

Universidad de las Ciencias Informáticas
Facultad 2



Generador de datos inerciales para algoritmos de navegación inercial

Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero en Ciencias
Informáticas

Autores: Yaneisy Borchel García

Niharby Díaz Rodríguez

Tutor: MSc. Mirta Beltrandez Sardiñas

Ing. Darvis Dorvigny Dorvigny

La Habana, Junio 2016



"Los hombres geniales empiezan grandes obras, los hombres trabajadores las terminan".

Leonardo da Vinci

Declaración de Autoría

Declaramos que somos los únicos autores del trabajo para optar por el título de Ingenieros en Ciencias Informáticas titulado “Generador de datos inerciales para algoritmos de navegación inercial” y reconocemos a la Universidad de las Ciencias Informáticas y la Facultad 2 los derechos patrimoniales del mismo con carácter exclusivo.

Para que así conste firmamos el presente a los ____ días del mes _____ del año 2016.

Firma del Autor
Niharby Díaz Rodríguez

Firma del Autor
Yaneisy Borchel García

Firma del Tutor
Ing. Darvis Dorvigny Dorvigny

Firma del tutor
MSc. Mirta Beltrandez Sardiñas

Agradecimientos

A mi abuelita por el inmenso cariño y apoyo que desde pequeño me ha ofrecido, a mi mamá, por ser la mejor madre del mundo, a mi padrastro por realizar la función como padre para mí, a mi hermano, a esos familiares que me brindaron su apoyo.

A mis queridas amigas (Isbel y Grisel) por ser parte de mi familia aquí en la universidad y para el resto de aquellas amistades que me han ayudado en algún momento.

A mis tutores por enseñarme a comprender que se siente ser un estudiante de ciencias informáticas, por su apoyo, su dedicación y confianza, y para aquellos profesores que me enseñaron algo productivo a lo largo de mi estancia en la universidad.

A mi novia Marelys por ser mi compañía por brindarme su apoyo incondicional y estar a mi lado en los momentos más hermosos de nuestras vidas.

A la Revolución Cubana por habernos dado la oportunidad de estudiar en esta Universidad de altos estudios y prepararnos para contribuir como ingenieros informáticos al desarrollo de nuestra sociedad

Niharby Díaz Rodríguez

A mi mamá por ser mi guía y mi apoyo y estar a mi lado en cada decisión buena y mala que he tomado.

A mi papá, aunque no esté presente y por cuidarme siempre.

A mi hermana por su apoyo incondicional en cada momento y ser mi ejemplo a seguir.

A mis sobrinos por ser unas de mis mayores alegrías.

A mi hija por ser mi motor impulsor para terminar la carrera.

A mi mamá y papá en la UCI, Aime y a Yaser por ayudarme en cada momento de mi vida.

A mis tutores por su ayuda y apoyo en cada momento en el transcurso de realización de esta tesis.

A mis amigas Lisan, Yilena y Aime por tantos años de amistad.

A mis compañeros de aula por soportarme estos cuatros años, principalmente a Ilsen, David y Hansel.

A las locas de mi apartamento Sheyla, Isbel y Grisell, por tantos momentos tristes y alegres.

A mi compañero de tesis Niharby por su tiempo y paciencia conmigo y su sacrificio por lograr juntos este sueño.

A mis amistades Roniel, Dianelis, Alejandro y Yadi por su apoyo.

A Piedra que más que un amigo es como el padre para mi hija.

Y a todos los que han formado parte de mi vida.

A la Revolución Cubana y a nuestro Comandante invicto Fidel Castro Ruz por habernos dado la oportunidad de estudiar en esta Universidad de altos estudios y prepararnos como ingenieros informáticos para contribuir al desarrollo de nuestra sociedad

Gracias

Yaneisy Borchel García

Le dedico esta tesis a mi mamá por apoyarme en cada momento y ser mi mayor orgullo.

A mi papá por ser un ejemplo de padre mientras estuvo a mi lado.

A mi hermana por ser mi guía y confidente en tantos años, sobrellevarme y brindarme el apoyo necesario en los momentos más difíciles.

A mi hija por ser mi mayor regalo.

Yaneisy Borchel García

Dedico esta tesis a las personas más importantes de mi vida, a mi mamá y a mi abuela por estar siempre a mi lado, por su apoyo incondicional y por no dudar nunca de mi capacidad para lograr mis metas. También a mi familia por brindarme el apoyo necesario para estar aquí hoy y a mis amistades por estar siempre cuando las he necesitado.

Niharby Díaz Rodríguez

RESUMEN

En Cuba, se han realizado varias investigaciones en torno al desarrollo de algoritmos de navegación inercial. Para estas investigaciones han sido necesarios datos de sensores inerciales. Aunque se ha podido realizar un número reducido de experimentos con prototipos de vehículos autónomos, los datos obtenidos no son suficientes para probar los algoritmos de navegación inercial por las perturbaciones que se registraron y los errores en las mediciones, típicos de los sensores inerciales de bajo costo. Por tal razón, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema informático capaz de generar datos inerciales para algoritmos de navegación inercial, basado en trayectorias. Para la construcción del sistema se realizó una interfaz gráfica de usuario que genera datos inerciales para algoritmos de navegación inercial basado en trayectorias, con el uso del lenguaje de programación M, del paquete Matlab. Todo el ciclo de vida de la solución estuvo guiado por la metodología de desarrollo XP. Los resultados de la interfaz se muestran en gráficas y las estructuras de datos generados se almacenan de forma persistente para su reutilización en algoritmos de navegación inercial.

Palabras claves: algoritmos de navegación inercial, sistemas de navegación inercial, sensores inerciales, trayectorias, unidad de medición inercial.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INERCIAL 1

 1.1 Introducción..... 1

 1.2 Antecedentes de los Sistemas de Navegación Inercial en el contexto tecnológico..... 1

 1.3 Fundamentos teóricos de un Sistema de Navegación Inercial..... 2

 1.4 Componentes de los INS..... 3

 1.5 Soluciones existentes de sistemas para generación de datos en los INS..... 8

 1.6 Marcos de referencias 11

 1.7 Métodos de la simulación de trayectorias 11

 1.8 Herramientas y lenguaje de programación utilizados en la generación de trayectoria 12

 1.9 Metodologías de desarrollo de software 13

 1.9.1 Programación Extrema (Extreme Programming, XP) 15

 1.10 Conclusiones Parciales..... 16

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LOS DATOS INERCIALES 17

 2.1 Introducción..... 17

 2.2 Propuesta de solución 17

 2.3 Lista de reserva del producto 19

 2.4 Características no funcionales del sistema..... 19

 2.4 Roles de la metodología. 20

 2.5 Fase de exploración 20

 2.6 Fase de planificación 25

 2.7 Plan de duración de las iteraciones..... 26

 2.8 Desarrollo de iteraciones de las tareas de ingeniería 26

 2.8.1 Iteración I..... 27

 2.8.2 Iteración II..... 28

 2.9 Patrones de diseño 29

 2.9.1 Singleton..... 29

 2.10 Diseño de la interfaz gráfica de usuario 30

 2.10.1 Introducción de datos..... 32

 2.11 Sistema de generación de datos inerciales 34

 Paso 1: Definición de los parámetros iniciales 34

 Paso 2: Generación de los datos de referencia a partir del modelo de cada tipo de trayectoria, y luego la generación de datos inerciales..... 34

 Paso 3: Graficación de los datos generados 37

 2.12 Conclusiones parciales..... 37

CAPÍTULO 3. PRUEBAS DE SOFTWARE AL SISTEMA DESARROLLADO 38

 3.1 Pruebas 38

 3.2 Pruebas unitarias 38

Índice de figuras

3.2.1 Prueba de análisis de varianza (ANOVA)	41
3.3 Pruebas de aceptación	44
3.4 Conclusiones Parciales.....	¡Error! Marcador no definido.
CONCLUSIONES	48
RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
ANEXOS.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ranking de agilidad (Los valores más altos representan una mayor agilidad)14

Tabla 2. Lista de reserva del producto19

Tabla 3. Roles de la metodología20

Tabla 4. Definir unidad de medición inercial.....22

Tabla 5. Mostrar características de la trayectoria.....23

Tabla 6. Definir los parámetros de las trayectorias a ejecutar24

Tabla 7. Implementar algoritmo de generación de datos inerciales25

Tabla 8. Estimación de esfuerzos.....25

Tabla 9. Plan de duración de las iteraciones.26

Tabla 10.HU abordadas en la Iteración I27

Tabla 11.HU abordadas en la Iteración I27

Tabla 12.HU abordadas en la Iteración II28

Tabla 13.HU abordadas en la Iteración II28

Tabla 14. HU abordadas en la Iteración II28

Tabla 15. HU abordadas en la Iteración II29

Tabla 16. Caso de prueba de aceptación HU Definir tipo de trayectoria.....45

Tabla 17. Caso de prueba de aceptación HU Definir parámetros de trayectoria45

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Esquema de los componentes de un Sistema de Navegación Inercial.....4

Fig. 2 Diagrama del proceso de generación de datos inerciales19

Fig 3. Definición del patrón de diseño Singleton30

Fig 4. Representación de la Interfaz inicial.....31

Fig 5. Representación de la interfaz de la trayectoria.....32

Fig 6. Representación de los datos a introducir en la interfaz de la trayectoria.34

Fig 7. Representación de las aceleraciones lineales de la trayectoria circular.....39

Fig 8. Representación de las velocidades angulares de la trayectoria circular39

Fig 9. Representación de las trayectorias circular.....40

Fig 10. Resultado del procedimiento de la prueba ANOVA para la Latitud de la trayectoria circular42

Fig 11. Resultado del procedimiento de la prueba ANOVA para Longitud de la trayectoria circular.43

Fig 12. Resultados del procedimiento de la prueba ANOVA para los valores que no se procesan44

Fig 13. No conformidades detectadas.....46

Fig 14. Representación de las trayectorias en línea recta52

Fig 15. Representación de las trayectorias estáticas y en zigzag52

Fig 16. Resultado del procedimiento de la prueba ANOVA para la Latitud y Longitud de la trayectoria en línea recta53

Fig 17. Resultado del procedimiento de la prueba ANOVA para la Latitud y Longitud de la trayectoria en zigzag53

Fig 18. Resultados de los valores de la velocidad en el norte y en el este de la trayectoria circular.....54

Fig 19.Resultados de los valores de la velocidad en el norte y en el este de la trayectoria en línea recta ..54

Fig 20.Resultados de los valores de la velocidad en el norte y en el este de la trayectoria en zigzag55

INTRODUCCIÓN

Los vehículos autónomos se incluyen dentro de la disciplina de la robótica móvil. Con el abaratamiento de los dispositivos electrónicos, han aumentado las facilidades para aplicaciones civiles tales como: misiones de reconocimiento, supervisión de áreas de difícil acceso para los humanos, video vigilancia, fotogrametría aérea, vigilancia fronteriza o costera. (1)

En general, se requiere gran cantidad de recursos para desarrollar esta tecnología, sean vehículos aéreos, acuáticos o subacuáticos. Las principales potencias económicas en el mundo tienen el liderazgo en investigación y desarrollo, y hacen uso intensivo en diversas aplicaciones fundamentalmente en el campo militar. En cambio, no publican los resultados más importantes, ni las especificaciones técnicas de la instrumentación que desarrollan. Pese a esto, otros países del mundo comenzaron a desarrollar estos vehículos con tecnologías de bajo costo, de gama comercial, disponibles en el mercado. En Latinoamérica se exhiben resultados de referencia. (2), (3)

Para la navegación de los vehículos autónomos se requieren diferentes tipos de sensores, además de un algoritmo de navegación, una computadora de propósito específico, un sistema de control, actuadores mecánicos o eléctricos, y una fuente de energía que garantice la autonomía para la navegación. El desarrollo de la tecnología de tipo micro-electro-mecánica, ha permitido agrupar los sensores de navegación en dispositivos conocidos como unidades de medición inercial o IMUs (acrónimo del inglés Inertial Measurement Units). (4) La calidad de los sensores es de gran importancia, dado que proveen toda la información necesaria para el correcto funcionamiento del vehículo ante la ausencia de un piloto humano. Se clasifican, según el uso que se le dará al vehículo autónomo, como sensores de tipo estratégico, táctico o comercial.

Los sensores de tipo estratégico y táctico se utilizan para aplicaciones militares, desarrollados por Estados Unidos, y otros países de la OTAN. Son precisos, fiables; en cambio no están disponibles en el mercado para otros países, tienen precios prohibitivos, en el orden de las decenas de miles, hasta millones de dólares.

Los sensores de tipo comercial están disponibles en el mercado, son accesibles por la mayoría de los países, y por ello ha sido posible aumentar el número de aplicaciones en el ámbito civil. Se consideran de bajo costo (desde decenas de dólares hasta varios miles). Las mediciones con estos sensores son poco fiables y contaminadas por ruido. Los de mayor calidad poseen los precios más elevados.

Para el desarrollo de vehículos autónomos con tecnología de bajo costo, se requiere de algoritmos de navegación inercial, capaces de mitigar las deficiencias de los sensores de gama comercial. Como tendencia se utilizan sistemas de navegación inercial (INS, acrónimo del inglés Inertial Navigation System), dado que se basan en la integración de las aceleraciones lineales medidas por los sensores de aceleración (acelerómetros), y las velocidades angulares (giróscopos).

En Cuba se han realizado varias investigaciones en torno al desarrollo de algoritmos de navegación inercial tales como: el modelado dinámico de los vehículos para el guiado y la navegación (5), (6), (7), realizados en el Centro de Investigación y Desarrollo Naval (CIDNAV) y el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Para estas investigaciones han sido necesarios datos de sensores inerciales. Se ha podido realizar un número reducido de experimentos con prototipos de vehículos autónomos. Los datos obtenidos en estos no son suficientes para la prueba de los algoritmos de navegación inercial por las perturbaciones que se registran y los errores en las mediciones, típicos de los sensores inerciales de bajo costo.

Probar un algoritmo de navegación inercial implica correr el riesgo de dañar permanentemente el vehículo autónomo, o la pérdida del mismo, por errores de diseño o implementación del algoritmo bajo prueba. Se necesita además, disponer de trayectorias conocidas que sirvan para evaluar el nivel de precisión de la respuesta del algoritmo, a partir de aceleraciones lineales y velocidades angulares obtenidas por sensores inerciales.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente se identifica como **problema de investigación**: ¿Cómo generar datos de sensores inerciales para el desarrollo de algoritmos de navegación en un sistema de navegación inercial?

En consecuencia, con lo anterior se determina como **objeto de estudio**: los sistemas de navegación inercial.

Se plantea como **objetivo general**: desarrollar un sistema informático capaz de generar datos inerciales para algoritmos de navegación inercial, basado en la utilización de trayectorias.

Se tiene como **campo de acción**: la generación de datos inerciales mediante trayectorias.

Para dar cumplimiento al objetivo general se proponen los siguientes **objetivos específicos**:

- ❖ Analizar los referentes teóricos asociados a los sistemas de navegación inercial, unidades de medición inercial y generación de datos inerciales.

- ❖ Desarrollar un sistema informático que genere datos inerciales para algoritmos de navegación en un sistema de navegación inercial.
- ❖ Realizar pruebas de software para validar el correcto funcionamiento del sistema informático con respecto a un algoritmo de navegación inercial.

Para dar cumplimiento al objetivo planteado se trazaron las siguientes **tareas de investigación**:

- ❖ Análisis de los referentes teóricos y los conceptos asociados a los sistemas de navegación inercial, unidades de medición inercial y la generación de datos inerciales.
- ❖ Identificación de las investigaciones y aplicaciones informáticas existentes, utilizadas para la generación de datos inerciales tanto en el ámbito nacional como internacional.
- ❖ Selección de las tecnologías y herramientas a utilizar en el proceso de desarrollo del software.
- ❖ Caracterización de la propuesta de solución.
- ❖ Realización del diseño de la solución propuesta.
- ❖ Construcción de un sistema informático capaz de generar datos inerciales para el algoritmo de navegación inercial.
- ❖ Realización de pruebas de software al sistema informático para comprobar su funcionalidad.

Los **métodos de investigación** utilizados se desglosan a continuación:

❖ **Métodos teóricos**

Análisis–Síntesis: permitió analizar individualmente los principales conceptos relacionados con el área de estudio a tratar, posibilitando un análisis de cada uno, para luego llevar a cabo el estudio de las relaciones que se establecen entre ellos.

Enfoque-sistémico: permitió seguir la lógica interna del desarrollo del sistema informático, los datos y los resultados de los cálculos en las pruebas de errores.

❖ **Método empírico**

Medición: permitió probar los resultados, así como la aceptación de la implementación del sistema informático garantizando su funcionamiento.

Estructura del documento

El presente documento está organizado en tres capítulos. A continuación, se muestra una breve descripción de cada uno de ellos.

Capítulo 1. Comprende el estudio y análisis de los referentes teóricos sobre los sistemas de navegación inercial, unidades de medición inercial, sensores inerciales, generación de datos y trayectorias predefinidas. Se realiza un análisis de las investigaciones y aplicaciones informáticas existentes utilizadas para la generación de datos inerciales. Se determina la metodología, herramientas y tecnologías que se utilizaran para construir la propuesta de solución.

Capítulo 2. Se describe la metodología empleada, así como los diferentes artefactos que se generan en ella. Además, se detallan los patrones de diseño tenidos en cuenta para la construcción de la propuesta de solución y se especifica cómo se realizó el sistema.

Capítulo 3. Se realizan las pruebas de software al sistema informático para comprobar la correcta funcionalidad del mismo.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INERCIAL

1.1 Introducción

En este capítulo se abordan los elementos teóricos necesarios para dar solución a la situación problemática. Comprende los principales conceptos que serán tratados durante el desarrollo de la investigación. Además, se muestra una caracterización de las técnicas y tecnologías propuestas para el desarrollo del sistema.

1.2 Antecedentes de los Sistemas de Navegación Inercial en el contexto tecnológico

El problema de la navegación consiste en conocer la posición de un vehículo en cada instante de tiempo. Antiguamente los movimientos por tierra se basaban en puntos de referencia conocidos, y para los movimientos en el mar no se podía perder de vista la costa. Existieron diferentes métodos para dar solución a la necesidad de conocer posiciones en la superficie, el más tradicional era la observación de los astros para obtener referencias espaciales. Los métodos antiguos carecen de precisión para aplicaciones de vehículos autónomos. (8)

Con la llegada del siglo XX, aparecieron nuevos sistemas de posicionamiento. La principal fuerza de desarrollo provino de los intereses militares, que buscaban determinar la posición de sus unidades de ataque para guiarlas hacia sus objetivos. Por esta necesidad se desarrollaron métodos de navegación inercial. (8)

El desarrollo de los INS ha brindado al hombre, con el paso del tiempo, una poderosa herramienta tecnológica para explotar y dominar el medio aéreo, terrestre y marino, más allá de su alcance, y se cuenta actualmente con una amplia gama de aplicaciones, lo que se debe a su maniobrabilidad y seguridad. Los aviones en particular, realizan cada vez más tareas en la vida cotidiana con buenos resultados, y demuestran que son una solución viable para algunos problemas de la sociedad. A continuación se muestran algunos ejemplos de la aplicación práctica de estos:

- ❖ Fotografía aérea: agrícola, inmobiliario.
- ❖ Filmación de video aéreo.
- ❖ Vigilancia forestal y prevención de incendios.
- ❖ Vigilancia fronteriza y costera.
- ❖ Vigilancia policial ciudadana: sobrevuelo a media altura con potentes cámaras motorizadas.

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

- ❖ Estudios atmosféricos, análisis y seguimiento de fenómenos meteorológicos.
- ❖ Búsquedas de personas en desastres y emergencias. (7)

1.3 Fundamentos teóricos de un Sistema de Navegación Inercial

En los últimos años se destacan trabajos de referencia internacional, ejemplo de ello son los realizados por Martín España (10), Gonzalo Castillo (2), Rodrigo González (3), Gonzalo Ferrer (11), entre otros. Sus investigaciones se han llevado a cabo en torno al desarrollo de sistemas de navegación inercial. Por la relevancia de sus estudios se utilizan algunas de sus definiciones como aporte a la propuesta de solución:

“La navegación inercial se basa en el posicionamiento relativo a partir de la integración de las aceleraciones registradas por los acelerómetros, utilizando las velocidades angulares de los giróscopos para determinar la dirección del recorrido. Al conjunto de sensores inerciales se le conoce como IMU (unidad de medición inercial) que, junto con las ecuaciones diferenciales de navegación, conforman un Sistema de Navegación Inercial (INS)” (10).

“Los Sistemas de Navegación Inercial (INS), son el resultado del trabajo conjunto de los sensores inerciales ligados a una plataforma con un sistema de referencia común, mediante el cual se generan los datos a ser usados en la navegación inercial” (11).

“Un Sistema de Navegación Inercial permite calcular los parámetros de navegación de un vehículo a partir de sensores inerciales (que miden aceleración lineal y velocidad angular), una computadora y un algoritmo de navegación. El algoritmo, en su ejecución en la computadora de navegación, es el encargado de resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales de navegación. Un INS es capaz de calcular un cambio en la posición geográfica, un cambio en su velocidad (módulo y dirección) y un cambio en su orientación (rotación alrededor de un eje) (10)”.

A partir del análisis de las definiciones anteriores, los autores pudieron encontrar las siguientes similitudes acerca de los INS:

- ❖ Son un sistema de ayuda a la navegación que brinda la información respectiva de posición y orientación del vehículo en movimiento.
- ❖ Están compuestos por sensores que miden aceleración lineal y velocidad angular para calcular a través de un algoritmo de navegación la posición y la orientación.

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

Características de los INS.

El análisis de las características y elementos de los INS permite arribar a las siguientes conclusiones:

- ❖ Producen información de los parámetros de navegación a muy alta tasa de muestreo y con gran ancho de banda.
- ❖ Sus medidas son no interferibles y no requieren de estaciones o puntos de referencia externos.
- ❖ Utilizan información accesible en todo instante y en todo punto (sobre y fuera el planeta) con calidad independiente del medio donde se mueva el vehículo.
- ❖ Necesitan conocer la orientación y la posición inicial del vehículo.
- ❖ La adquisición del rumbo inicial requiere la inmovilidad del vehículo durante el proceso llamado de “girocompás”, que puede durar algunos minutos, y de giróscopos de resolución suficiente como para medir la velocidad angular de la Tierra.
- ❖ Los errores de medida en los instrumentos inerciales y en los parámetros de navegación inercial inducen errores que crecen polinomialmente con el tiempo.
- ❖ Requieren de la actualización periódica de los parámetros de navegación con mediciones absolutas (11).

1.4 Componentes de los INS

Los sistemas de navegación inercial se componen de sensores inerciales (acelerómetros y giróscopos), el algoritmo de navegación inercial, y la computadora de navegación. A continuación, se muestran en la figura 1 los componentes del INS.

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

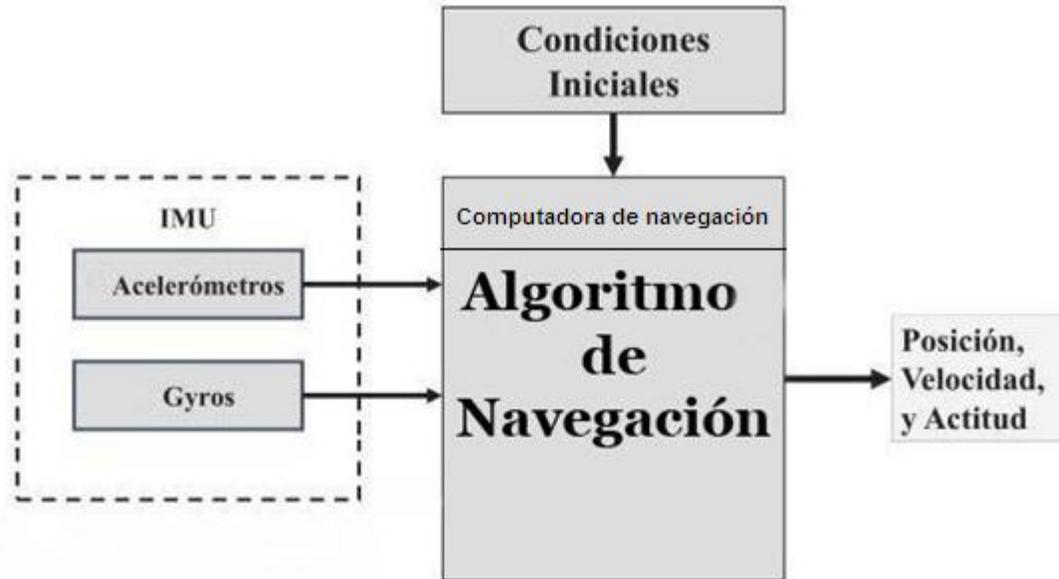


Fig. 1 Esquema de los componentes de un Sistema de Navegación Inercial. (11)

❖ Sensores Inerciales

Los desarrollos más recientes dieron paso a los sensores de tecnología MEMS (Micro-Electro-Mecánicos). Estos permiten responder a las señales eléctricas generadas por los circuitos internos, que pueden interactuar con el sensor mediante un actuador. Contienen un circuito electrónico que acondiciona la señal producida por el sensor para ser enviada al exterior y se alimenta de la información de un sistema externo más complejo.

Existen varios tipos de sensores, entre ellos los sensores inerciales, que son dispositivos capaces de convertir los efectos de una fuerza en una señal registrable. Los sensores inerciales generalmente son la aceleración lineal, en el caso de los acelerómetros, y el movimiento angular, en el caso de los giróscopos, sobre uno o varios ejes. Estos efectos físicos se transforman en una salida de voltaje linealmente proporcional y se cuida que el proceso de transformación tenga una sensibilidad específica en función de la aplicación en la que son incluidos (10).

❖ Acelerómetros

“Un acelerómetro mide la fuerza específica en un sistema de referencia inercial, que se puede utilizar para estimar la aceleración del cuerpo en movimiento. Además permite conocer la aceleración que se produce al realizarse un movimiento a lo largo del eje en el cual se esté trabajando. Se toma en cuenta que un acelerómetro no mide la aceleración de la gravedad en sí, sino, que mide una magnitud de aceleración en general. Una característica especial que presenta el acelerómetro es que puede ser utilizado también como

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

un sensor de inclinación, para lo cual se usa la aceleración de la gravedad como un vector para determinar la orientación del objeto en el espacio (4).”

Para el desarrollo de la generación de datos se propone utilizar el siguiente modelo matemático propuesto para determinar la aceleración lineal por Gonzalo Castillo (2):

$$f^b = (I - S_a) C_n^b f^n + \eta^b$$

$$f^n = a + (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V - G$$

f^b Es la fuerza específica en el marco del cuerpo que brinda la salida de la aceleración lineal a través de un conjunto de ecuaciones definidas por: una matriz que tiene en su diagonal el error de factor de escala característico de las IMU, de conjunto con un vector que contiene el error del sesgo. Además, se utiliza una matriz de cosenos directores, que es la matriz de rotación definida desde el marco de navegación medida en el marco del cuerpo. De igual forma, se hace uso de una fuerza específica en el marco de navegación que contiene en su representación la aceleración en cada uno de sus ejes, así como la velocidad y la gravedad compuesta por la altura y la latitud; esta fuerza además utiliza en sí la fuerza de Coriolis (efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación, cuando un cuerpo se encuentra en movimiento).

Donde:

f^b : salida real simula del acelerómetro

I: matriz identidad de 3x3

S_a : matriz diagonal de 3x3 cuyos elementos diagonales son el error de factor de escala

η^b : sesgo considerado como la suma de ruido constante y ruido blanco

f^n : fuerza específica en el marco de navegación

a: aceleración

V: velocidad

G: gravedad

$(2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V$: fuerza de Coriolis

❖ Giróscopos

“Es un dispositivo que permite conocer cómo varía un ángulo en el tiempo, mientras este se encuentra rotando (velocidad angular), con esto es posible determinar la orientación en el móvil donde se encuentra montado. Los giróscopos antiguamente por su tamaño, peso y carácter mecánico tenían limitadas aplicaciones, siendo esencialmente utilizados en aplicaciones militares. Actualmente se está haciendo uso

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

de la tecnología llamada Sistema Micro-electromecánico (MEMS), siendo estos sensores unos de los más utilizados en la actualidad.” (4)

Para el desarrollo de la generación de datos se propone utilizar el siguiente modelo matemático propuesto para calcular la velocidad angular por Gonzalo Castillo (2):

$$\omega_{ib}^b = (I - S_g)(C_n^b(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) + \omega_{nb}^b) + \varepsilon^b$$

ω_{ib}^b Es la salida de las velocidades angulares en los tres ejes que posee como elementos característicos de las IMUs, una matriz que contiene la diagonal con el error de factor de escala y el error del sesgo. Para esta salida es necesario utilizar velocidad angular del vehículo y de la rotación de la tierra medida en el marco de navegación, transformadas en una matriz de cosenos directores, que rota desde el marco de navegación hasta el marco del cuerpo.

Donde:

ω_{ib}^b : salida real simula del giróscopo

I: matriz identidad de 3x3

S_g : matriz diagonal de 3x3 cuyos elementos diagonales corresponden al error de factor de escala

ε^b : es la deriva del giróscopo y puede ser simulado como la suma de ruido constante y ruido blanco

ω_{ie}^n : velocidad angular de la rotación de la tierra

ω_{en}^n : velocidad angular en el marco de navegación

ω_{nb}^b : velocidad angular del marco de navegación medido en el marco del cuerpo

- Unidad de Medición Inercial (IMU).

Las Unidades de medición inercial son dispositivos que están compuestos por sensores inerciales (acelerómetros y giróscopos), con una disposición especial que garantice la ortogonalidad entre los ejes para las mediciones; circuitos electrónicos y un procesador, para retornar medidas de aceleración, velocidad angular y orientación. Las más sofisticadas entregan los datos de navegación: posición, velocidad, y orientación. Con estos dispositivos se logra miniaturización, compactación de los instrumentos, y mayor fiabilidad.

Entre las características de las unidades de medición inercial, resaltan por su utilidad para este trabajo, el sesgo y el factor de escala, proporcionados por la IMU. El sesgo es un valor que se le adiciona a la aceleración, y se expresa en múltiplos de g (aceleración de la gravedad, aproximadamente 9.8 m/s²). El factor de escala mide la entrada continua del ruido aleatorio, y se expresa en %.

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

Están disponibles en el mercado varios modelos de unidades de medición inercial, de gama comercial. Entre ellas se eligieron cuatro modelos representativos, que servirán de referencia para la construcción de la solución propuesta. Se exponen a continuación sus características fundamentales.

❖ *CrossbowDMU*

Crossbow es una unidad de medición inercial diseñada para medir la aceleración lineal a lo largo de tres ejes ortogonales, y las velocidades de rotación en torno a ellos. Los ejes forman un sistema ortogonal diestro (según la ley de la mano derecha), y la aceleración es positiva cuando se orienta hacia el lado positivo del eje de coordenadas.

Sesgo:

Acelerómetro: 24mg

Giróscopo: 20°/hr

Factor de escala:

Acelerómetro: 1%

Giróscopo: 1.5%

❖ *Epson*

Epson es una unidad de medición inercial de alta estabilidad, precisión. Posee pequeñas dimensiones. Es muy utilizada en aplicaciones industriales. (14)

Sesgo:

Acelerómetro: 8mg

Giróscopo: 0,5°/s

Factor de escala:

Acelerómetro: 0%

Giróscopo: 0%

❖ *Gladiador Landmark*

Landmark tiene tamaño ideal para aplicaciones que exigen gran rendimiento y bajo costo. La unidad consume poca energía eléctrica, y es muy adecuada para entornos extremos. Se utiliza en aplicaciones de vehículos autónomos que requieren de alto rendimiento, así como una gran durabilidad. (12)

Sesgo:

Acelerómetro: 0.1mg

Giróscopo: 25°/hr

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

Factor de escala:

Acelerómetro: 0.2%

Giróscopo: 0,2%

- Algoritmo de navegación inercial

Un algoritmo de navegación inercial es un conjunto de ecuaciones que permite resolver ecuaciones diferenciales para diseñar un sistema computacional. Relacionan variables de referencia a partir de información obtenida con sensores de distintas características. Permite resolver numéricamente en tiempo real las ecuaciones de navegación, que son aquellas que combinan la posición, velocidad y orientación, cuyas funciones forzantes son la velocidad angular inercial y la fuerza específica, adquiridas de una IMU (2).

1.5 Soluciones existentes de sistemas para generación de datos en los INS

En el estudio de la literatura consultada para la presente investigación se encontraron varias soluciones al problema de generación de datos inerciales, las cuales se caracterizan a continuación:

- NaveGo

Es un sistema que funciona como plataforma de prueba para el adecuado análisis y diseño de sistemas de navegación integrados. Consta fundamentalmente de dos partes: 1) un generador de salidas simuladas de varios sensores, y 2) un simulador de un sistema de navegación integrado débilmente acoplado. Los modelos de los sensores propuestos y el sistema en general son evaluados desde la perspectiva de la implementación, comparando el desempeño entre sensores reales y sus respectivos sensores simulados. Se verifica que los sensores inerciales simulados tengan una respuesta cercana a los reales (16).

Como resultado del estudio realizado al sistema, se determina que no se puede utilizar por los siguientes motivos:

Es desarrollado para la realización de una trayectoria, la cual se ejecuta desde la visión del programador sin la comprobación de sus resultados con otras aplicaciones que garanticen su correcto funcionamiento. Los datos graficados correspondientes a sus errores de posición, velocidad y orientación son muy elevados, lo que imposibilita que la trayectoria sea la adecuada.

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

- Modelo Matemático y Simulación en Matlab para un Sistema de Navegación Inercial Strapdown (SINS).

Los principales objetivos de este artículo científico publicado por Wen Zhang en el 2012 son: establecer modelos matemáticos para representar trayectorias (trayectoria circular, en línea recta, estática y en zigzag) y desarrollar un sistema en Matlab para la aplicación paso a paso de cada una. El documento describe las coordenadas relacionadas con el INS en los tres ejes ortogonales (el bastidor de carrocería, el sistema de referencia inercial, el marco de la Tierra, el marco de navegación, el marco ENU (este, norte, arriba y abajo), y el marco de vagar acimut y las cifras para ilustrar la relación entre los marcos. El principio básico de los SINS se describe en el marco de navegación vagar acimut (p-marco) ya que las salidas de giróscopos y acelerómetros son más fáciles de obtener en este marco (17).

Al realizar la implementación de las trayectorias propuestas en el artículo se muestra el modelo matemático que se obtiene como resultado:

Modelo matemático de la trayectoria circular:

1. $V_G = \text{constante}$

2. $\Delta\psi = \text{mod}\left(\frac{2\pi\Delta t}{T_{\text{circle}}}, 2\pi\right)$

3. $\Delta\Psi = \frac{2\pi}{T_{\text{circle}}}$

4. $a_E = -\frac{2\pi V_G \cos\psi}{T_{\text{circle}}}$

5. $a_N = -\frac{2\pi V_G \sin\psi}{T_{\text{circle}}}$

Resultado del modelo matemático:

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

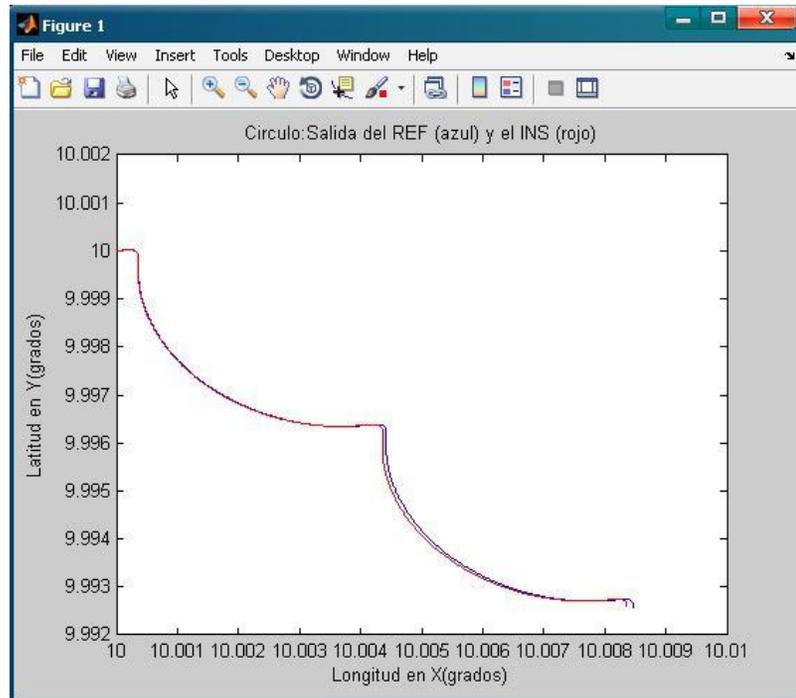


Fig. 2 Representación de la implementación, por los autores del presente trabajo, de la trayectoria circular del artículo publicado por Wen Zhang en el 2012.

Del estudio realizado y a partir de la implementación de las trayectorias planteadas en el artículo de Wen Zhang por parte de los autores de la presente investigación, se evidenció que dos de ellas no cumplen con lo descrito en el artículo. Según la implementación explicada de las trayectorias, estas se realizan en el marco P (wander azimuth), las cuales trabajan orientadas en los polos norte y sur; la mayoría de las aplicaciones rara vez funcionan bajo este ambiente tan extremo.

A partir de las deficiencias detectadas en los sistemas anteriormente analizados, se considera que se debe desarrollar un sistema que proporcione un detallado funcionamiento en la generación de los datos inerciales para el desarrollo de las trayectorias. Para ello, se debe realizar un ajuste con respecto a los modelos matemáticos para la representación de las diferentes trayectorias, a través de la generación de datos inerciales. Estos serán verificados mediante la integración con un INS, para la observación de su correcto funcionamiento.

La solución que se propone va a utilizar elementos positivos aportados por las soluciones previamente analizadas. De la plataforma NaveGo se tendrá en cuenta el trabajo con varias IMUs y del artículo publicado por Wen Zhang los modelos matemáticos para generar trayectorias preestablecidas.

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

1.6 Marcos de referencias

A continuación relacionamos los diferentes marcos de referencias que se utilizan en los sistemas de navegación inercial

- ❖ El sistema de referencia inercial (marco i): tiene su origen en el centro de la Tierra y sus ejes son no giratorio con respecto a las estrellas, definido por los ejes Oxi, Oyi, Ozi. El eje Ozi coincidente con el eje polar de la Tierra.
- ❖ El marco de la Tierra (marco e): tiene su origen en el centro de la Tierra y sus ejes son no giratorio con respecto a la Tierra; estos ejes se indican con Oxe, Oye, y Oze. El eje Oze se encuentra a lo largo del eje polar de la Tierra. El eje Oxe se encuentra a lo largo de la intersección del plano del meridiano de Greenwich con el plano ecuatorial de la Tierra. El marco de la tierra gira con respecto al marco inercial a una velocidad (ω_{ie}) alrededor del eje Ozi.
- ❖ El marco de navegación (marco n): es un marco geográfico local, que tiene su origen en la ubicación del sistema de navegación, el punto P, y ejes alineados con las direcciones del norte, este y la vertical local (abajo). La velocidad de giro del marco de navegación, con respecto al bastidor fijo a la Tierra (ω_{ie}), se rige por el movimiento del punto P con respecto a la Tierra. Esto se refiere a menudo como la velocidad de transporte.
- ❖ El marco wander azimut (marco p): es usado para evitar las singularidades en el cálculo que se producen en los polos, manteniendo su eje paralelo al norte verdadero.
- ❖ El marco del cuerpo (marco b): mide movimiento con respecto a un sistema inercial donde los conjuntos de ejes ortogonales tienen su origen en el centro del vehículo.

1.7 Métodos de la simulación de trayectorias

La simulación de las trayectorias, es obtenida mediante la generación de datos de los giróscopos y los acelerómetros ortogonales de acuerdo con la trayectoria diseñada, para luego ser mecanizada en un algoritmo de navegación. La trayectoria simulada del vehículo se establece a través de las salidas de cada sensor que se deriva utilizando el principio inverso de un algoritmo de navegación inercial (17). Se requiere, en cualquier caso, el conocimiento de las condiciones iniciales (posición, velocidad y orientación).

La generación de trayectorias para vehículos autónomos es un tema ampliamente tratado en el campo de la navegación inercial, para su generación se pueden especificar los siguientes métodos:

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

- ❖ Generación de trayectorias mediante algoritmos genéticos.
- ❖ Redes Neuronales Artificiales.
- ❖ Generación de Trayectoria basada en un tiempo de navegación.
- ❖ Generación de trayectoria basada en rectas y arcos de circunferencias. (18)

La generación de las trayectorias, de la presente investigación, estará sustentada en el método resultante de la unificación de los métodos de generación de trayectoria basada en un tiempo de navegación y en la basada en rectas y arcos de circunferencias.

1.8 Herramientas y lenguaje de programación utilizados en la generación de trayectoria

La selección de las herramientas y lenguaje de programación a utilizar se realizó teniendo en cuenta las características del sistema a desarrollar.

1.8.1 Matlab

Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware (18).

❖ Lenguaje de programación:

Las aplicaciones de MATLAB se desarrollan en un lenguaje de programación propio. Este es interpretado, y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo, como a través de un archivo de script (archivos *.m). Permite operaciones de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda y programación orientada a objetos.

1.8.2 Herramienta CASE

CASE son las siglas correspondientes a *Computer Aided Software Engineering*, que en su traducción al español significa Ingeniería de Software Asistida por Computadoras. Las herramientas CASE son diversas aplicaciones informáticas destinadas a aumentar la productividad en el desarrollo de software reduciendo el costo de las mismas en términos de tiempo y dinero. Están destinadas a: facilitar el uso de las distintas

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

metodologías propias de la ingeniería del software. Son utilizadas para la modelación de la metodología utilizada en el desarrollo de la investigación.

❖ Visual Paradigm for UML

Visual Paradigm usa UML como lenguaje de modelado. Permite la generación automática de reportes en formato pdf y html al igual que realiza el reconocimiento de artefactos de ingeniería a partir de reconocimiento de textos formales o informales. Implementa una actualización automática del modelo de diseño y código permitiendo mantener la documentación de los modelos actualizados con los cambios que ocurran en ambos sentidos, optimizando la descripción textual de elementos de código a partir de la descripción visual (19).

1.9 Metodologías de desarrollo de software

Una Metodología de Desarrollo de Software es un conjunto de procedimientos, técnicas y ayudas a la documentación para el desarrollo de productos de software. En el mismo se van indicando paso a paso todas las actividades a realizar para lograr el producto informático deseado, indicando además que personas deben de participar en el desarrollo de las actividades y qué papel deben desempeñar. Define también la información que se debe producir como resultado de una actividad y la información necesaria para comenzarla.

Teniendo en cuenta la filosofía de desarrollo de las metodologías, aquellas con mayor énfasis en la planificación y control del proyecto, en especificación precisa de requisitos y modelado, reciben el apelativo de Metodologías Tradicionales o Pesadas.

Estas metodologías tradicionales imponen una disciplina de trabajo sobre el proceso de desarrollo del software, con el fin de conseguir un software más eficiente. Para ello, se hace énfasis en la planificación total de todo el trabajo a realizar y una vez que está todo detallado, comienza el ciclo de desarrollo del producto software. Se centran especialmente en el control del proceso, mediante una rigurosa definición de roles, actividades, artefactos, herramientas y notaciones para el modelado y documentación detallada. Además, las metodologías tradicionales no se adaptan adecuadamente a los cambios, por lo que no son métodos adecuados cuando se trabaja en un entorno, donde los requisitos no pueden predecirse o bien pueden variar. En las metodologías donde se encargan de valorar al individuo y las iteraciones del equipo más que a las herramientas o los procesos utilizados, se hace mucho más importante crear un producto software que funcione que escribir mucha documentación. El cliente está en todo momento colaborando en

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

el proyecto. Es más importante la capacidad de respuesta ante un cambio realizado que el seguimiento estricto de un plan. Estas metodologías son conocidas como Ágiles. (20)

Por los recursos, el personal y tiempo para realizar el trabajo se opta por usar una metodología ágil. Aunque los creadores e impulsores de las metodologías ágiles más populares han suscrito el manifiesto ágil y coinciden con los principios enunciados anteriormente, cada metodología tiene características propias y hace hincapié en algunos aspectos más específicos. A continuación, se listan dichas metodologías ágiles:

- ❖ SCRUM. (21)
- ❖ Crystal Methodologies. (22)
- ❖ Dynamic Systems Development Method (DSDM). (23)
- ❖ Adaptive Software Development (ASD). (24)
- ❖ Feature-Driven Development (FDD). (25)
- ❖ Lean Development (LD). (26)
- ❖ Extreme Programming (XP). (27)

De las metodologías mencionadas anteriormente, se realizó una comparación entre sus distintas características, con base en tres parámetros: vista del sistema como algo cambiante (SV), tener en cuenta la colaboración entre los miembros del equipo (CME) y las características más específicas de la propia metodología como son simplicidad, excelencia técnica, resultados, adaptabilidad. También incorpora como referencia no ágil el Modelo de capacidad de madurez (CMM) cuyo resultado se muestra en la siguiente tabla donde los valores más altos representan una mayor agilidad.

Tabla 1. Ranking de agilidad (Los valores más altos representan una mayor agilidad) (29)

	CMM	ASD	Crystal	DSDM	FDD	LD	Scrum	XP
SV	1	5	4	3	3	4	5	5
CME	2	5	5	4	4	4	5	5
Características Metodología (CM)								
Resultados	2	5	5	4	4	4	5	5
Simplicidad	1	4	4	3	5	3	5	5
Adaptabilidad	2	5	5	3	3	4	4	3

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

Excelencia técnica	4	3	3	4	4	4	3	4
Prácticas de colaboración	2	5	5	4	3	3	4	5
Media CM	2.2	4.4	4.4	3.6	3.8	3.6	4.2	4.4
Media Total	1.7	4.8	4.5	3.6	3.6	3.9	4.7	4.8

De acuerdo a lo descrito, se seleccionó la metodología XP porque intenta reducir la complejidad del software por medio de un trabajo orientado directamente al objetivo, basado en las relaciones interpersonales y la velocidad de reacción antes los cambios.

1.9.1 Programación Extrema (Extreme Programming, XP)

XP es una metodología ligera de desarrollo de software que se basa en la simplicidad, la comunicación y la realimentación o reutilización del código desarrollado. Esta metodología se basa en la idea de que existen cuatro variables que guían el desarrollo de sistemas: Costo, Tiempo, Calidad y Alcance. La metodología trata de dar al cliente el software que él necesita y cuando lo necesita. Por tanto, se debe responder muy rápido a las necesidades del cliente, incluso cuando los cambios sean al final de ciclo de la programación. (27)

La metodología de desarrollo XP está centrada en potenciar las relaciones entre personas como clave para obtener éxito en el desarrollo del software, esta promueve el trabajo en equipo, la comunicación con el cliente, proporcionando a cada uno, un buen clima de trabajo y un aspecto muy importante, el aprendizaje de los programadores. (27)

Consta fundamentalmente con una historia de usuario que representa los requisitos funcionales del sistema, utiliza procesos y roles de XP y consta con un ciclo de vida del proceso que consiste en 4 fases fundamentales

- ❖ **Exploración:** Los clientes definen las historias de usuario, el equipo de desarrollo se familiariza con las herramientas, tecnologías y prácticas que se utilizarán en el proyecto.
- ❖ **Planificación de la Entrega:** Se establece la prioridad de cada historia de usuario, se estiman los esfuerzos que requieren cada una de las tareas al igual que el tiempo de duración de cada una de ellas.
- ❖ **Iteraciones:** Se incluyen varias iteraciones sobre el sistema antes de ser entregado, las mismas no deben exceder las tres semanas.

Capítulo 1. Fundamentos teóricos de los sistemas de navegación inercial

- ❖ **Producción:** En esta fase se realizan pruebas adicionales y revisiones de rendimiento antes de que el sistema sea trasladado al entorno del cliente. De igual forma se toman decisiones sobre añadir nuevas características al sistema. (27)

1.10 Conclusiones parciales

A través del análisis en el capítulo se pudo evidenciar que:

- ❖ El estudio de los antecedentes de los sistemas de navegación inercial, sus componentes y los conceptos asociados al problema posibilitó un mejor dominio acerca de la generación de datos inerciales.
- ❖ El estudio de las soluciones existentes para la generación de datos inerciales en los sistemas de navegación inerciales demostró que no cumplen con los requisitos especificados para darle solución a la problemática planteada. Por lo que se determinó utilizar los elementos positivos aportados por la plataforma NaveGo y el artículo publicado por Wen Zhang.
- ❖ Para la generación de trayectorias de la investigación, se hará uso de los métodos mediante rectas y arcos y basado en el tiempo de navegación, debido a la facilidad de su implementación.
- ❖ La metodología XP servirá de guía para el desarrollo del sistema durante todo su ciclo de vida por su facilidad de trabajo y su capacidad para adaptarse a los cambios.

A partir de estos resultados se desarrollará el sistema informático, incluyendo la descripción de los principales patrones de diseño y tareas de ingeniería.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LOS DATOS INERCIALES

2.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los elementos que forman parte de las características del sistema tales como: lista de reserva del producto, propuesta del sistema, patrones de diseño, así como las características no funcionales. Además, se explican los artefactos generados a través de la aplicación de la metodología XP que da paso al procesamiento del ciclo de realización de la propuesta de solución.

2.2 Propuesta de solución

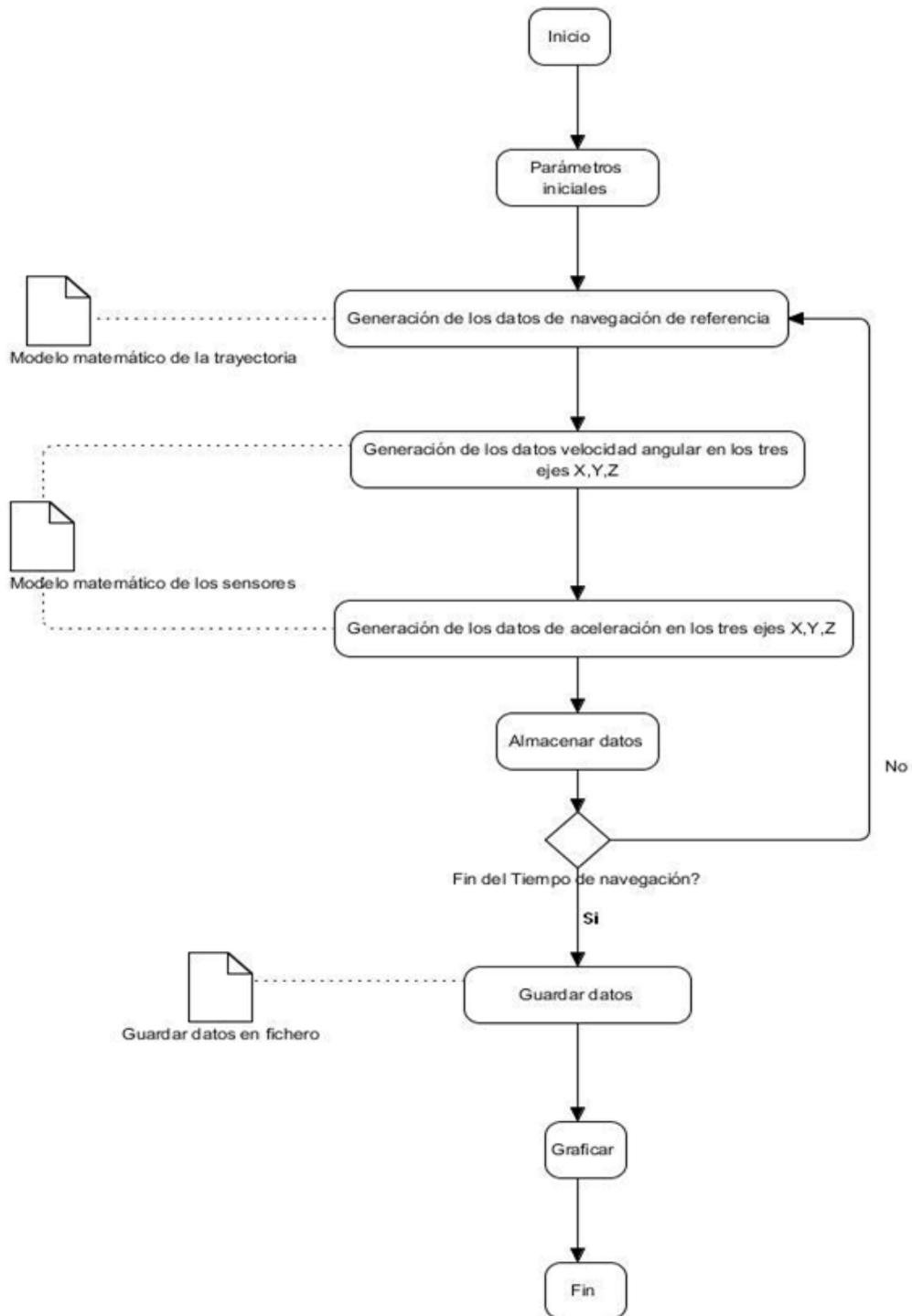
Partiendo de los sistemas existentes se propone realizar un sistema informático que sea capaz de generar datos inerciales para un algoritmo de navegación inercial. Rigiéndose por lo publicado en (28) se tiene como referencia la utilización de varias IMUs para probar la efectividad del algoritmo realizado a través de las deficiencias en cuantos a los errores de entradas que estos proponen. Tratando, de corregir lo propuesto por (4), donde este define que la representación de los datos se realiza a partir del marco p , la mayoría de las aplicaciones rara vez funcionan bajo este ambiente extremo, típico de los polos, por lo que para generar datos inerciales para la construcción del algoritmo que se propone en esta solución se trabajó en el marco de navegación.

La generación de los datos se realiza mediante el proceso inverso del INS que consiste en: la entrada de la posición, la velocidad y los ángulos de orientación, donde el vehículo sigue un recorrido especificado en cada instante de tiempo a través de la obtención de aceleración lineal y velocidad angular. Este proceso inverso como entrada al algoritmo, especifica los datos característicos de la unidad de medición inercial, elegibles por el usuario final en una base de casos preestablecida, donde se diferencian los errores de sesgo y factor de escala. También se brinda la posibilidad de generar los datos inerciales en función del tipo de trayectoria elegida por el usuario y posibilita establecer el tiempo de navegación que coincide con el tiempo de duración del experimento.

Las entradas de datos son procesadas por un conjunto de modelos matemáticos característicos de los acelerómetros y giróscopos, así como la actualización de cada uno de los datos procesados para su nueva utilización a lo largo del tiempo de navegación. De esta manera proporciona salidas que contienen las aceleraciones lineales y las velocidades angulares en los tres ejes, así como los parámetros que servirán como referencia para cualquier algoritmo de navegación inercial que haga uso de estos datos. Estas salidas

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

del algoritmo serán guardadas es un fichero con extensión Matlab, para su posterior uso por otros usuarios que incursionen en el desarrollo de algoritmos de navegación inercial.



Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Fig. 2 Diagrama del proceso de generación de datos inerciales

2.3 Lista de reserva del producto

Una vez identificados los principales conceptos del dominio del problema, se puede hacer un primer acercamiento a los requisitos que debe cumplir el sistema, así como a su prioridad.

La Lista de Reserva del Producto (LRP) que se muestra a continuación es el resultado final de una serie de cambios en cuanto a requisitos y funcionalidades. La misma consta de una lista de prioridad de los requisitos funcionales y no funcionales del sistema que se va a desarrollar, el ítem de prioridad, la descripción de cada requisito, la estimación en días y por quién fue estimado. La prioridad es categorizada por el cliente en Muy Alta, Alta, Media y Baja. (29)

Tabla 2. Lista de reserva del producto

Prioridad	Ítem *	Descripción	Estimación	Estimado por
Alta				
	1	Definir tipo de trayectoria.	3 semanas	Programador
	2	Mostrar características de la trayectoria.	3 semanas	Programador
	3	Definir parámetros de la trayectoria.	4 semanas	Programador
	4	Generar datos inerciales.	4 semanas	Programador

2.4 Características no funcionales del sistema

Para un correcto funcionamiento del sistema fueron definidos los siguientes requisitos no funcionales, que el producto debe cumplir. Esto se debe asumir como propiedades o argumentos que hacen que el producto sea atractivo y aceptado. No definen el éxito general del producto, pero influyen en la evaluación del cliente.

Requisitos de usabilidad

- ❖ Los usuarios deben poseer conocimientos básicos referentes al uso de una computadora y de la herramienta Matlab.

Requisitos de rendimiento

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

- ❖ El sistema debe garantizar una respuesta rápida en función del número de iteraciones definidas por cada tipo de trayectoria y el tiempo de experimentación.

Hardware:

- ❖ Intel(R) Pentium(R) processor 1.60Hz o superior.
- ❖ RAM: mínimo 512.

Software:

- ❖ Sistema: GNU-Linux, Windows.
- ❖ Matlab en su versión 7 o superior, para Windows o GNU-Linux

Requisitos legales:

- ❖ La Universidad de las Ciencias Informáticas poseerá la propiedad intelectual sobre el producto final.

2.4 Roles de la metodología.

Se definió como un rol de la metodología aquel que interactúa de una forma u otra con el mecanismo, ya sea vinculado al proceso de desarrollo del mismo, así como quién haga uso de este.

Para el desarrollo de esta aplicación se definieron solo los roles de:

- ❖ Cliente
- ❖ Desarrollador

Tabla 3. Roles de la metodología

Roles	Descripción
Cliente	Utiliza el sistema para seleccionar y adicionar datos sensoriales de las unidades de medición inercial, para la realización de las trayectorias preestablecidas.
Desarrollador	Es la persona encargada de desarrollar el mecanismo que cumpla con todas las especificaciones del cliente.

2.5 Fase de exploración

Durante esta fase se definieron las historias de usuarios necesarias para desarrollar un sistema que diera solución al problema planteado.

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Historias de Usuarios

Las historias de usuarios son las técnicas utilizadas en la metodología XP, donde se representa una breve descripción de los requisitos del software. El cliente debe usar una terminología sencilla y sin lenguaje técnico en el momento de detallar cada una de las actividades que realizará el sistema. (27)

HU1. Definir tipo de trayectoria.

HU2. Mostrar características de la trayectoria.

HU3. Definir parámetros de la trayectoria.

HU4. Generar datos inerciales.

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Tabla 4. Definir unidad de medición inercial

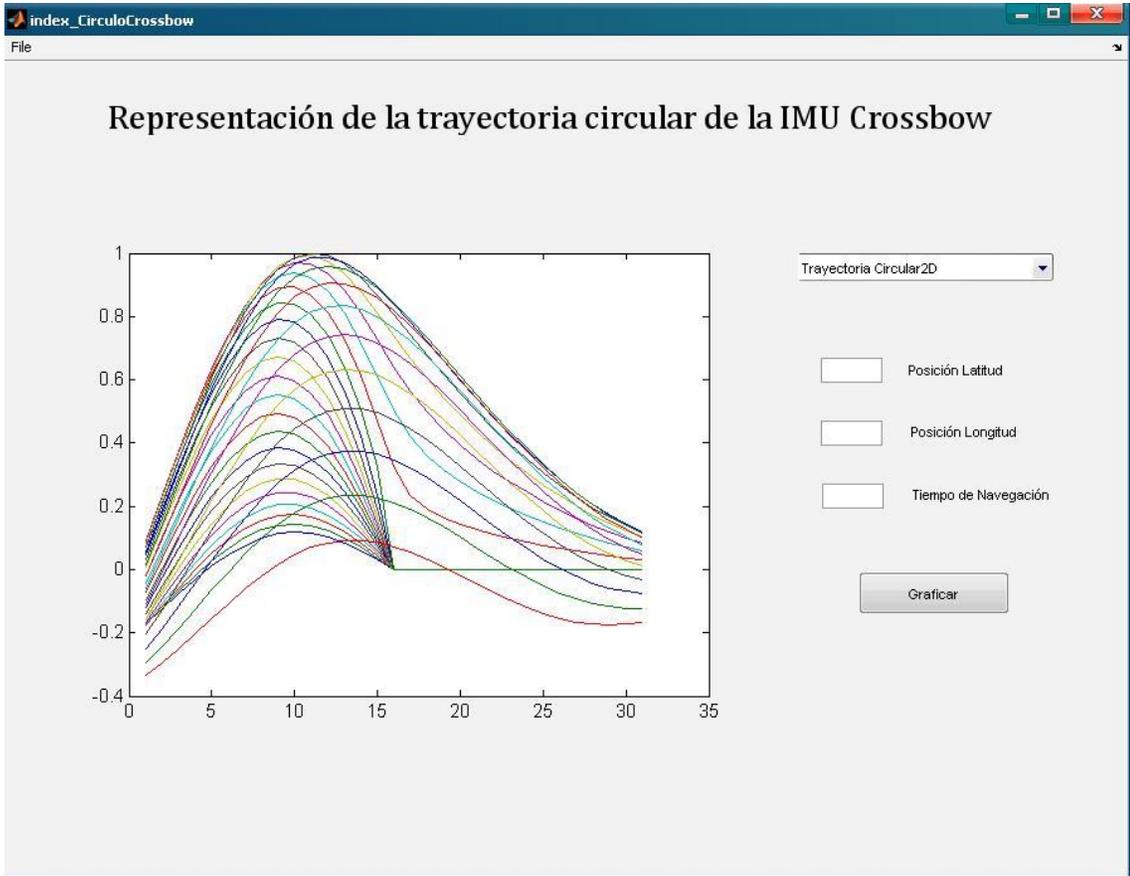
Historia de Usuario	
Número: HU1	Nombre Historia de Usuario: Definir tipo de trayectoria.
Modificación de Historia de Usuario Número: Ninguna	
Usuario: Administrador	Iteración Asignada: 1
Prioridad en Negocio: Alta (Alta / Media / Baja)	Puntos Estimados: 3
Riesgo en Desarrollo: Alta (Alta / Media / Baja)	Puntos Reales: 3
Programador(es) responsable(s): Yaneisy Borchel García	
Descripción: El cliente establece en el sistema que tipo de trayectoria desea utilizar dependiendo de cada una de las Unidad de medición representadas en este.	
Observaciones.	

Prototipo de Interfaz:



Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Tabla 5. Mostrar características de la trayectoria

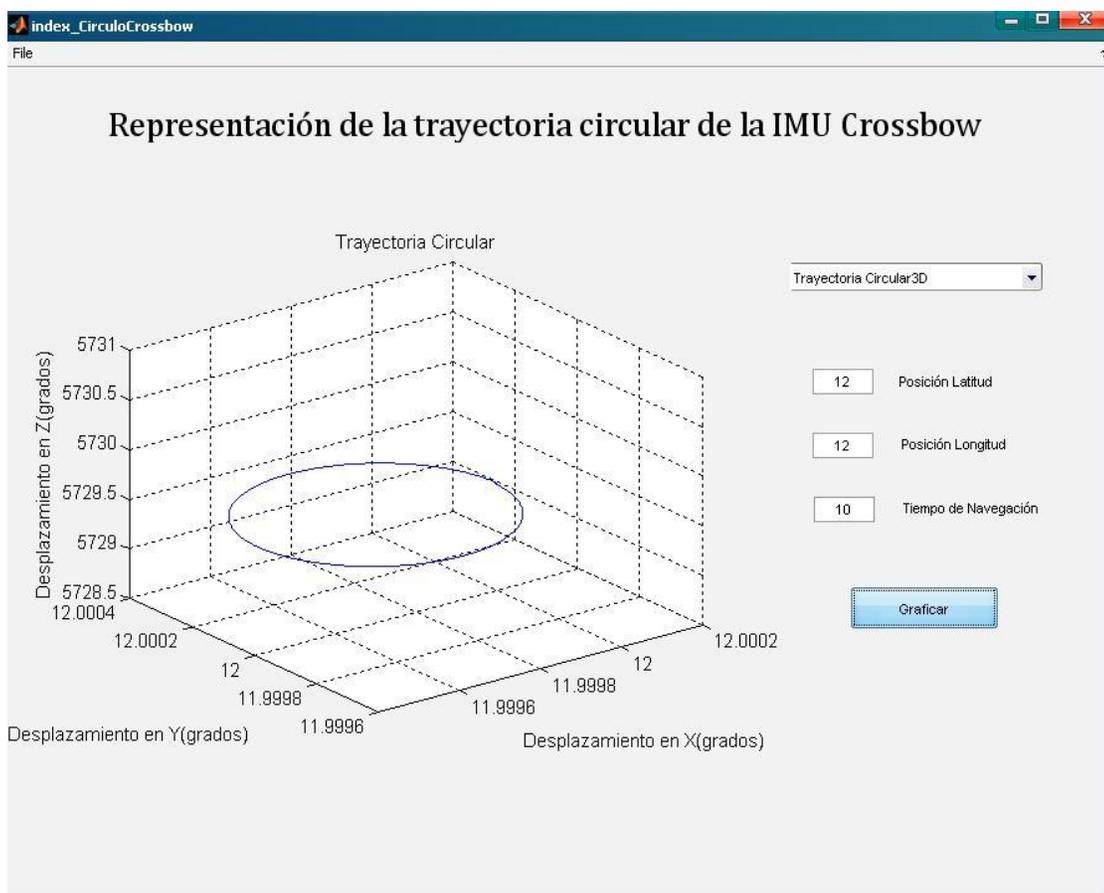
Historia de Usuario	
Número: HU2	Nombre Historia de Usuario: Mostrar características de la trayectoria.
Modificación de Historia de Usuario Número: Ninguna	
Usuario: Administrador	Iteración Asignada: 2
Prioridad en Negocio: Alta (Alta / Media / Baja)	Puntos Estimados: 3
Riesgo en Desarrollo: Alta (Alta / Media / Baja)	Puntos Reales: 3
Programador(es) responsable(s): Yaneisy Borchel García	
Descripción: El sistema muestra las características de cada trayectoria con la que va a interactuar el usuario, mostrando una barra deslizante con estas.	
Observaciones.	
Prototipo de Interfaz:	
	

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Tabla 6. Definir los parámetros de las trayectorias a ejecutar

Historia de Usuario	
Número: HU3	Nombre Historia de Usuario: Definir parámetros de la trayectoria.
Modificación de Historia de Usuario Número: Ninguna	
Usuario: Administrador	Iteración Asignada: 2
Prioridad en Negocio: Alta (Alta / Media / Baja)	Puntos Estimados: 4
Riesgo en Desarrollo: Alta (Alta / Media / Baja)	Puntos Reales: 4
Programador(es) responsable(s): Niharby Díaz Rodríguez	
Descripción: El cliente establece en el sistema los parámetros de la trayectoria seleccionada, su punto de partida en latitud y longitud así como el tiempo que debe durar la trayectoria.	
Observaciones.	

Prototipo de Interfaz:



Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Tabla 7. Implementar algoritmo de generación de datos inerciales

Historia de Usuario	
Número: HU4	Nombre Historia de Usuario: Generar datos inerciales.
Modificación de Historia de Usuario Número: Ninguna	
Usuario: Administrador	Iteración Asignada: 2
Prioridad en Negocio: Alta (Alta / Media / Baja)	Puntos Estimados: 4
Riesgo en Desarrollo: Alta (Alta / Media / Baja)	Puntos Reales: 4
Programador(es) responsable(s): Niharby Díaz Rodríguez	
Descripción: A partir de la elección de la trayectoria, se debe implementar el cálculo para cada tiempo de muestreo de las velocidades angulares y la aceleración lineal, en cada período de muestreo, y luego registrar en un fichero los datos calculados. Se deben graficar los resultados.	
Observaciones.	

2.6 Fase de planificación

Una vez definida las historias de usuarios se pasó a determinar su prioridad, así como la estimación de esfuerzo necesario para su realización.

La planificación se realizó basándose en el tiempo y alcance del sistema. Se llevó a cabo por el número de iteraciones determinándose cuantos puntos se pueden completar en el tiempo planificado para cada iteración.

❖ Estimación de esfuerzos por historia de usuario.

En la siguiente tabla se muestra la estimación de esfuerzo para cada una de las historias de usuarios definidas para el desarrollo de la solución propuesta.

Tabla 8. Estimación de esfuerzos.

Historias de Usuario	Puntos de Estimación
Definir tipo de trayectoria	3 semanas
Generar datos inerciales	3 semanas
Mostrar características de la trayectoria	4 semanas

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Definir parámetros de la trayectoria	4 semanas
--------------------------------------	-----------

❖ Plan de Iteraciones.

Una vez definidas las Historias de Usuarios (HU) y estimado el esfuerzo propuesto se ejecutó el sistema en dos iteraciones, describiéndose a continuación de manera más detallada:

Iteración I: Tiene como objetivo realizar la HU 1, referente al estudio y selección de las diferentes unidades de medición inercial y la muestra de las características esenciales de las trayectorias.

Iteración II: Tiene como objetivo realizar las HU2, HU3 y HU4, muestra el tipo de trayectoria y las características esenciales a generar, indicando el punto de salida que se va a representar y el tiempo de navegación en el sistema.

2.7 Plan de duración de las iteraciones.

Después de realizados la estimación de esfuerzo y el plan de iteraciones, se crea el plan de duración de las iteraciones que su finalidad es mostrar la duración de cada iteración, así como el orden en que serán implementadas las HU en según la prioridad asignada por el cliente.

Tabla 9. Plan de duración de las iteraciones.

Iteración	Historias de Usuario	Duración total de las iteraciones (semanas)
Iteración I	Definir tipo de trayectoria	3
Iteración II	Mostrar características de la trayectoria	11
	Definir parámetros de la trayectoria	
	Generar datos inerciales	

2.8 Desarrollo de iteraciones de las tareas de ingeniería

Durante el transcurso del proceso de iteraciones se lleva a cabo un plan de revisión y se modifica en caso de ser necesario. Las tareas de la ingeniería son escritas por el equipo de desarrollo, ofreciendo detalladamente cómo realizar su implementación y estimando un tiempo más cercano a la realidad para cada una.

La metodología XP, propone que una vez que se realice una HU es necesario probar y mostrar al cliente para comprobar si cumple con las especificaciones hechas por el mismo. Para esto, en el proceso de

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

implementación, las HU fueron desglosadas en tareas de ingeniería (TI). Dichas TI se muestran mediante tablas que contienen un conjunto de campos, en los que se especifican los siguientes datos:

- ❖ Número de la tarea: Los números deben ser consecutivos.
- ❖ Número de HU: Número de la historia de usuario a la que pertenece la tarea.
- ❖ Nombre Tarea: Nombre que identifica a la tarea.
- ❖ Tipo de Tarea: Las tareas pueden ser de: Desarrollo, Corrección, Mejora, Otra (Especificar).
- ❖ Puntos Estimados: Tiempo estimado en días que se le asignará a su desarrollo.
- ❖ Fecha Inicio: Fecha en que se inicia el desarrollo de la tarea.
- ❖ Fecha Fin: Fecha en que finaliza el desarrollo de la tarea.
- ❖ Programador Responsable: Nombre y apellidos del programador.
- ❖ Descripción: Breve descripción de la tarea.

2.8.1 Iteración I

Tabla 10.HU abordadas en la Iteración I

Historias de usuario	Tiempo de Implementación (semanas)	
	Estimación	Real
Definir tipo de trayectoria	3	3

Tabla 11.HU abordadas en la Iteración I

Tarea de Ingeniería	
No.de la tarea: 1	No.de la HU: 1.1
Nombre de la tarea: Definición de las trayectorias en una unidad de medición inercial.	
Tipo de tarea: Desarrollo	Puntos estimados: 3
Fecha inicio: 22/02/2016	Fecha fin: 15/03/2016
Programador responsable: Yaneisy Borchel García	

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Descripción: Definición de los parámetros esenciales de las IMUs para la representación de las trayectorias en el sistema, dependiendo de cada uno de los atributos correspondiente a su funcionamiento.

2.8.2 Iteración II

Tabla 12.HU abordadas en la Iteración II

Historias de usuario	Tiempo de Implementación (semanas)	
	Estimación	Real
Mostrar características de la trayectoria	3	3
Definir parámetros de la trayectoria	4	4
Generar de datos inerciales	4	4

Tabla 13.HU abordadas en la Iteración II

Tarea de Ingeniería	
No.de la tarea: 1	No.de la HU: 2.1
Nombre de la tarea: Características de las trayectorias.	
Tipo de tarea: Desarrollo	Puntos estimados: 3
Fecha inicio: 15/03/2016	Fecha fin: 5/04/2016
Programador responsable: Yaneisy Borchel García	
Descripción: Definir las funcionalidades necesarias para interpretar los diferentes gradientes y atributos que poseen las trayectorias para su aplicación y transformación.	

Tabla 14. HU abordadas en la Iteración II

Tarea de Ingeniería	
No.de la tarea: 1	No.de la HU: 3.1
Nombre de la tarea: Definición de los parámetros de las trayectorias.	
Tipo de tarea: Desarrollo	Puntos estimados: 4
Fecha inicio: 5/04/2016	Fecha fin: 3/05/2016
Programador responsable: Niharby Díaz Rodríguez	
Descripción: Representación de las funcionalidades necesarias para el interpretación de los diferentes objetos propuestos por cada trayectoria así como su aplicación y transformación correspondientes.	

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Tabla 15. HU abordadas en la Iteración II

Tarea de Ingeniería	
No.de la tarea: 1	No.de la HU: 4.1
Nombre de la tarea: Implementación de algoritmos para la de generación de datos inerciales.	
Tipo de tarea: Desarrollo	Puntos estimados: 4
Fecha inicio: 3/05/2016	Fecha fin: 31/05/2016
Programador responsable: Niharby Díaz Rodríguez	
Descripción: Cálculo de las velocidades angulares y la aceleración lineal, en cada período de muestreo.	

2.9 Patrones de diseño

Los patrones de diseño son la base para la búsqueda de soluciones a problemas comunes en el desarrollo de software y otros ámbitos referentes al diseño de interacción o interfaces. En general los patrones de diseño facilitan el aprendizaje y comunicación entre los diseñadores pues poseen una serie de características que definen las estructuras de diseño (o sus relaciones) para el desarrollo de software, enunciadas a continuación:

- ❖ Una solución estándar para un problema común de programación.
- ❖ Una técnica para flexibilizar el código haciéndolo satisfacer ciertos criterios.
- ❖ Un proyecto o estructura de implementación que logra una finalidad determinada.
- ❖ Un lenguaje de programación de alto nivel.
- ❖ Una manera práctica de describir los aspectos de la organización de un programa.
- ❖ Conexiones entre componentes de programas. (30)

La forma de un diagrama de objeto o de un modelo de objeto.

Teniendo en cuentas las características antes mencionadas se utiliza el patrón Singleton para la realización de la interfaz de usuario.

2.9.1 Singleton

El patrón de diseño Singleton se utiliza en la creación de las interfaces de usuario, está incluido por defecto en la herramienta de MATLAB. El controlador o función principal proporciona un punto de acceso global que es ejecutado a instanciar inicialmente la interfaz gráfica de usuario; y posteriormente llevar la interfaz gráfica de usuarios existentes en el sistema. (32)

```
function varargout = interfaz1(varargin)
addpath 'inter'
addpath 'Crossbow'
addpath 'Epson'
addpath 'Landmark'

% INTERFAZ1('Property','Value',...) creates a new INTERFAZ1 or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
% applied to the GUI before interfaz1_OpeningFcn gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to interfaz1_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @interfaz1_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @interfaz1_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

Fig 3. Definición del patrón de diseño Singleton

2.10 Diseño de la interfaz gráfica de usuario

La interfaz que se presenta ha sido desarrollada en el lenguaje de programación MATLAB. Para el diseño y construcción de la interfaz se empleó la herramienta GUIDE que permite un acceso total e intuitivo a los componentes de la interfaz, facilitando el diseño desde el inicio destacando las siguientes características:

- ❖ Cálculo matemático
- ❖ Desarrollo de algoritmos
- ❖ Adquisición de datos
- ❖ Modelado y simulación
- ❖ Análisis de datos y visualización

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

- ❖ Gráficos
- ❖ Desarrollo de aplicaciones e interfaces gráficas de usuario (GUIDE)

La interfaz inicial consta de unidades de medición inercial que representan en sí, las cuatro trayectorias definidas en el sistema a desarrollar. El usuario es capaz de escoger cualquier trayectoria de las distintas unidades de medición inercial. Estas se distinguen por sus parámetros y datos iniciales por defecto, donde se encuentran los errores provocados por el sesgo y por el factor de escala, tanto para los giróscopos como para los acelerómetros que proporciona cada IMU.

A continuación, se muestra un esquema de los diversos componentes que comprende la interfaz además de su descripción y propósito.



Fig 4. Representación de la Interfaz inicial.

Cuando el usuario selecciona algunas de las opciones dadas en la interfaz inicial, se le muestra una ventana o sub-interfaz con la trayectoria con la que se va a trabajar, de la cual recibirá los datos correspondientes para seguir sus estudios.

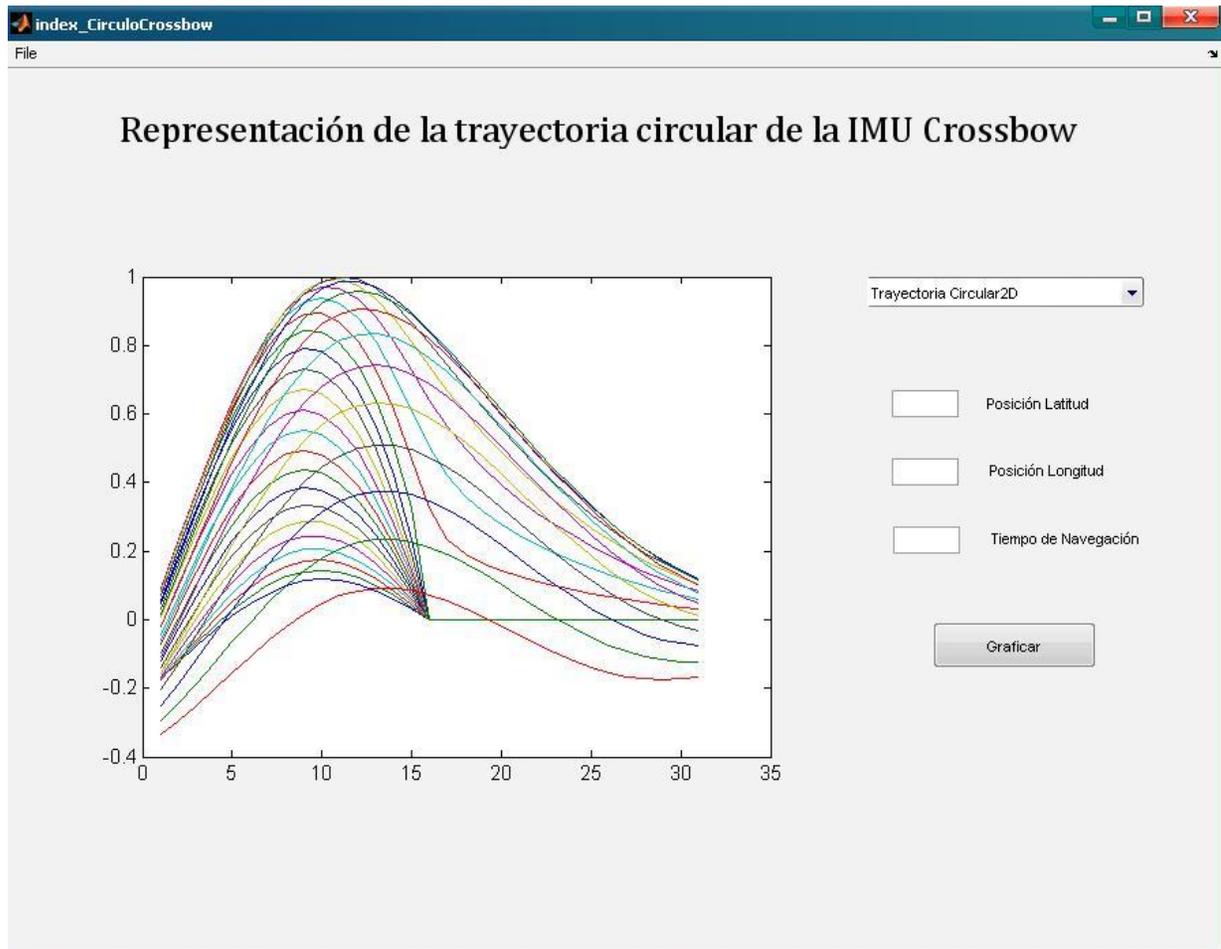


Fig 5. Representación de la interfaz de la trayectoria.

Esta segunda ventana o interfaz consta de un espacio para que el usuario defina lo que la trayectoria mostrará, desde que punto va a salir hasta el tiempo en que dicha trayectoria se va a mostrar. La trayectoria a representar se muestra tanto en dos, como en tres dimensiones para que el usuario la pueda observar desde cualquier punto de vista.

2.10.1 Introducción de datos

El usuario es capaz de introducir los datos a la interfaz siguiendo la siguiente secuencia de pasos:

- ❖ Campo posición en la latitud donde le permite al usuario definir un punto en la latitud que es la posición inicial del vehículo.
- ❖ Campo posición en la longitud donde le permite al usuario definir un punto en la longitud que es la posición inicial del vehículo.

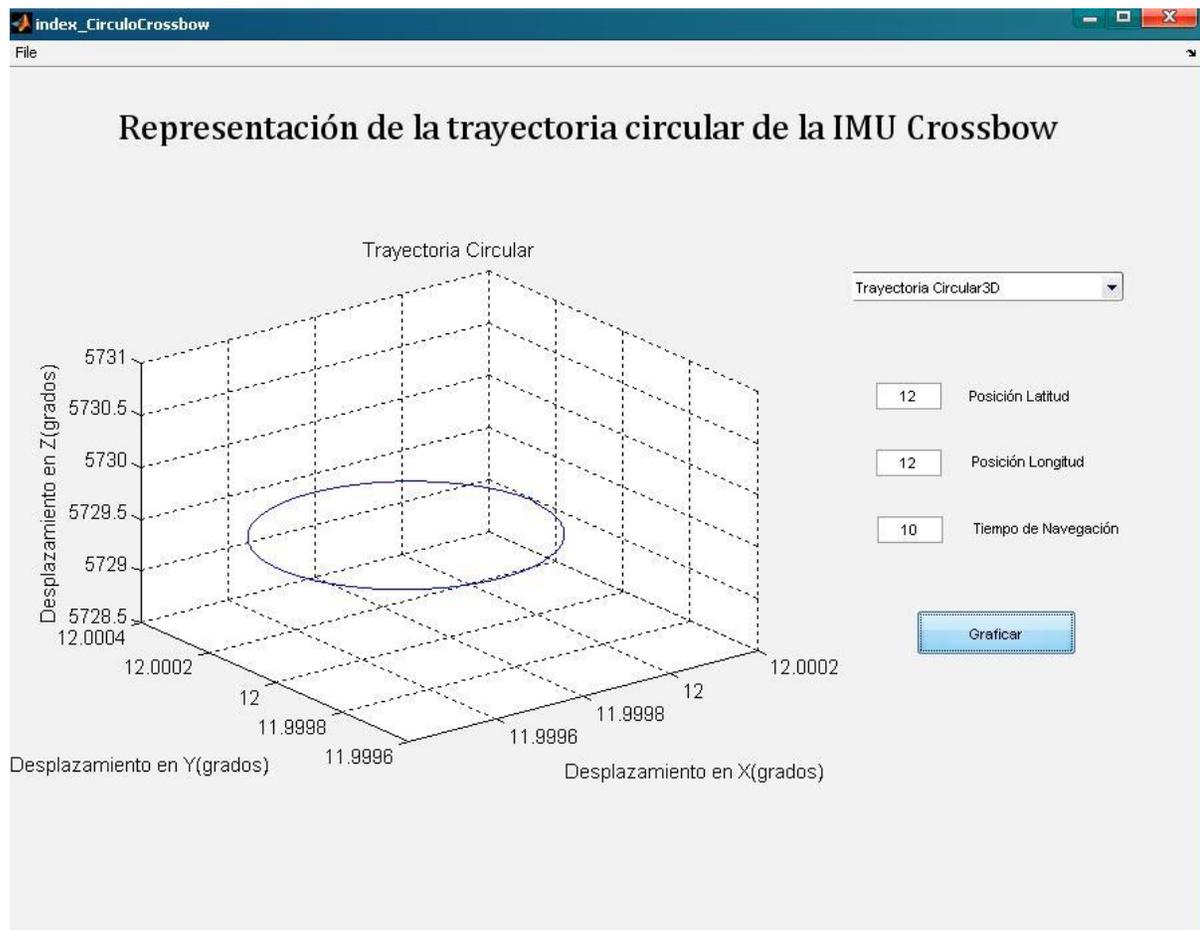
Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Uniéndolos estos dos puntos se definirá de donde va a salir la trayectoria desde cualquier dimensión.

- ❖ El tiempo de navegación se representa en segundos, este consiste en representar la trayectoria definida en un tiempo específico, mostrándola desde su punto inicial hasta el punto que dure el tiempo definido por el usuario donde el tiempo máximo a utilizar en esta investigación es de 100000 que equivale a 28 horas.

Los datos representados en cada una de las trayectorias se guardarán automáticamente en un fichero (.mat), para que luego el usuario si desea los pueda reutilizar en otro sistema. Los datos guardados son: aceleración en los tres ejes XYZ, la velocidad en los tres ejes XYZ, velocidad angular en los tres ejes XYZ, así como la latitud, longitud, altura.

A continuación, se muestra la representación de un resultado obtenido cuando se introdujo una serie de datos al sistema:



Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

Fig 6. Representación de los datos a introducir en la interfaz de la trayectoria.

2.11 Sistema de generación de datos inerciales

Para el diseño del sistema se tomó en cuenta el conjunto de ecuaciones propuesto por Wen Zhang en (4), con algunas modificaciones que mejoran el desempeño de las trayectorias. Se añade además el tiempo de experimentación deseado, y las estrategias de incremento de los parámetros de navegación propuestos por el mismo autor. Se tiene en cuenta la estrategia propuesta por Rodríguez Gonzales en (28) de tomar en cuenta más de una unidad de medición inercial, caracterizada por el sesgo y el factor de escala, que se obtienen de sus respectivas hojas de datos.

La propuesta consta de tres pasos:

- ❖ Definición de los parámetros iniciales
- ❖ Generación de los datos de referencia a partir del modelo de cada tipo de trayectoria, y luego la generación de datos inerciales.
- ❖ Graficación de los datos inerciales y de referencia.

Paso 1: Definición de los parámetros iniciales

Se proporcionan parámetros iniciales de diferentes escenarios de simulación, dependiendo de trayectorias y unidades de medición inercial. Teniendo en cuenta la posición inicial, expresado en latitud, longitud y altura; velocidades iniciales en cada eje compuesto en velocidad en el norte, velocidad en el este y velocidad UP (arriba y abajo), además de la variación de los ángulos de orientación dados por Pitch (alabeo), Roll (cabeceo) y Yaw (rumbo).

Paso 2: Generación de los datos de referencia a partir del modelo de cada tipo de trayectoria, y luego la generación de datos inerciales

A partir de los datos iniciales preestablecidos en los parámetros referentes a la generación de datos inerciales, se tiene como propuesta la realización de modelos distintivos, que contengan en sí los parámetros necesarios para representar una trayectoria preestablecida. Estas trayectorias son definidas a partir de lo propuesto por (4), se toma como referencia para la realización del sistema, las trayectorias en línea recta y la estática, proponiendo una mejora a las representas en forma circular y en zigzag.

Modelo matemático para la trayectoria circular

Como propuesta a la representación de la trayectoria circular correspondiente a un vehículo en movimiento

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

en el marco de navegación se tiene como dato característico en el sistema que este debe representarse mediante el siguiente modelo matemático:

$$V_G = N;$$

$$V_N = N^2;$$

$$V_U = 0;$$

$$a_N = \text{constante};$$

$$a_E = \text{constante};$$

$$\Delta\psi = \text{mod}\left(\frac{\pi\Delta t}{5}, N\right);$$

Donde

V_G : velocidad de la masa del cuerpo

V_N : velocidad en el norte

V_U : velocidad UP(arriba y abajo)

a_N : aceleración en el norte

a_E : aceleración en el este

$\Delta\psi$: incremento del rumbo

Δt : incremento del tiempo

N : número aleatorio

Para la representación de esta trayectoria los principales valores a utilizar se corresponden por la velocidad de la masa del cuerpo y la velocidad en el norte que se utilizan para representar la amplitud del recorrido de la trayectoria. El incremento en el rumbo indica un valor absoluto que este debe tener para su representación, estando entre cero y uno con el fin de definir un valor único en la trayectoria circular para evitar su distorsión.

Modelo matemático en la trayectoria en zigzag

La representación de la trayectoria en zigzag correspondiente a un vehículo en movimiento en el marco de navegación a lo largo de una línea en forma de s se realiza con el modelo matemático siguiente:

$$V_G = N^2;$$

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

$$V_N = N;$$

$$V_E = \sqrt{V_G^2 - V_N^2};$$

$$a_N = \text{constante};$$

$$a_E = \text{constante};$$

$$\Delta\psi = \text{mod}\left(\frac{N\pi\Delta t}{6}, N\right);$$

Donde

V_G : velocidad de la masa del cuerpo

V_N : velocidad en el norte

V_E : velocidad en el este

a_N : aceleración en el norte

a_E : aceleración en el este

$\Delta\psi$: incremento del rumbo

Δt : incremento del tiempo

N : número aleatorio

La trayectoria para su realización depende de la velocidad en el norte y de la velocidad de la masa del cuerpo para representar la distancia de su recorrido y se simboliza conjunto con la velocidad en el este, dependiente de las velocidades anteriores para que se defina de acuerdo a lo que se desea ver y no se distorsione la representación de la trayectoria en ningún momento. El incremento en el rumbo indica un valor absoluto que este debe tener para su representación utilizado conjunto con los demás parámetros, estando este entre cero y uno con el fin de definir un valor único en la representación de la trayectoria para evitar distorsión en su ejecución.

Luego de tener los parámetros iniciales, estos son procesados mediante los modelos matemáticos correspondientes a los acelerómetros y los giróscopos y actualizados para su nueva utilización a lo largo del tiempo de navegación definido en el sistema, los que proporcionarán salidas de aceleración lineal y velocidad angular para su posterior uso en otros sistemas.

Las representaciones de estas actualizaciones están dadas por:

Capítulo 2. Análisis, diseño e implementación de la generación de los datos inerciales

- ❖ La actualización de la velocidad se define como:

$$V \leftarrow V + a\Delta t$$

- ❖ La actualización de la posición se define como:

$$\text{latitud: } L \leftarrow L + \frac{V_N \Delta t}{R_N}$$

$$\text{longitud: } \lambda \leftarrow \lambda + \frac{V_E \Delta t}{R_N}$$

$$\text{orientación: } h \leftarrow h + V_U \Delta t$$

Donde

Δt : es el tiempo de muestreo

V_N : velocidad en el norte

V_E : velocidad en el este

V_U : velocidad UP (arriba y abajo)

Teniendo los datos de salidas propuestos por el sistema, dependiendo de las características definidas por los parámetros iniciales de la trayectoria a utilizar. Estos se representarán de forma gráfica dependiendo de las entradas especificadas por el usuario.

Paso 3: Graficación de los datos generados

Luego de transcurrido el tiempo de generación de los datos inerciales, así como los datos de referencia, se procede a la graficación de los resultados obtenidos. Mediante un intervalo de tiempo definido en el sistema que representara a la trayectoria desde una posición inicial dada hasta una posición final determinada por el tiempo de duración del experimento.

2.12 Conclusiones parciales

En este capítulo se realizó:

- ❖ Se obtuvieron los artefactos necesarios en correspondencia con la metodología seleccionada.
- ❖ Se caracterizó la solución adecuada para propiciar la construcción del sistema generador de datos inerciales para algoritmos de navegación inercial.

CAPÍTULO 3. PRUEBAS DE SOFTWARE AL SISTEMA DESARROLLADO

En el presente capítulo se describen las pruebas de software realizadas sobre la solución desarrollada, correspondiente a la metodología XP y sus respectivos resultados.

3.1 Pruebas

Para la realización de las pruebas en la metodología XP. Estas se dividen en dos grupos pruebas unitarias (encargadas de verificar el código) y las pruebas de aceptación o funcionales (destinadas a evaluar si al final de una iteración se consiguió la funcionalidad requerida diseñadas por el cliente final). Para las comparaciones entre los parámetros provenientes del INS y de los datos de referencias del sistema informático se utilizó la prueba estadística de análisis de varianza (ANOVA) para obtener la similitud entre sus conjuntos de datos. (32)

3.2 Pruebas unitarias

El objetivo fundamental de las pruebas unitarias es asegurar el correcto funcionamiento del código propuesto por el programador y los flujos de datos entre componentes. Estas siempre están orientados a caja blanca y permiten al programador conocer si determinada funcionalidad se puede agregar al sistema sin afectar su funcionamiento. Para la realización de esta prueba se utilizó un INS que conjunto con los datos que devuelve el sistema informático, se verificará la efectividad del código. (33)

Comprobación de los datos de salida del sistema informático desarrollado, al utilizar un INS.

Esta prueba se diseño mediante los datos que devuelve el sistema, los cuales se encuentra un fichero (.mat). Su objetivo es verificar que el algoritmo utilizado en cada uno de los procesos del sistema funcione correctamente. Al introducir los datos correspondientes de aceleración lineal y velocidad angular en un algoritmo de navegación inercial publicado, probado y validado, este devolverá la trayectoria que se especifica con estos datos y es capaz de comparan las trayectorias de referencia generadas, con la salida del algoritmo propuesto por Gonzalo Castillo (2) de manera gráfica.

A partir de tener ambos conjuntos de datos, se comparan por pares utilizando análisis de varianza, que definirá si estas son totalmente ciertas, buscando similitud entre ellas que determinara si el estado real propuesto coincide con lo esperado.

A partir de las siguientes aceleraciones lineales y velocidades angulares se define la trayectoria circular representada en el algoritmo de navegación.

Capítulo 3. Pruebas de software al sistema desarrollado

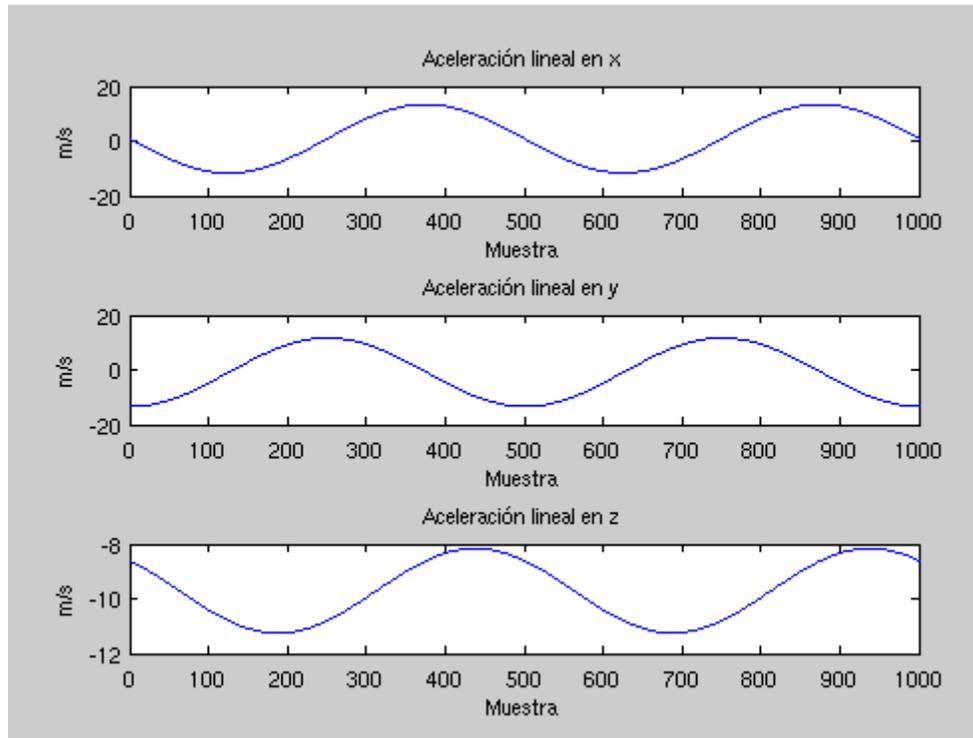


Fig 7. Representación de las aceleraciones lineales de la trayectoria circular

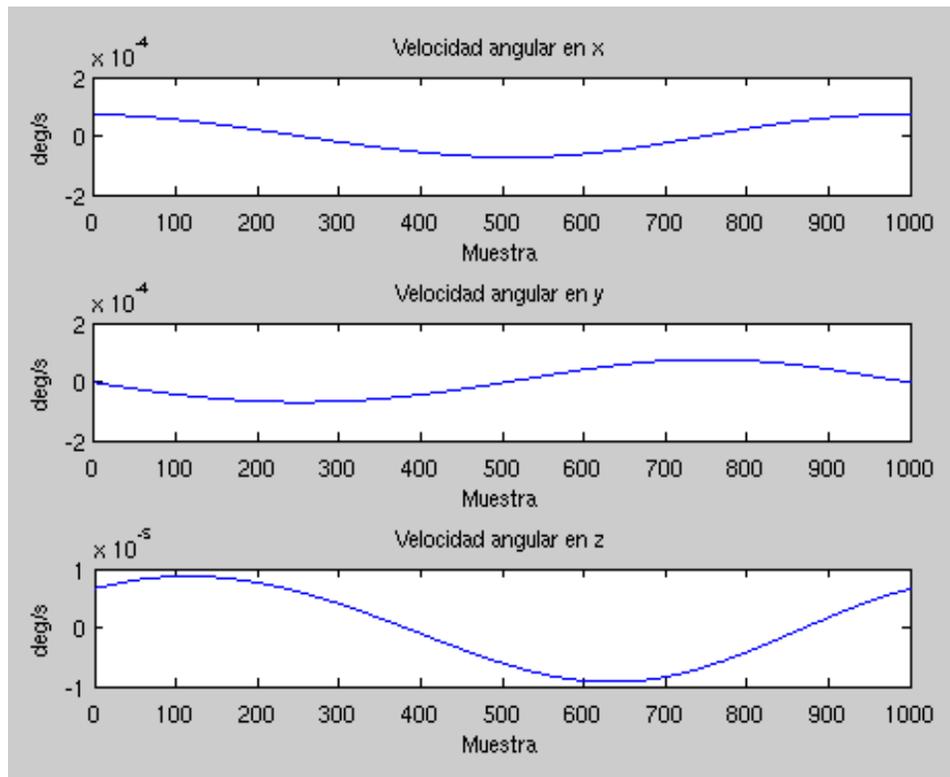


Fig 8. Representación de las velocidades angulares de la trayectoria circular

Capítulo 3. Pruebas de software al sistema desarrollado

A partir de las aceleraciones lineales y las velocidades angulares el algoritmo de navegación a utilizar es capaz de traducirlas brindando salida de posición, velocidad y orientación, teniendo como resultado la siguiente trayectoria:

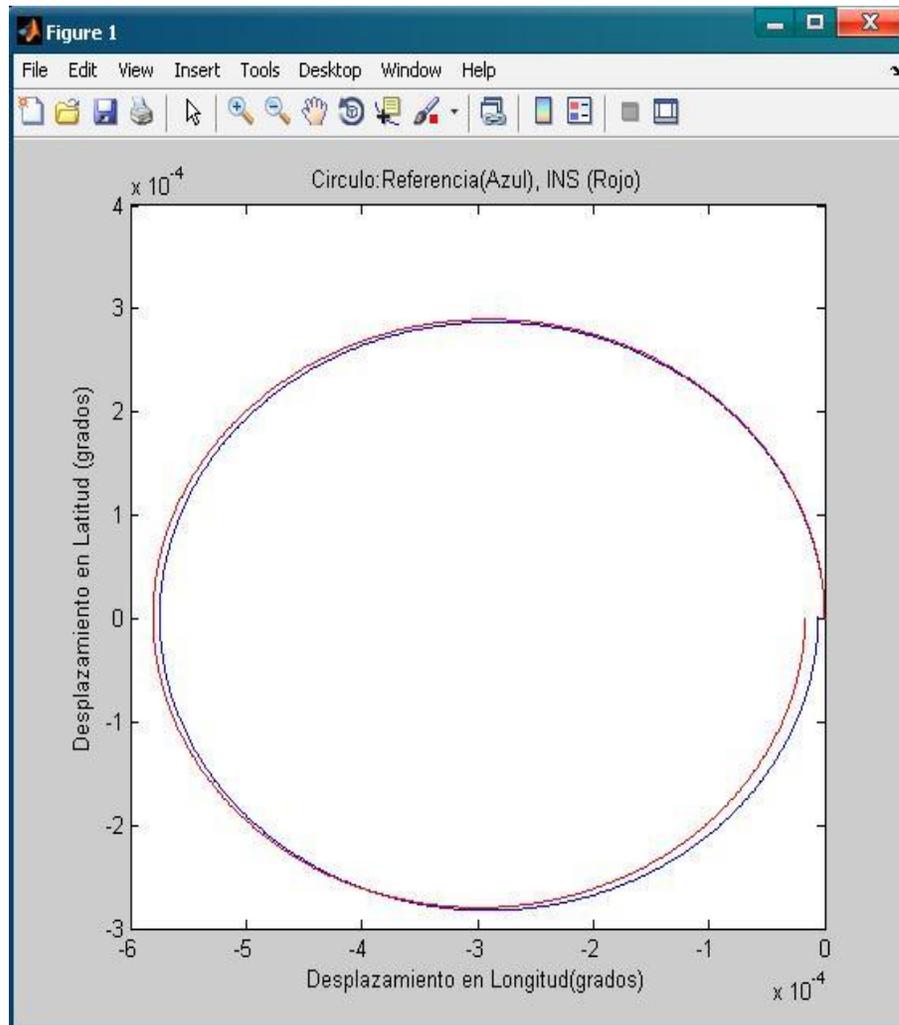


Fig 9. Representación de las trayectorias circular

La figura muestra la representación de la trayectoria circular la cual se representa a partir de la introducción de los datos que devuelve el sistema informático en un INS, la figura contiene en color rojo la representación de la trayectoria propuesta por INS, mientras que en color azul se muestra la trayectoria de los datos del sistema informático, dada la semejanza que la figura muestra, se quiere además validar el resultado dado a través de un análisis estadístico que demuestre la similitud entre los conjuntos de datos de las muestras. El resto de los resultados de estas pruebas se encuentran en el anexo 1.

Capítulo 3. Pruebas de software al sistema desarrollado

Para la realización del análisis estadístico entre los datos muestrales, se presenta como hipótesis a discutir en este proceso:

H1: Los conjuntos de datos procesados no son iguales.

H0: Los conjuntos de datos procesados son iguales.

3.2.1 Prueba de análisis de varianza (ANOVA)

Se utilizó ANOVA para la realización de las pruebas de análisis estadístico, ya que permite calcular la similitud a través de la comparación entre medias muestrales entre los datos del INS y la referencia, que determinan las existencias de diferencias significativas entre ellos. ANOVA prueba la hipótesis de que las medias de las poblaciones son iguales y evalúa la importancia de uno o más factores al comparar en las medias de la variable la respuesta en los diferentes niveles. La hipótesis alternativa establece que al menos una de las medias de las poblaciones son diferentes, mientras que la hipótesis nula establece que todas son iguales. (34)

Resultado de la similitud entre los datos de Latitud, Longitud y Altura en ANOVA.

Esta figura muestra los resultados de la similitud entre cada uno de los datos que dan paso a los parámetros de graficación de las trayectorias, entre el conjunto de datos del INS y los datos que devuelve el sistema informático. La prueba ANOVA propone un valor crítico de 0.05, lo que significa, que si al comparar los valores mediante las medias muestras, estos sobrepasan este valor crítico, se puede plantear que los conjuntos de datos son semejantes. Se obtuvo como resultado de esta prueba los valores de 0.53 para la latitud y 0.76 para la longitud de ambos conjuntos de datos, por lo que se acepta la hipótesis nula al sobrepasar el valor crítico propuesto por esta prueba. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Capítulo 3. Pruebas de software al sistema desarrollado

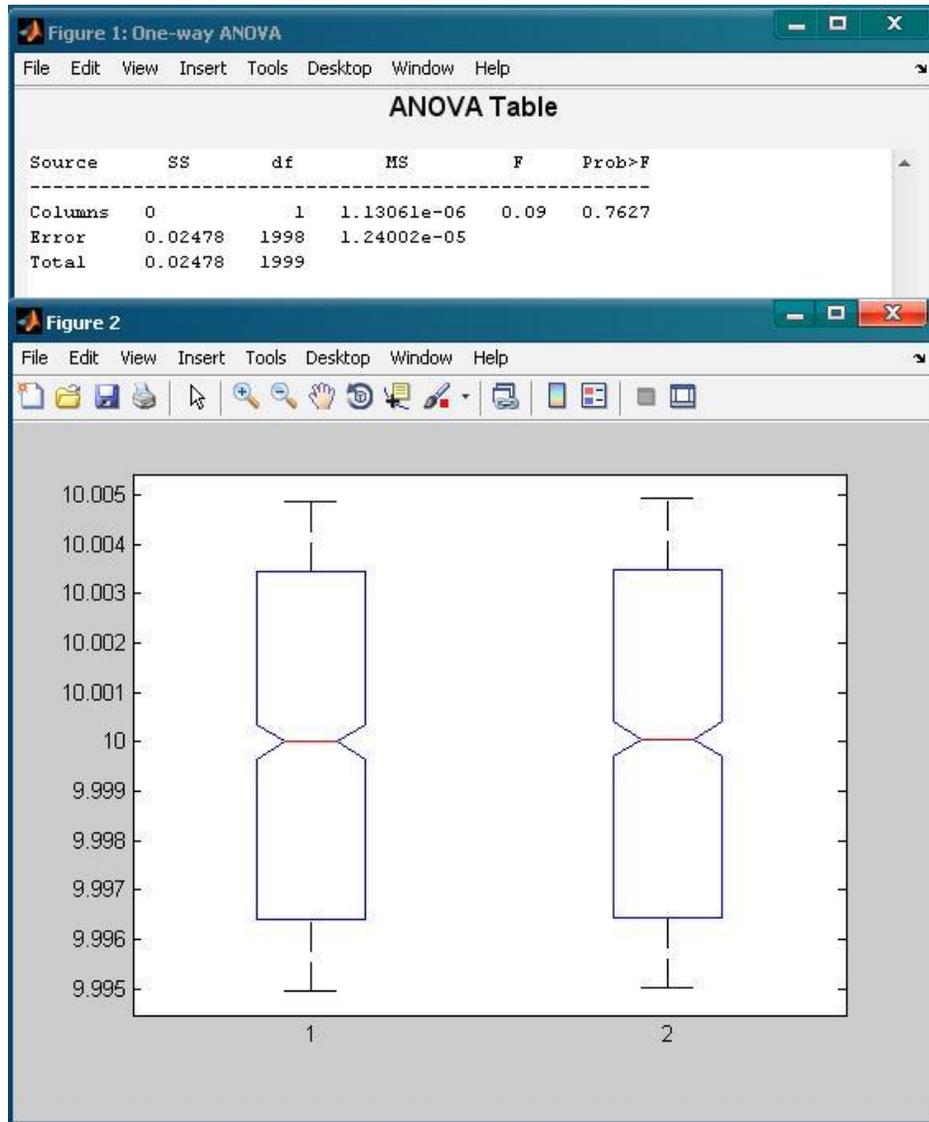


Fig 10. Resultado del procedimiento de la prueba ANOVA para la Latitud de la trayectoria circular

Capítulo 3. Pruebas de software al sistema desarrollado

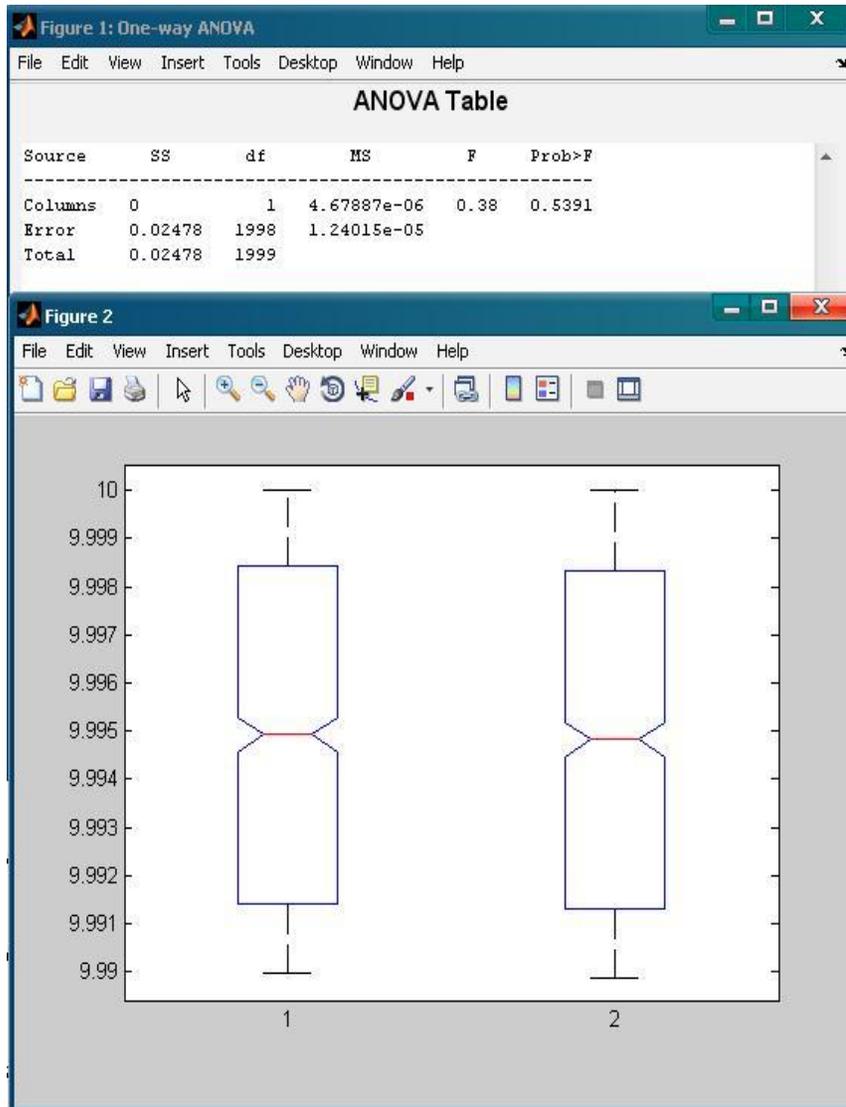


Fig 11. Resultado del procedimiento de la prueba ANOVA para Longitud de la trayectoria circular.

Los valores pertenecientes a la latitud y longitud de la trayectoria estática y los valores pertenecientes a la altura y la velocidad UP (arriba y abajo) de cada trayectoria, no se procesan porque no existen casi diferencias entre ellas. A continuación se muestra el resultado obtenido:

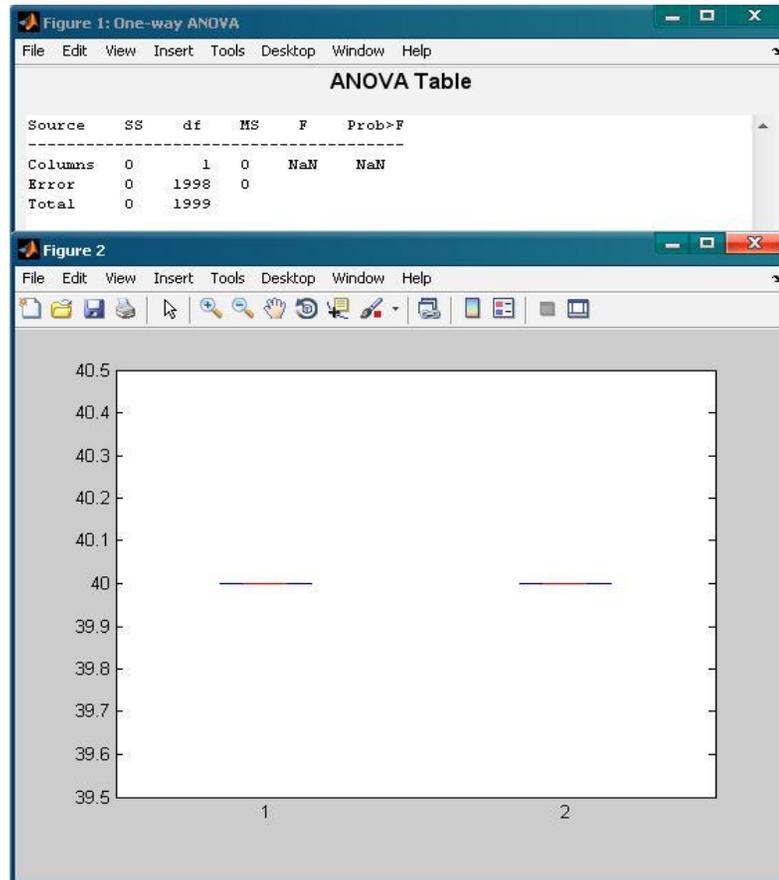


Fig 12. Resultados del procedimiento de la prueba ANOVA para los valores que no se procesan

El resto de los resultados de estas pruebas se encuentran en el Anexo 2.

3.3 Pruebas de aceptación

Una vez generado el código fuente de la aplicación se procede a la realización de las pruebas, según Pressman las pruebas de software son un elemento crítico para la garantía de la calidad del software y representan una revisión final de las especificaciones del diseño y de la codificación. (32)

El artefacto caso de prueba de aceptación, se genera en la etapa de Pruebas. El objetivo de las pruebas de aceptación es validar que el sistema cumpla con el funcionamiento esperado por el cliente final del sistema. Son definidas por el cliente y preparadas por el equipo de desarrollo, aunque la ejecución y aprobación final corresponden al cliente.

La utilización de estas pruebas proporcionan ventajas, tales como:

- ❖ Garantizar la entrega de un producto con calidad, que responda a las necesidades del cliente.
- ❖ Medir la calidad del trabajo de los desarrolladores.

Capítulo 3. Pruebas de software al sistema desarrollado

Las pruebas de aceptación permiten comprobar que el software cumple con los requisitos de negocio. Estas son creadas a partir de las historias de usuario. Las mismas son el punto de partida del desarrollo en cada iteración. (35)

Tabla 16. Caso de prueba de aceptación HU Definir tipo de trayectoria

Caso de Prueba de Aceptación	
Código Caso de Prueba: GDI-HU_1.1	Nombre Historia de Usuario: Definir tipo de trayectoria
Nombre de la persona que realiza la prueba: Darvis Dorvigny Dorvigny	
Descripción de la Prueba: Se escoge una trayectoria de cualquier tipo de unidad de medición inercial con la que se va a trabajar en el transcurso del sistema.	
Condiciones de Ejecución: Seleccionar una trayectoria.	
Entrada / Pasos de ejecución: <ol style="list-style-type: none">1. Se selecciona la trayectoria con la que se va a trabajar.2. Se muestra una nueva interfaz con datos característicos de la trayectoria.3. Se cierra la ventana de la trayectoria y se retorna a la interfaz inicial.	
Resultado esperado: Se muestra una interfaz con la trayectoria seleccionada.	
Evaluación de la Prueba: Satisfactoria	

Tabla 17. Caso de prueba de aceptación HU Definir parámetros de trayectoria

Caso de Prueba de Aceptación	
Código Caso de Prueba: GDI-HU_2.1	Nombre Historia de Usuario: Definir parámetros de la trayectoria
Nombre de la persona que realiza la prueba: Darvis Dorvigny Dorvigny	
Descripción de la Prueba: Se realizará la graficación de una trayectoria desde el punto de vista del usuario. Iniciando en un punto donde se va a definir su representación, el tiempo de navegación así como el tipo de trayectoria a mostrar en dos o en tres dimensiones.	
Condiciones de Ejecución: Mostrar una trayectoria.	

Capítulo 3. Pruebas de software al sistema desarrollado

Entrada / Pasos de ejecución:

Parámetros obligatorios: posición en latitud, posición en longitud, tiempo de navegación, representación de la trayectoria.

1. Se muestra la interfaz con la trayectoria que se desea trabajar.
2. Se introducen todos los datos. Correctamente
3. Se presiona el botón graficar
4. El sistema muestra una trayectoria con las características definidas por el usuario.

Resultado esperado: Se muestra una interfaz con las características de la trayectoria seleccionada.

Evaluación de la Prueba: Satisfactoria

Se realizaron un total de 4 casos de prueba, efectuándose 3 iteraciones. La gráfica muestra las no conformidades existentes en cada una de las iteraciones donde los aspectos destacados fueron la ortografía, las funcionalidades y la interfaz.



Fig 13. No conformidades detectadas

Una vez concluida la tercera iteración y corregidas las no conformidades se demostró que el producto cumple con las funcionalidades requeridas por el usuario final.

3.4 Conclusiones parciales

- ❖ Las pruebas unitarias ejecutadas, dieron como resultado salidas evaluadas como satisfactorias para las entradas correspondientes.
- ❖ Las pruebas de aceptación realizadas al sistema demostraron su correcto funcionamiento desde el punto de vista del cliente.

CONCLUSIONES

La presente investigación arrojó los siguientes resultados:

- ❖ El estudio de los antecedentes de los sistemas de navegación inercial, sus fundamentos teóricos, así como las soluciones existentes referentes al tema posibilitaron una mejor comprensión acerca de la generación de datos inerciales. Se determinó utilizar los elementos positivos aportados por dichas soluciones.
- ❖ La metodología XP sirvió de guía para el desarrollo del sistema durante todo su ciclo de vida. Propició la obtención de los artefactos necesarios.
- ❖ Se desarrolló un sistema informático capaz de generar datos inerciales para algoritmos de navegación en un sistema de navegación inercial.
- ❖ Las pruebas de software realizadas y los resultados arrojados demostraron el correcto funcionamiento del sistema.

RECOMENDACIONES

Al finalizar este trabajo se recomienda que para una nueva versión del sistema:

- ❖ Incorporar al algoritmo la capacidad de generar señales de un magnetómetro para tomar la intensidad del campo magnético de la tierra, útil para la determinación de la orientación.
- ❖ Combinar los tipos de trayectorias para generar los datos inerciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fossen, T.I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. 2011.
2. Castillo, Gonzalo. *Navegación Integrada INS-GPS: Aplicación a un SAR aerotransportado*. 2012.
3. Gonzales, Rodrigo. An approach to benchmarking of loosely-coupled low-cost navigation systems. 2014.
4. W, Zhan. *Mathematical Model and Matlab Simulation of Strapdown Inertial Navigation System. Modelling and Simulation in Engineering*. 2012.
5. Lemus, J. L. *Sistema software de navegación y guiado en tiempo real para Vehículo Autónomo Sumergible*. 2011.
6. Carmenate, M. E. M. *Desarrollo de sistemas de control para autopiloto de avión de pequeño porte*. 2009.
7. L, Pineda. *Acondicionamiento de las medidas de sensores inerciales de bajo costo con fines de navegación*. 2011.
8. Weston, David H. Titterton y John L. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2004.
9. España, Martin. *Fundamentos de la Navegación Integrada*. 2010.
10. G, Ferrer. *Integración Kalman de sensores inerciales INS con GPS en un UAV*. 2009.
11. global.epson.com. [En línea]
12. <http://gladiatortechnologies.com/>. [En línea] Gladiator Technologies - Division of LKD Aerospace, Inc., 2015.
13. Gonzalez, Rodrigo. *Navego, Entorno de simulacion para sistemas de navegacion integrados de vehiculos roboticos autonomos*. 2013.
14. Dorobantu, R y Gerlach, C. *Investigation of a Navigation-Grade RLG SIMU type iNAV-RQH*. 2004.
15. García de Jalón, Javier, Rodríguez, José Ignacio and Vidal, Jesús. *Aprenda Matlab. Como si estuviera en primero*. 2005.
16. <https://www.visual-paradigm.com/>. [Online]
17. CENDEJAS VALDÉZ, JOSÉ LUIS. *Implementación Del Modelo Integral Colaborativo*. 2014.
18. K, Schwaber, M, Beedle y R.C, Martin. *Agile software development with scrum*. 2001.
19. A, Cockburn. *Agile software development*. Addison-Wesley. 2001.
20. J, Stapleton. *Dynamic systems development method: the method in practice*. 1997.
21. J, Highsmith y K, Orr. *Adaptive software development: A collaborative to managing complex systems*. 2000.
22. P, Coad y E, Lefebvre. *Java modeling in color with UML*. 2000.
23. M, Poppendieck y J, Poppendieck. *Software Development: An agile toolkit for software development managers*. 2003.
24. Wesley, Addison. *Una aplicación de la programación extrema. Aceptar el cambio*. 2000.
25. Calderón, Amaro and Dámaris, Sarah. *Metodologías Ágiles*. 2007.
26. Gonzalez, Rodrigo. *NaveGo, A simulation framework for low-cost INS*. 2015.
27. Fernández Céspedes, Raycel y Pino García, Susel. *Propuesta de un expediente, para los proyectos productivos del Polo de Software Libre, de la Facultad*. UCI. La Habana : s.n., 2008. Tesis.
28. Larman, Craig. *UML y patrones. Introducción al análisis y diseño orientado a objetos*. 1999.
29. <http://www.mathworks.com/>. [Online]
30. Pressman, Roger. *Ingeniería de software. Un enfoque practico. METODOS CONEVNCIONALES PARA LA INGENIERÍA DE SOFTWARE*. 2002.
31. ORÉ B, ALEXANDER. *Software Testing and QA - Pruebas Unitarias*. 2009.
32. Vicens Otero, Jose and Medina Moral, Eva. *Análisis de la varianza (Anova)*. . 2005.
33. BLÉ JURADO, CARLOS. *Diseño ágil con TDD*. 2010.

34. Rios, José and White, Elecia. *FAA Certification of a MEMS Attitude and Heading Reference System*. 2000.
35. Zylberberg, Alejandro. *Probabilidad y Estadísticas*. 2005.
36. White, Elecia y Rios, Jose. *FAA Certification of a MEMS Attitude and Heading Reference System*. 2000.
37. Shin, Eun-Hwan. *Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications*. 2001.
38. SCHUMACHER, ADRIAN. *Integration of a GPS aided Strapdown Inertial Navigation System for Land Vehicles*. 2006.
39. Ramírez, Alejandro y Fernández, Juan. *INTEGRACIÓN GPS/INS: CONCEPTOS Y EXPERIMENTOS*.
40. R, Rogers. *Applied Mathematics in integrated navigation Systems*. 2003.
41. R, Navarro. *Acondicionamiento de las medidas de sensores inerciales de bajo costo con fines de navegación*. 2014.
42. OCAMPO, ALEJANDRO y CORREA, LUISA. *IMPACTO DE LAS PRUEBAS NO FUNCIONALES EN LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL PRODUCTO SOFTWARE DESARROLLADO*. 2011.
43. Kong, Xiaoying. *Inertial navigation system algorithms for low cost IMU*. 2000.
44. De La Torre, Marcos. *Sensores de Velocidad*. 2005.
45. D, Weston. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2004.
46. D, Paul. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2008.
47. Barrett, Justin. *ANALYZING AND MODELING LOW-COST MEMS IMUS FOR USE IN AN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM*. 2014.
48. Aponte, Jonatan y Reyes, Daniel. *Desarrollo de un sistema de navegación integrada para la evaluación de unidades de medición inercial sobre una plataforma robótica*. 2013.
49. A, John. *GLOBAL POSITIONING SYSTEMS, INERTIAL NAVIGATION, AND INTEGRATION*. 2007.
50. A, Baturon. *Robotica: manipuladores y robots móviles*. 2011.
51. A, Algaba. *Integración de los sistemas de navegación inercial a bordo de buques con posicionamiento dinámico*. Universidad de la Laguna. 2014.
52. Guevara Mayea, Carlos Manuel. *Generación de trayectoria y Control de rumbo para UAVs*. 2012.
53. Quesada Navarro, Roberto. *Acondicionamiento de las mediciones de sensores inerciales de bajo costo con fines de navegación*. 2014.
54. Aggarwal, Priyanka, Syed, Zainab and Aboelm, Noureldin. *MEMS-Based Integrated Navigation*. Artech House. 2010.
55. Titterton, David H. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2004.
56. Socarrás, H. E. *Modelado y Control convencional de un UAV*. 2011.
57. Groves, Paul D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2008.
58. Wesley, Addison. *UML. Manual de referencia*. 1998.
59. gladiatortechologies.com. [En línea]
60. <http://www.honeywell.com/>. [En línea] Honeywell International Inc, 2016.
61. <http://global.epson.com/>. [En línea] Seiko Epson Corporation. All rights reserved., 2016.
62. <https://www.xsens.com/>. [En línea] Xsens | Sitemap - Disclaimer - Shop, 2016.

ANEXOS

Anexo1: Gráficas de los resultados de la prueba unitaria, en la integración con el INS

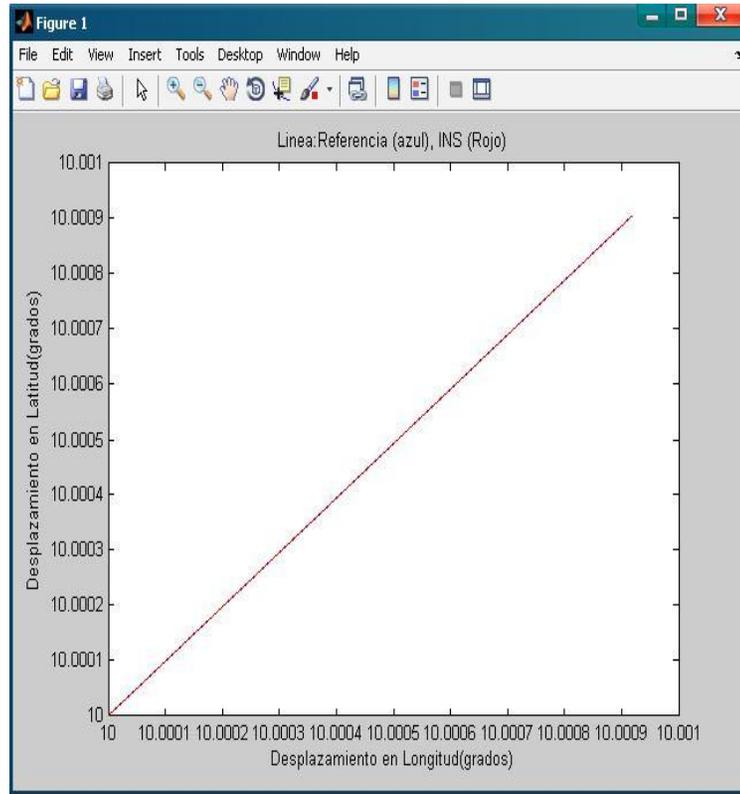


Fig 14. Representación de las trayectorias en línea recta

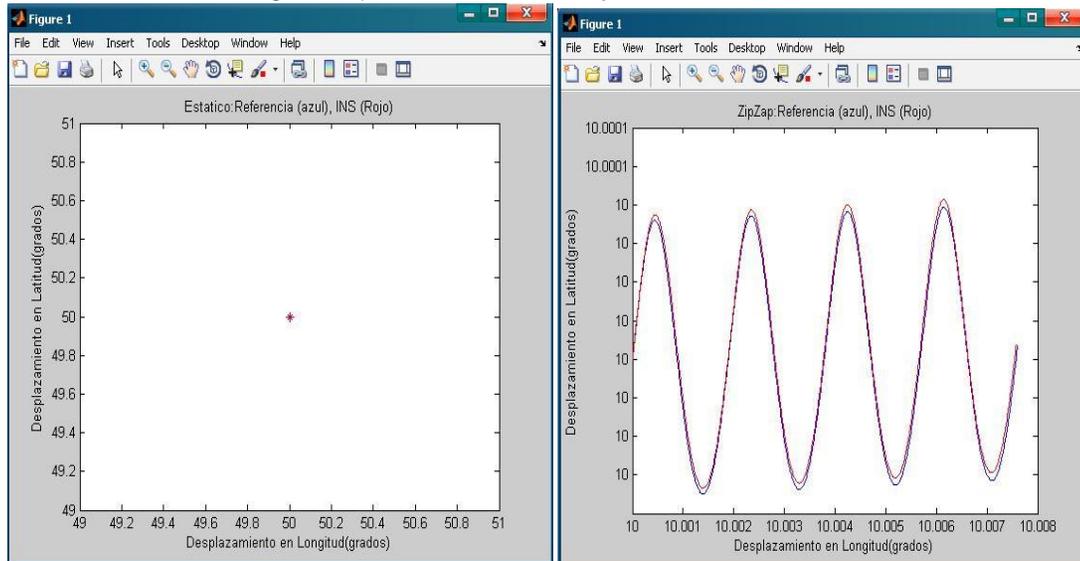


Fig 15. Representación de las trayectorias estáticas y en zigzag

Anexo2: Gráficas de los resultados de las pruebas realizadas en la herramienta ANOVA.

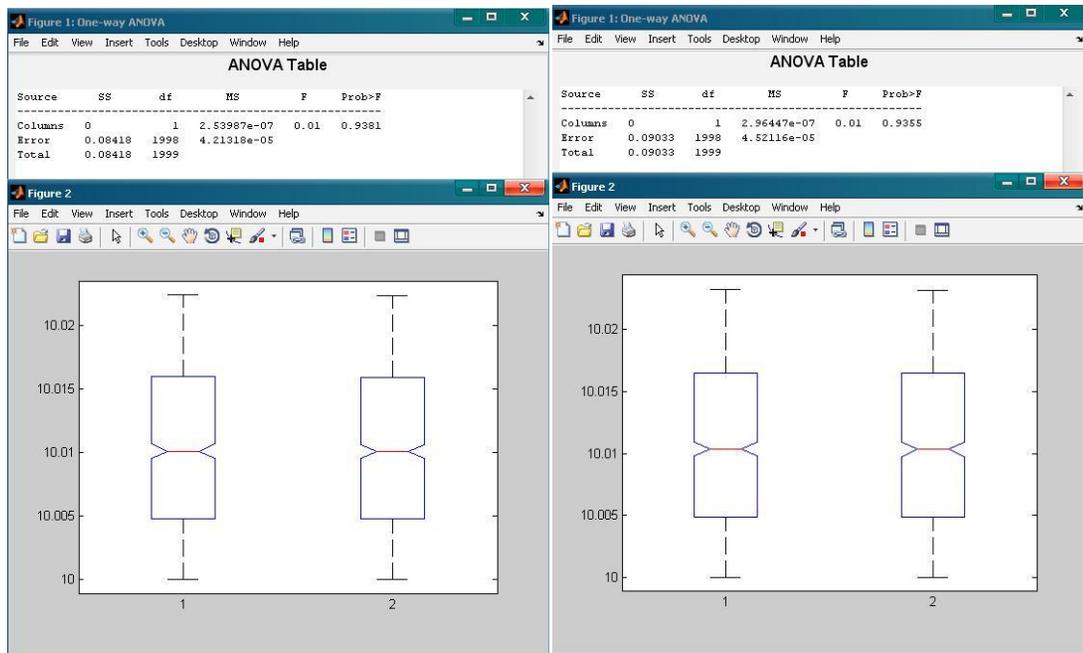


Fig 16. Resultado del procedimiento de la prueba ANOVA para la Latitud y Longitud de la trayectoria en línea recta.

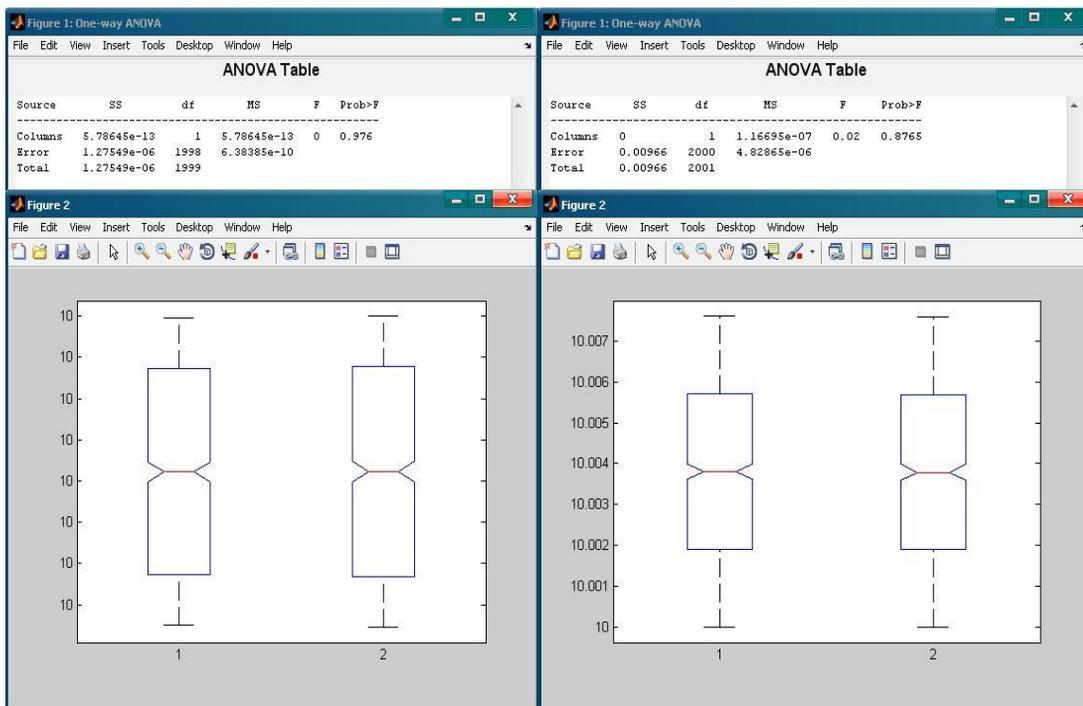


Fig 17. Resultado del procedimiento de la prueba ANOVA para la Latitud y Longitud de la trayectoria en zigzag

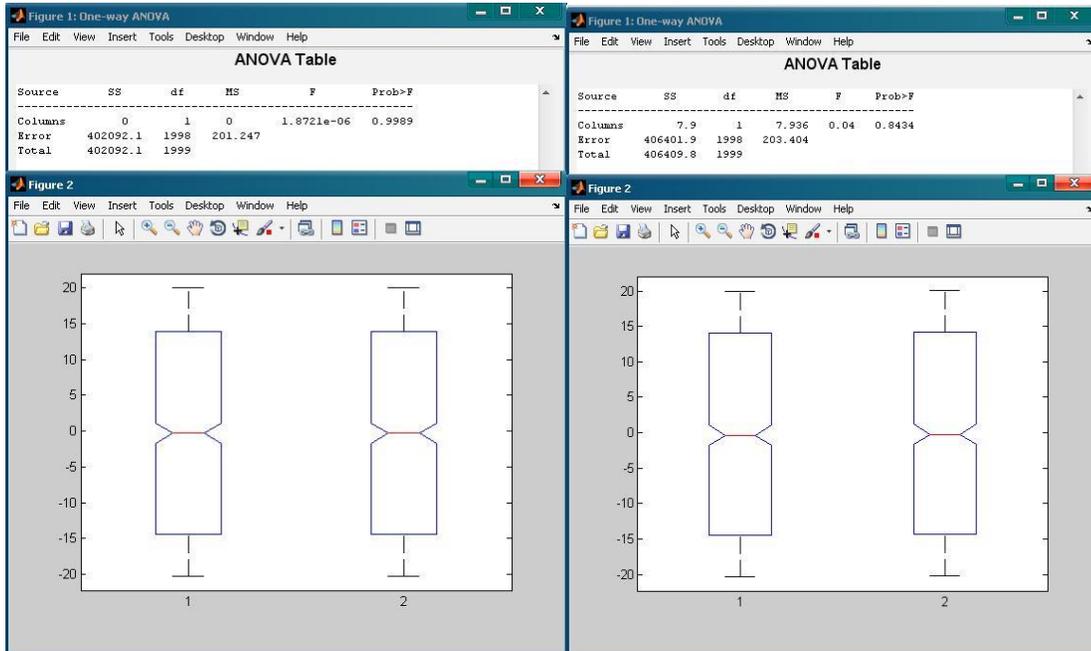


Fig 18. Resultados de los valores de la velocidad en el norte y en el este de la trayectoria circular

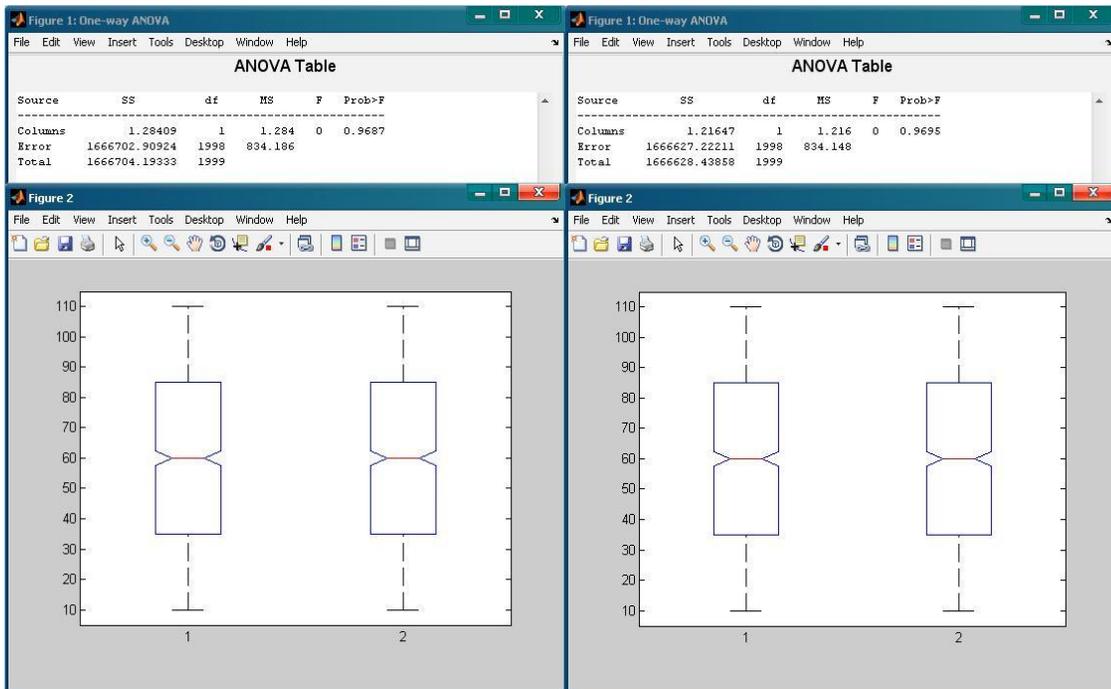


Fig 19. Resultados de los valores de la velocidad en el norte y en el este de la trayectoria en línea recta

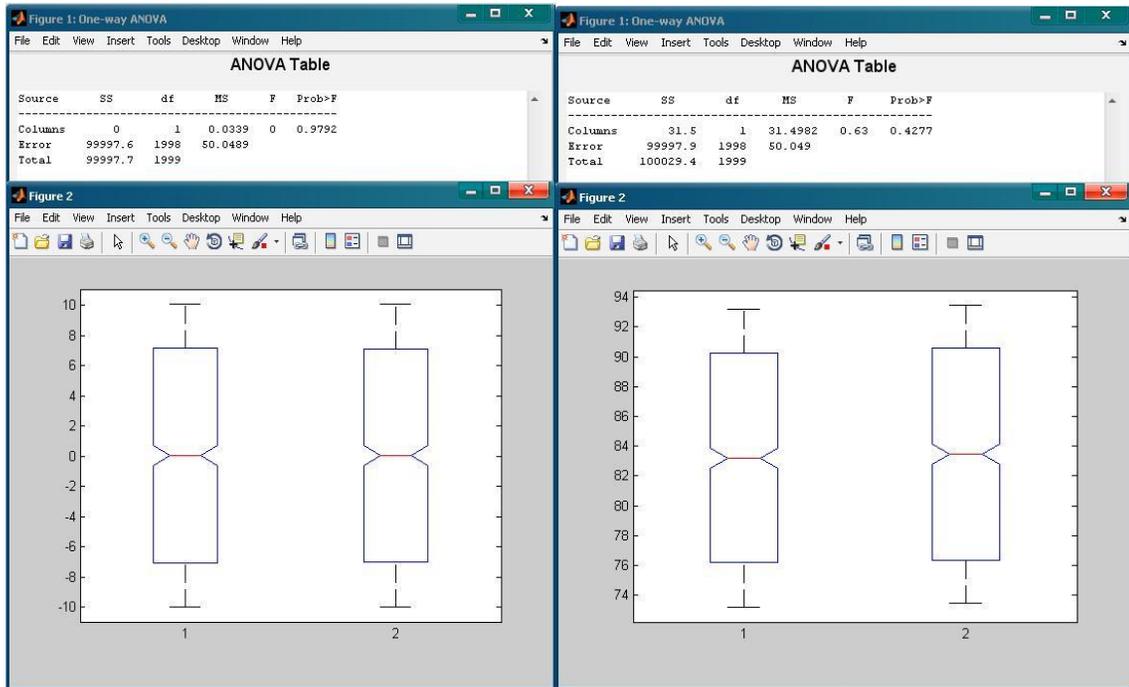


Fig 20. Resultados de los valores de la velocidad en el norte y en el este de la trayectoria en zigzag