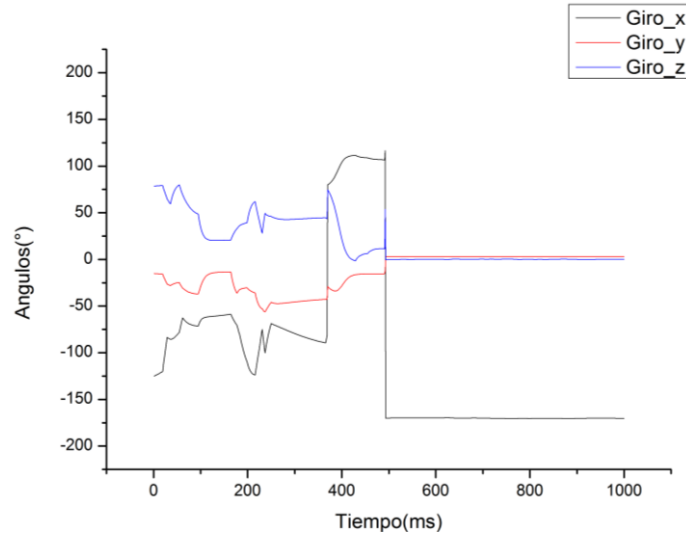


Figura 53. Ángulos de la IMU#4 frente a una trayectoria aleatoria. Fuente propia.

Los resultados presentados anteriormente muestran la eficiencia de la implementación del filtro de Kalman y la necesidad de integrar varios sensores para la correcta medición de un ángulo de inclinación.

5.3. Pruebas de laboratorio con la red de sensores

En la presente sección se describe el procedimiento y resultados de las pruebas en laboratorio realizadas con la red de sensores. Se implementaron tres pruebas donde se realizan cambios tanto de movimiento como en la superficie donde se realiza la prueba. A continuación se describe cada una de ellas.

5.3.1. Procedimiento para pruebas en laboratorio

En la Tabla 10 se presenta la lista de materiales necesarios para la implementación de las prueba en laboratorio. Posteriormente se encuentra la descripción del procedimiento a realizar en cada una de ellas.

Tabla 10. Materiales para caracterización de sensores de medida de referencia inercial.

Descripción	Cantidad
Red de sensores de inclinación	1
Maestro de red de sensores de inclinación	1
Computador o Tablet con sistema operativo Windows con interfaz gráfica de usuario instalada	1

El procedimiento a realizar en las pruebas de laboratorio se describe a continuación:

1. Ubicar la red de sensores de inclinación sobre una superficie plana, como se observa en la Figura 54.
2. Se enciende la alimentación de la red de sensores.
3. Conectar el nodo maestro al PC o Tablet.
4. Abrir la interfaz
5. Seleccionar el puerto COM de comunicación donde se conectó el nodo maestro.
6. Una vez ha iniciado la captura de datos se realizan movimientos aleatorios en la red de sensores.



Figura 54. Disposición de red de sensores para movimientos aleatorios. Fuente propia

5.3.2. Resultados prueba en laboratorio #1

La implementación de la prueba en laboratorio #1 se realiza siguiendo el procedimiento descrito en la sección 5.3.1. *Procedimiento para pruebas en laboratorio*, y distribuyendo la red de sensores como se observa en la Figura 55. En el paso 6 del procedimiento los nodos esclavo de la red de sensores se dejan estáticos sobre la superficie.

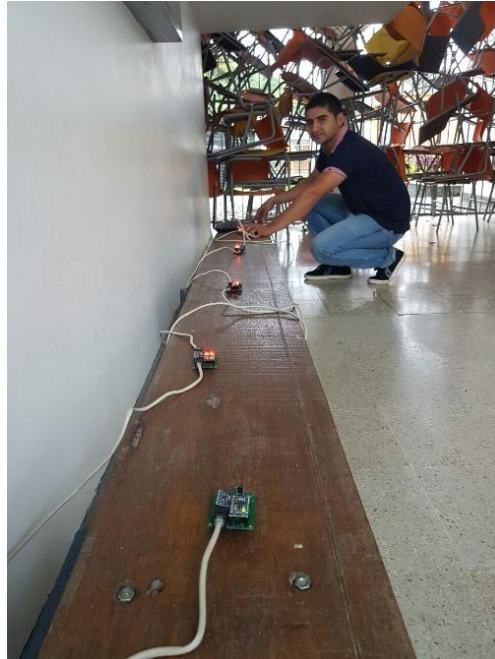


Figura 55. Disposición de los sensores. Fuente propia.

Al finalizar el procedimiento la interfaz gráfica de usuario implementada se encarga de graficar los datos obtenidos y el resultado se presenta en la Figura 56, donde se observa el resultado de los cuatro nodos esclavo que hacen parte de la red de sensores.

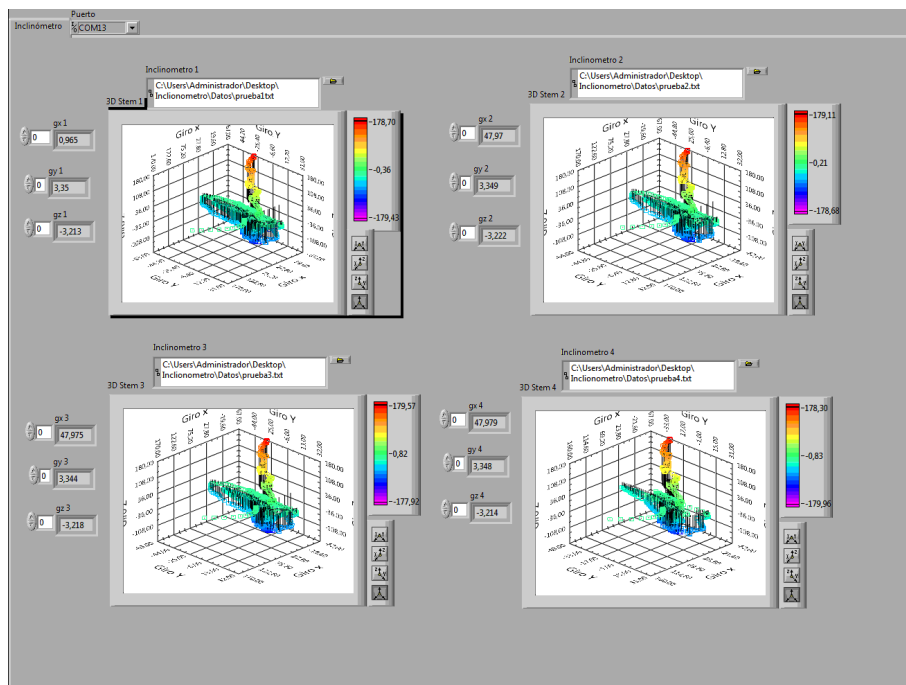


Figura 56. Datos obtenidos en prueba de laboratorio #1. Fuente propia

Como se observa en la Figura 56 todas las sondas comienzan en valores distintos de cero sin embargo al pasar un tiempo determinado los valores convergen al punto cero con respecto al eje Z e Y, esto se debe a que la integral debe tomar un tiempo para la corrección y estimar el valor de la rotación, por otro lado el eje X tiene un desfase de 9 grados lo que muestra que no está sobre una superficie completamente horizontal, a pesar de que la desviación no se nota visualmente el giroscopio tiene la capacidad de capturar las inclinaciones por pequeñas que estas sean. Esta información es muy importante ya que muestra valores de inclinación reales los cuales no son perceptibles a simple vista.

Para interpretar las gráficas es necesario tener en cuenta que cuando los valores de los datos recolectados de la red de sensores son constantes, el color asociado a ese estado no presentara variaciones, de modo que es posible establecer de forma visual si existen cambios o no en la inclinación.

5.3.3. Resultados prueba en laboratorio #2

La implementación de la prueba de laboratorio #2 se ejecuta siguiendo el procedimiento descrito en la sección 5.3.1. *Procedimiento para pruebas en laboratorio*, donde en el punto 6 se realizan movimientos aleatorios en algunos nodos esclavo de la red de sensores; una vez se obtienen los datos de la prueba la interfaz gráfica de usuario implementada se encarga de realizar las gráficas y el resultado se presenta en la Figura 57, donde se observa el resultado de los cuatro nodos esclavo que hacen parte de la red de sensores.

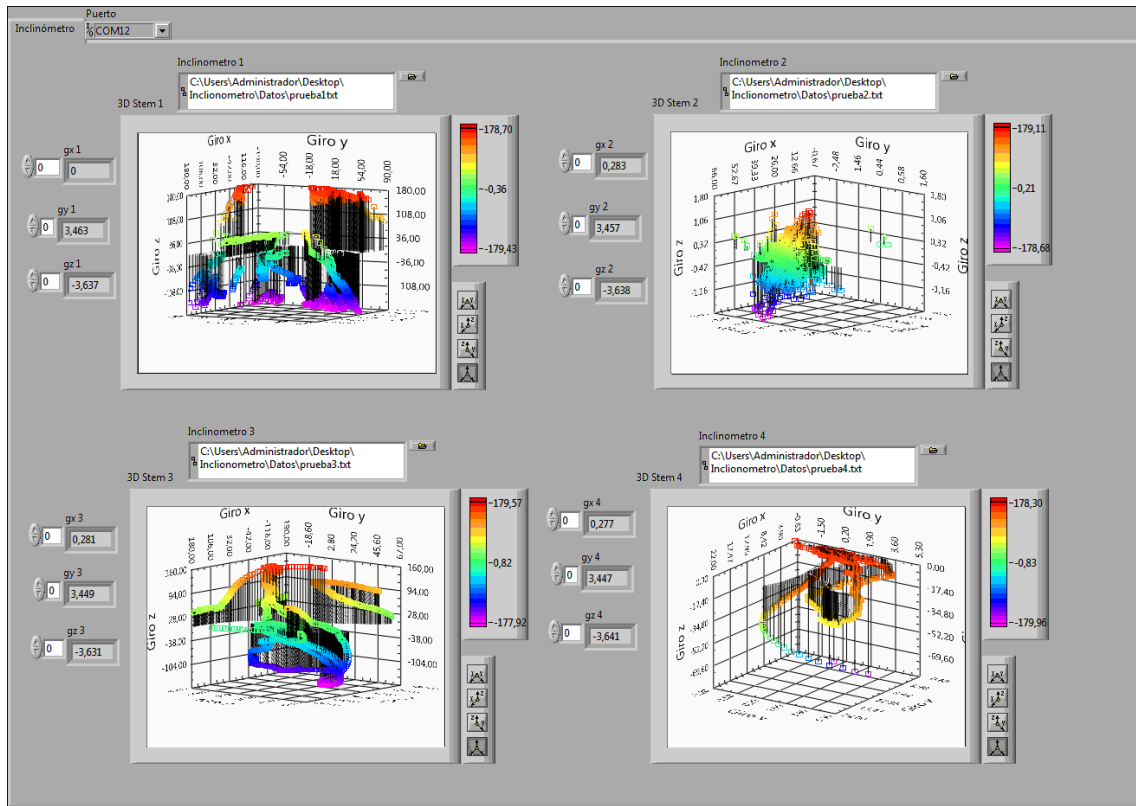


Figura 57. Respuesta de la red de sensores a una estimulo aleatorio. Fuente propia.

La Figura 57 muestra los giros dados por los nodos esclavo de la red de sensores, el nodo esclavo correspondiente a la IMU#2 muestra una estabilidad mayor debido a que se mantuvo estático, a diferencia de los demás nodos que fueron movidos intencionalmente para observar la trayectoria generada por cada uno de ellos. En la gráfica se puede observar que el color presenta variaciones correspondientes a los movimientos de cada nodo de la red de sensores. Las gráficas obtenidas pueden ayudar en la implementación de una alarma visual ya que es posible determinar rápidamente los cambios de inclinación que presenta cada nodo.

La grafica obtenida del eje X muestra los rangos dinámicos entre valores positivos y negativos identificados por puntos máximos y mínimos, esta respuesta se puede interpretar como la ocurrencia de un deslizamiento o movimiento de una masa de tierra.

El nodo esclavo #1 asociado al sensor IMU#1 muestra un comportamiento discontinuo en la trayectoria seguida por los giros, esto se debe a que en el estado estacionario se introdujo un impulso sobre el eje Z mostrando un cambio de color de verde a naranja, sin embargo es posible ver que retorna al color verde, lo cual indica que el sistema encontró nuevamente el estado estacionario; a diferencia de la gráfica correspondiente al nodo esclavo con IMU#4 el cual indica que se mantuvo en el último estado, esta información es de gran importancia ya que permite deducir cuando se presentan modificaciones de masas de tierra cercana al lugar de instalación de la red de sensores.

5.3.4. Resultados prueba en laboratorio #3

La implementación de la prueba de laboratorio #3 se ejecuta siguiendo el procedimiento descrito en la sección 5.3.1. *Procedimiento para pruebas en laboratorio*, teniendo en cuenta que en el punto 1 se ubica la red de sensores en una superficie inclinada como se observa en Figura 58.



Figura 58. Disposición de los sensores para la prueba. Fuente propia

Una vez obtenidos los datos de la prueba estos se introducen a la interfaz gráfica de usuario implementada, la cual se encarga de realizar las gráficas y los resultados se presentan en la Figura 59, donde se observa la respuesta de los cuatro nodos esclavo que hacen parte de la red de sensores.

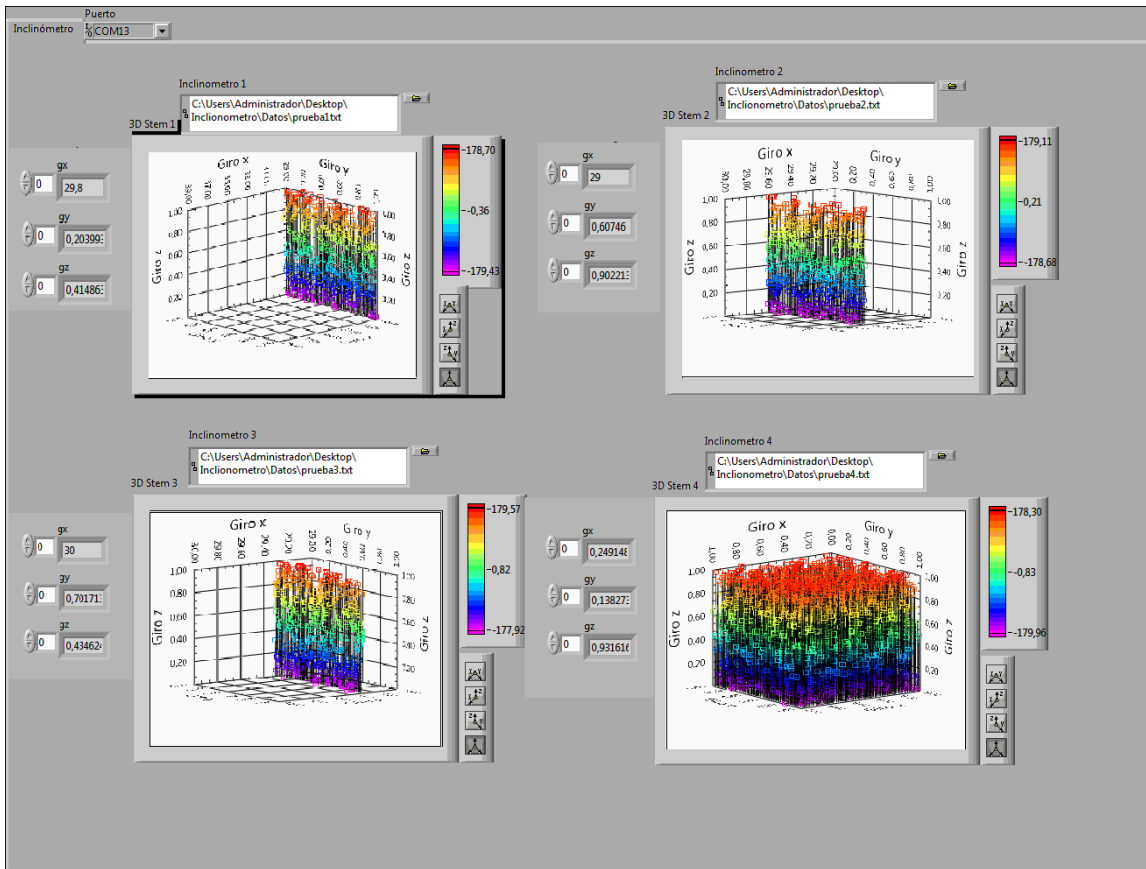


Figura 59. Datos obtenidos por los sensores sobre el plano de inclinación.
Fuente propia.

Como se observa en la Figura 59 las inclinaciones sobre los tres primeros sensores coinciden en aproximadamente 30 grados, la cuarta imagen muestra una inclinación aproximada de cero grados, las pequeñas variaciones dependen del ajuste del algoritmo de Kalman frente al ruido ambiental donde se desarrolló la prueba, por otro lado el cable UTP utilizado en la prueba produce una torsión inesperada sobre la instrumentación, esto hace que pueda aparecer un offset sobre el eje de torsión (eje X).

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El capítulo 6 inicia con las conclusiones del desarrollo del proyecto y finalmente se indican las propuestas planteadas como trabajos futuros.

6.1. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas al finalizar el desarrollo del proyecto.

- Se logró diseñar e implementar una red de sensores para la adquisición de un ángulo de inclinación con dispositivos de bajo costo, en relación a sistemas comerciales existentes, sin que ello perjudique los resultados y la calidad de la información obtenida.
- Las funcionalidades de un software como Labview que en su versión estudiantil brinda una licencia sin costo; permite implementar sistemas de monitoreo con alto grado de procesamiento, tal como se ve en la interfaz gráfica de usuario desarrollada en el presente proyecto, la cual genera graficas en tercera dimensión.
- Los sensores de tipo MEMS. han permitido desarrollar equipos que integran varios sensores en un solo chip, esto no solo permite reducir costos de implementación, si no medir diferentes variables al mismo tiempo como en el caso del sistema de referencia inercial implementado en la red de sensores del presente proyecto.
- El giroscopio sería un sensor ideal para calcular la posición de no ser por el error acumulativo presente en las medidas, el cual es inherente a su funcionamiento, sin embargo, se evidencia en los resultados que el filtro de Kalman permite mejorar la respuesta de variables de aceleración y giro.
- Las sondas de inmersión pueden llegar a costos muy elevados y esa es una de las problemáticas para hacer el monitoreo continuo de fallas geológicas en departamentos con recursos económicos limitados, tal como los municipios del departamento del Cauca.
- La resolución de medida del grado de inclinación es directamente proporcional a la cantidad de nodos de la red de sensores, a mayor número de nodos y menor sea la distancia entre ellos, se obtienen mejores

resultados, en el caso del presente proyecto la cantidad máxima de nodos esclavo posible está determinada por el protocolo de comunicación empleado, específicamente el número máximo es de 32 dispositivos definidos por estándar RS485.

- La plataforma de desarrollo Arduino tanto a nivel hardware como software, por sus características de ser un sistema abierto y libre, se ha convertido en un sistema ampliamente reconocido, por lo que es fácil encontrar múltiples contribuciones que permiten implementar desarrollos hardware de bajo costo y en cortos periodos de tiempo.

6.2. Trabajos futuros

A continuación se presentan las propuestas de trabajos futuros.

- Adecuar la red de sensores desarrollada en el presente trabajo, cumpliendo normas y estándares que permitan su instalación en campo.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica con funcionalidades adicionales tales como alarmas para monitoreo del sistema de detección de deslizamiento y presentación de histórico de datos recolectados.
- Diseñar e implementar una plataforma web que permita realizar monitoreo remoto del sistema implementado.
- Implementar sistema de sensores adicional para detección y monitoreo del nivel freático, con el fin de obtener un sistema completo que permita brindar mayor información para análisis del terreno de instalación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Servicio Geológico Colombiano, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia, 2015.

- [2] Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Banco Interamericano de Desarrollo, «Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de caso de cinco países: Colombia,» Mexico, 2007.

- [3] M. Calvache, Interviewee, *Subdirectora de Ingeominas*. [Entrevista]. 11 diciembre 2011.

- [4] J. Suárez Díaz, *Deslizamientos Y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales*, I. d. S. Ltda, Ed., Bucaramanga, 2001, p. 548.

- [5] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica; Colombia. Universidad de Los Andes; Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química-Ingeominas, «Centro Regional de Información Sobre Desastres para América Latina y el Caribe,» Octubre 2001. [En línea]. Available: <http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc12129/doc12129.htm>. [Último acceso: Diciembre 2016].

- [6] Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial - Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia Un aporte para la construcción de políticas públicas*, I ed., Bogotá, 2012.

- [7] LEY 1523 DE 2012, «Congreso de Colombia,» Bogotá, 2012.
- [8] RST Instruments, «RST Instruments,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.rstinstruments.com/Brochures/Digital%20Inclinometer%20System%20ICB0042A.pdf>. [Último acceso: 14 febrero 2016].
- [9] Roctest Telemac , «Engineering Solutions for Monitoring the Enviroment ES&S,» [En línea]. Available: http://www.esands.com/pdf/Geotech/Roctest/ESS_ROC_DIS-500_DigInclnoSystem.pdf. [Último acceso: 28 Enero 2016].
- [10] Suministros Andaluces de Perforación S.L., «Suministros Andaluces de Perforación S.L.,» Suministros Andaluces de Perforación S.L., 2016. [En línea]. Available: <http://suanper.com/producto.aspx?idfamilia=4424170093100424170&idSubfamilia=4424170097091424170&idCategoria=&idproducto=4424170092091092424170&buscar=&datapageid=1&pginicio=1>. [Último acceso: 9 febrero 2016].
- [11] «Desarrollo de una aplicación capaz de monitorizar taludes mediante inclinómetros en una red de sensores inalámbrica,» 2012. [En línea]. Available: http://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001317.pdf. [Último acceso: 12 febrero 2016].
- [12] Geokon, «Geokon,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.geokon.com/GK-604D>. [Último acceso: 15 febrero 2016].
- [13] Slope Indicator, «Slope Indicator,» Slope Indicator, [En línea]. Available: <http://www.slopeindicator.com/instruments/inclin-digitilt-classic.php>. [Último acceso: 20 febrero 2016].

- [14] A. Serna Ruiz, F. A. Ros García y J. C. Rico Noguera, Guía Práctica de Sensores, 2010.
- [15] R. Pallás-Areny y J. G. Webster , Sensors and Signal Conditioning: Edition 2, John Wiley & Sons, 2012.
- [16] Sensing S.L, «<http://www.sensores-de-medida.es/>,» [En línea]. Available: http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Inclin%C3%B3metros---Sensores-de-inclinaci%C3%B3n_62/Inclin%C3%B3metros-capacitivos_63/. [Último acceso: Julio 2016].
- [17] D. Zhang y B. Wei, Advanced Mechatronics and MEMS Devices II, Toronto : Spring, 2016.
- [18] J. O. Ogundare, Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice, John Wiley & Sons, 2015.
- [19] J. D. Bernal Iñiguez, «Repositorio Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador,» Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7508/1/UPS-CT004422.pdf>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [20] M. S. Grewal y A. P. Andrews, Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [21] W. Premerlani y P. Bizard , «Direction Cosine Matrix IMU: Theory,» 2009. [En línea]. Available: <http://gentlenav.googlecode.com/files/DCMDraft2.pdf> . [Último acceso: Julio 2016].

- [22] «MPU-9250 Product Specification. Revision 1.1,» InvenSense Inc., 2016. [En línea]. Available: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [23] Digi-Key Electronics, «digikey,» Digi-Key Electronics, [En línea]. Available: www.digikey.com. [Último acceso: Julio 2016].
- [24] SparkFun Electronics , «sparkfun,» SparkFun Electronics , [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/10724>. [Último acceso: Julio 2016].
- [25] STMicroelectronics , «STMicroelectronics,» Marzo 2015. [En línea]. Available: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/1e/3f/2a/d6/25/eb/48/46/DM00103319.pdf/files/DM00103319.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103319.pdf>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [26] SparkFun Electronics , «sparkfun,» SparkFun Electronics , [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/13284>. [Último acceso: Julio 2016].
- [27] N. G. Forero Saboya, «Normas de comunicación en serie RS-232, Rs-422 y RS-485,» *Ingenio*, nº 11, pp. 86-94, 2012.
- [28] A. Singh, D. Hermann y T. I. , 3 Febrero 2014. [En línea]. Available: <http://www.edn.com/design/power-management/4427860/Power-line-communication-implementation-for-DC-applications>. [Último acceso: Julio 2016].
- [29] CAN in Automation (CiA), «can-cia,» CAN in Automation (CiA), 1992. [En línea]. Available: <https://www.can-cia.org/>. [Último acceso: Julio 2016].

- [30] W. Lawrenz y N. Obermöller, CAN: Controller Area Network: Basics, design, applications, test technology, Berlin, 2011.
- [31] Arduino, «Arduino Nano,» Arduino, [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>. [Último acceso: Julio 2016].
- [32] Arduino, «Arduino,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardProMini>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [33] Sparkfun , «Sparkfun Pro Mini,» Sparkfun , [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/11113>. [Último acceso: Julio 2016].
- [34] Atmel Corporation, «Atmel Corporation,» Abril 2016. [En línea]. Available: http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [35] Sparkfun, «Sparkfun Arduino Pro Micro,» Sparkfun , [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/12640>. [Último acceso: Julio 2016].