



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Sistema automático de geolocalización basado en los astros:
módulo de adquisición de datos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Santiago González-Aller Rodríguez

DIRECTORES: Belén Barragáns Martínez
Norberto Fernández García

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Sistema automático de geolocalización basado en los astros:
módulo de adquisición de datos*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es sentar las bases para el desarrollo de un sistema automático capaz de obtener su posición mediante la observación de los astros. Para ello, se pretende crear un programa capaz de obtener la altura y el azimut de uno o varios astros, para posteriormente procesar estos datos y obtener la latitud y la longitud propia de la situación del observador.

Este programa se ha desarrollado en el lenguaje de programación Java, de forma que se pueda ejecutar en dispositivos móviles con sistema operativo *Android*. De este modo, se ha creado una aplicación llamada SAGA (Sistema Automático de Geolocalización basado en los Astros). Para el desarrollo de esta aplicación, ha sido necesaria la división en dos módulos diferentes. El primero de ellos, es el módulo de adquisición de datos; y el segundo, el módulo de procesamiento y presentación de datos. La programación desarrollada en ambos módulos fue posteriormente fusionada para crear la aplicación conjunta SAGA.

El objetivo específico de este módulo es estudiar y ofrecer posibles soluciones a la obtención de datos astronómicos. Se diseñará y desarrollará, a pequeña escala, un sistema que nos permita obtener determinadas características de los astros celestes, con objeto de poder resolver el problema de situación desarrollado en el módulo de trabajo paralelo de procesamiento y presentación de esos datos.

Tras haber finalizado esta aplicación, se realizaron las pruebas de su funcionamiento. Los resultados demuestran la viabilidad del enfoque, y abren la puerta a continuar su desarrollo en el futuro. El objetivo final es llegar a desarrollar un sistema totalmente automático e independiente, capaz de obtener su posición incluso en una plataforma móvil, como puede ser, por ejemplo, un barco.

PALABRAS CLAVE

Sistema, geolocalización, automático, astros, adquisición

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a los directores de este trabajo de fin de grado, Dña. Belén Barragáns Martínez y D. Norberto Fernández García. Durante estos últimos meses han sido capaces de dirigirnos hacia los objetivos que en un principio nos marcamos. Nos han ayudado a trazar los límites de este proyecto, de modo que nos ha sido posible centrarnos en lo realmente importante y fundamental para el desarrollo final de la aplicación.

Concretamente, nos han ayudado a adentrarnos en el mundo de la programación de manera más profunda, para poder ser capaces de desarrollar una interesante aplicación. Además, han sido capaces de sumergirse en un mundo tan abstracto y técnico como la navegación astronómica, probablemente desconocida para ellos en un principio. Todo esto, sea dicho, con una disponibilidad continua para la buena coordinación durante el desarrollo del trabajo.

Por otro lado, también quería agradecer al profesor emérito de la Escuela Naval, el Capitán de Navío Don. Ceñal Martínez-Hombre. De manera totalmente desinteresada, nos ha ayudado en la realización del proyecto, aportando su trabajo de investigación que ya había realizado anteriormente al comienzo del trabajo. Su interés por el avance del proyecto ha sido constante y sus conocimientos sobre astronomía han sido claves para el desarrollo del mismo.

También quería agradecer al T.N. D. Luis Solano Veiga, Segundo Comandante del Patrullero “Atalaya”, así como a su Comandante y la dotación, por facilitarme la labor de investigación en el proyecto, haciendo uso de material de su buque. Del mismo modo, quería agradecer al T.N. D. Carlos Pajares Llanes, Oficial de Guerra Electrónica de la Fragata “Álvaro de Bazán”, por su información sobre varios ejercicios realizados por su unidad. También agradecer al taller mecánico de la Escuela Naval, por su ayuda en el montaje del soporte para el proyecto.

De manera más personal, me gustaría agradecer a mi familia todo el apoyo que he recibido por su parte durante mi estancia en la Escuela Naval. No ha sido fácil compaginar la vida en la Escuela Naval con continuos viajes y traslados de un lugar a otro, pero siempre han sido un apoyo incondicional.

Quería también agradecer a los compañeros de la Escuela Naval que me han apoyado estos cinco años y, en especial a aquellos que me han ayudado en la realización del trabajo, entre ellos Javier Ros y Francisco Javier Morales Yedra.

También quería agradecer a mis compañeros de camareta, Fernando Méndez y Pedro Ruiz, con los que he compartido buenos momentos durante mucho tiempo y que han sido un apoyo en los momentos más difíciles.

Por último, me gustaría agradecer a la persona que ideó este proyecto, y que ha sido el responsable para que pueda llevarse a cabo. Hablo de Gerardo González-Aller, compañero, amigo y hermano.

Contenido

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Contextualización.....	7
1.2 Objetivos del TFG.....	8
1.3 Estudios preliminares	9
1.4 Organización de la memoria	11
2 Estado del arte	13
2.1 Introducción a las técnicas de navegación marítima.....	13
2.1.1 Métodos de navegación	13
2.1.2 Fases de navegación	14
2.1.3 Estándares de exactitud para la navegación.....	15
2.2 Navegación GPS	16
2.2.1 Estructura del GPS.....	16
2.2.2 Inconvenientes del uso del GPS	16
2.2.3 Conclusiones.....	19
2.3 Navegación astronómica	20
2.3.1 Introducción a la navegación astronómica	20
2.3.2 Explicación teórica básica	20
2.3.3 Comparativa con el sistema GPS.....	21
2.3.4 Navegación astronómica moderna.....	22
2.4 Nuevas tecnologías	23
2.4.1 Uso de cámaras infrarrojas	23
2.4.2 Automatización y seguimiento de astros	25
2.5 Tecnología empleada	26
2.5.1 Acceso a los sensores de dispositivos móviles	26
2.5.2 Software empleado	27
3 Desarrollo del TFG.....	29
3.1 Definición del alcance del TFG	29
3.2 Sensores	29
3.2.1 Introducción	29
3.2.2 <i>Sensor Manager</i>	30
3.2.3 Acelerómetros.....	31

3.2.4	Giróscopos	32
3.2.5	Magnetómetros o brújulas	32
3.2.6	Primeras pruebas y conclusiones	32
3.3	Detección de la orientación y del movimiento.....	33
3.3.1	Sistemas de coordenadas	33
3.3.2	Expresión de ángulos de Euler	34
3.3.3	Medición de ángulos.....	35
3.4	Exactitud y precisión.....	37
3.4.1	Introducción	37
3.4.2	Tipos de errores	38
3.4.3	Técnicas de corrección de errores.....	38
3.4.4	Resumen	42
3.5	Cálculos de azimut y altura	44
3.5.1	Métodos de obtención de altura	44
3.5.2	Métodos de obtención del azimut	47
3.5.3	Elección de la altura y el azimut	50
3.5.4	Calibrado de los datos del acelerómetro	53
3.6	Cámaras e interfaces con el usuario	55
3.6.1	Uso del <i>Preview</i>	55
3.6.2	Creación de la interfaz	56
3.6.3	Ajuste de parámetros	57
3.7	Cálculo de la hora exacta	58
3.8	Integración de los dos módulos en la aplicación.....	59
3.8.1	Funcionamiento de <i>OnTouchEvent</i>	59
3.8.2	Creación de una media de datos	59
3.8.3	Listado de astros	59
3.8.4	Menú	60
3.9	Montaje del soporte.....	61
4	Resultados de las pruebas	64
4.1	Primeras comparaciones con otras aplicaciones existentes	64
4.1.1	Comparación del <i>Pitch</i> y el <i>Roll</i>	64
4.1.2	Comparación del azimut	64
4.2	Comparación de la altura con sextante	65
4.3	Comparación de la altura con programa <i>Navigator</i>	67
4.4	Pruebas del azimut	69
4.5	Pruebas realizadas con integración de módulos.....	69

5 Conclusiones y líneas futuras	72
5.1 Conclusiones	72
5.1.1 Precisión y exactitud del sistema	72
5.1.2 Cumplimiento de objetivos	72
5.2 Líneas futuras	73
5.2.1 Introducción	73
5.2.2 Mejoras a la aplicación existente	74
5.2.3 Mejoras del sistema SAGA	74
5.3 Modernización de la navegación astronómica en la Armada	76
6 Bibliografía.....	78
Anexo I: Teoría de la navegación astronómica	82
Anexo II: Errores en la observación astronómica	87

Índice de Figuras

Figura 1-1 Esquema de relación entre los módulos de adquisición y de procesamiento y presentación de datos.....	9
Figura 1-2 Estadística global de uso de sistemas operativos en dispositivos móviles [5].	11
Figura 2-1 Lóbulo de acción de la antena perturbadora [11].	17
Figura 2-2 Fallo en el sistema AIS [11].	17
Figura 2-3 Pérdida de señal en el sistema satélite militar [11].....	18
Figura 2-4 Primer perturbador portátil utilizado.	18
Figura 2-5 Segundo perturbador portátil utilizado.	19
Figura 2-6 Representación esquemática de un sextante [18]	21
Figura 2-7 Comparación de imágenes del Sol obtenidas con FLIR en modo cámara infrarroja según la nubosidad.	24
Figura 2-8 Comparación de imágenes obtenidas en modo cámara normal y cámara infrarroja.	24
Figura 2-9 Ilustración conceptual de seguimiento del Sol mediante alineamiento del mismo con una cámara con software reconocimiento de imagen.....	25
Figura 3-1 Esquema explicativo del funcionamiento de un acelerómetro [31].....	31
Figura 3-2 Representación de los ejes de coordenadas del sistema global y del dispositivo [31]. ...	34
Figura 3-3 Representación de los ángulos <i>Pitch</i> , <i>Roll</i> y <i>Yaw</i>	35
Figura 3-4 Imágenes explicativas de la diferencia entre precisión y exactitud [31].	37
Figura 3-5 Efectos del uso de la tasa ponderada acorde a diferentes valores de la constante de atenuación [31].	40
Figura 3-6 Efectos del uso de la media móvil simple acorde a los diferentes valores de k [31].....	40
Figura 3-7 Ejemplo de filtrado paso alto [31]	42
Figura 3-8 Cálculo de la orientación mediante los datos en crudo de los sensores[31].....	43
Figura 3-9 Cálculo de la orientación mediante filtrado paso bajo de los datos del acelerómetro y de la brújula[31].	43
Figura 3-10 Cálculo de la orientación mediante integración de los datos del giróscopo[31].	43
Figura 3-11 Cálculo de la orientación mediante la utilización del <i>Sensor Fusion</i> [31].	44
Figura 3-12 Cálculo de la orientación mediante la utilización de filtros <i>Kalman</i> [31].	44
Figura 3-13 Aplicación que muestra los datos de <i>TYPE_GRAVITY</i> antes y después de su filtrado paso bajo.	45
Figura 3-14 Aplicación que muestra los datos obtenidos por la función <i>getOrientation()</i>	47
Figura 3-15 Extracto del mapa del Modelo Magnético Mundial Británico-Estadounidense para el año 2015 [32].....	49
Figura 3-16 Aplicación que muestra el <i>Pitch</i> y el <i>Roll</i> en base a los datos del acelerómetro.	51
Figura 3-17 Esquema de la obtención de datos de los sensores	53
Figura 3-18 Datos del acelerómetro sin calibrar en posición horizontal.....	54

Figura 3-19 Datos del acelerómetro sin calibrar en posición 180° respecto a la Figura 3-18.	54
Figura 3-20 Representación de la orientación de la cámara [31].	56
Figura 3-21 Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación.	57
Figura 3-22 Extracto de la captura de pantalla correspondiente a la Figura 3-21.	57
Figura 3-23 Esquema de funcionamiento de adquisición de datos.	60
Figura 3-24 Esquema del funcionamiento del menú del SAGA	61
Figura 3-25 Trípode.	62
Figura 3-26 Plataforma para trípode.	62
Figura 3-27 Conjunto de tornillo y sujeción para móviles.	63
Figura 3-28 Montaje completo del soporte.	63
Figura 4-1 Sextante utilizado para la realización de pruebas	65
Figura 4-2 Gráfica de evolución de las alturas tomadas en grados (eje vertical) respecto al tiempo en minutos (eje horizontal).	67
Figura 4-3 Gráfica de evolución de las alturas tomadas en grados (eje vertical) respecto al tiempo en minutos (eje horizontal).	68
Figura 4-4 Captura de pantalla del programa <i>Navigator</i>	69
Figura 5-1 Comparación del uso de filtros infrarrojos para localización del Sol [28]	76
Figura 5-2 Seguimiento del Sol con cámara FLIR modo infrarrojo y ajustado al máximo zoom. ..	77
Figura AI-0-1 Representación de la esfera celeste geocéntrica y sus polos y ecuador celeste.	83
Figura AI-0-2 Representación de la esfera celeste local respecto a un observador, además de su Zenit y Nadir.	84
Figura AI-0-3 Representación del horizonte aparente, verdadero y visible desde el punto de vista del observador.	84
Figura AI-0-4 Representación del horizonte verdadero (H_v), el horizonte aparente (H_a) y el horizonte visible (H_m), así como el Zenit (Z) y el Nadir (Z') sobre la esfera celeste geocéntrica.	85
Figura AI-0-5 Gráfico ilustrativo de la altura y el azimut de un astro sobre la esfera celeste.	86

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Estándares más importantes de navegación	15
Tabla 2-2 Tabla resumen de las aplicaciones más conocidas en el sistema operativo <i>Android</i>	27
Tabla 3-1 Tabla de sensores a los que se tiene acceso mediante dispositivos <i>Android</i>	30
Tabla 3-2 Tabla resumen de los sensores que calculan y proporcionan datos relativos a la orientación con respecto a las coordenadas de la Tierra.	33
Tabla 4-1 Comparación de las pruebas de cálculo de alturas entre el sextante y el módulo de adquisición.....	66
Tabla 4-2 Comparación de las pruebas de cálculo de altura entre el <i>Navigator</i> y el módulo de adquisición.....	68
Tabla 4-3 Resultados de las primeras observaciones del Sol con el SAGA	70
Tabla 4-4 Posteriores observaciones del Sol con el SAGA	70

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contextualización

Desde que en 1964 el Departamento de Defensa de Estados Unidos pusiera en funcionamiento el sistema TRANSIT (*Technology Review Assistance Notification Standards Integration and Testing Program*), primer sistema de posicionamiento mediante satélites desarrollado por la Marina de los Estados Unidos [1], los sistemas de posicionamiento por satélite han avanzado muy rápidamente, hasta el punto de que cualquier usuario, incluso con un dispositivo móvil (*Smartphone*), es capaz de conocer su posición con una precisión de pocos metros a nivel mundial. Los dos sistemas de posicionamiento por satélite actuales plenamente operativos son el GPS (*Global Positioning System*) americano y el sistema ruso GLONASS (*Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema* o Sistema Global de Navegación por Satélite). Estos han contribuido al desarrollo de los sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que han tenido en las últimas décadas un fuerte impacto en los sistemas de navegación terrestre, marítimo y aéreo [2].

En la actualidad, estos sistemas están plenamente integrados en medios de transporte, medios de distribución, medios de búsqueda, salvamento y socorro, medios de localización y seguimiento y, por supuesto, en todos los vehículos, transportes, armamento y plataformas de las fuerzas armadas de prácticamente todos los países del mundo.

En el ámbito marítimo, los actuales sistemas de navegación se apoyan, en gran medida, en estos sistemas de posicionamiento por satélite. En concreto, la Armada Española, aunque mantiene por adiestramiento otros procedimientos de navegación (por ejemplo, el procedimiento de navegación por aguas restringidas), utiliza ampliamente el GPS americano, llegando a ser un elemento fundamental.

Están demostradas las ventajas de estos sistemas, tanto para el ámbito militar como para el civil. Sin embargo, desde el punto de vista militar, hay ciertos aspectos del GPS que nos hacen pensar que se debería contar con un sistema de posicionamiento alternativo y complementario al GPS, que sea independiente de elementos tan costosos de instalar y mantener como los satélites.

Como muestra de la concienciación de la Armada respecto a este tema, hace pocos meses tuvieron lugar unos ejercicios de perturbación de señal de GPS realizados por la fragata F-101 “Álvaro de Bazán” en el Golfo de Taranto (Italia). Según el detallado informe del Oficial de Comunicaciones, la perturbación de señal de GPS en los buques de la Armada es posible. Posteriormente, en el apartado 2.2.2 se detallarán más detenidamente los resultados de estos ejercicios.

La idea inicial del proyecto es diseñar y desarrollar un sistema de posicionamiento alternativo e independiente al GPS, basado en la teoría de navegación astronómica, que sea válido para buques alejados de costa. Este sistema se llamará SAGA (Sistema Automático de Geolocalización basado en

los Astros). Dada la extensión de este proyecto, se debe abordar por partes, separándose en dos módulos complementarios: el módulo de procesamiento y presentación de datos y el módulo de adquisición de datos.

En este último módulo, objetivo principal de este trabajo, se pretenden estudiar las posibilidades de obtención de datos de los astros celestes para conocer la situación exacta de una plataforma. Un sistema parecido podría utilizarse bien para conocer la situación de la plataforma, o bien a modo de sistema secundario o auxiliar para comprobación de otros sistemas de navegación como, por ejemplo, el GPS.

1.2 Objetivos del TFG

El objetivo final del proyecto SAGA es el diseño y desarrollo de un sistema automático que pueda obtener la situación del portador mediante la observación de las estrellas o el Sol (dependiendo de si es de noche o de día). Debido a la complejidad de la creación de un dispositivo automático, la intención de este proyecto es sentar las bases para que éste se desarrolle.

De forma resumida, se puede decir que este módulo necesita transmitir una serie de datos de los astros del cielo al módulo de procesamiento, que utilizará los datos para obtener la posición del usuario. En particular, los datos necesarios son: hora de la observación, altura del astro, azimut del astro y nombre del astro. Puede ser que los términos de azimut y altura resulten nuevos para el lector. Posteriormente en el apartado 2.3.2 se explican estos conceptos y se podrá ampliar información sobre este ámbito en el Anexo I, donde se detallan de manera más extendida estas magnitudes.

Con la combinación de estas variables, que el módulo de adquisición obtiene y envía, el módulo de procesamiento podrá hacer uso de diferentes formas de cálculo de posición. En este proyecto se estudiarán los siguientes modos o mecanismos de cálculo:

- Cálculo de posición mediante la obtención de tres alturas de tres astros diferentes.

Para realizar este cálculo, se necesita transmitir al módulo de procesamiento y presentación de datos la altura de tres estrellas para que pueda hacer los cálculos. Además, necesita saber exactamente la hora de obtención de cada altura independientemente. Este problema tiene su base en la resolución tradicional de posición durante los crepúsculos de orto y ocaso, que se corresponden con la salida y la puesta de Sol, respectivamente.

- Cálculo de posición mediante la obtención de la altura y el azimut de una estrella.

Para realizar este cálculo, el módulo de procesamiento y presentación necesitará la altura y el azimut de una estrella o planeta, normalmente por la noche. Puntualmente, podrán observarse astros (normalmente planetas) durante el día, entre los crepúsculos de orto y ocaso. Estas dos mediciones deben hacerse en el mismo instante (o prácticamente en el mismo tiempo) ya que cuanto más alejadas en el tiempo estén estas mediciones, menos precisión tendrá el sistema. El módulo de procesamiento, por tanto, necesitará también la hora en la que se realizan.

- Cálculo de posición mediante la obtención de la altura y el azimut del Sol.

Es un método similar al anterior, aunque requiere otra serie de cálculos en el desarrollo del software, y requiere un mayor esfuerzo en el desarrollo del hardware, que se explicará posteriormente. El módulo de procesamiento, por tanto, requiere la altura, el azimut y la hora de la observación del Sol.

Cualquiera que sea el modo, estos datos deberán ser transmitidos al módulo de procesamiento con la mayor exactitud y precisión posible para el correcto funcionamiento del sistema. De este modo, se pretende que el usuario, según el momento del día en que se encuentre, pueda escoger una de las tres opciones.

A modo de facilitar la comprensión del trabajo, en la Figura 1-1 se puede contemplar el esquema de la relación de los datos de salida y entrada de los diferentes módulos del SAGA para su correcto funcionamiento.

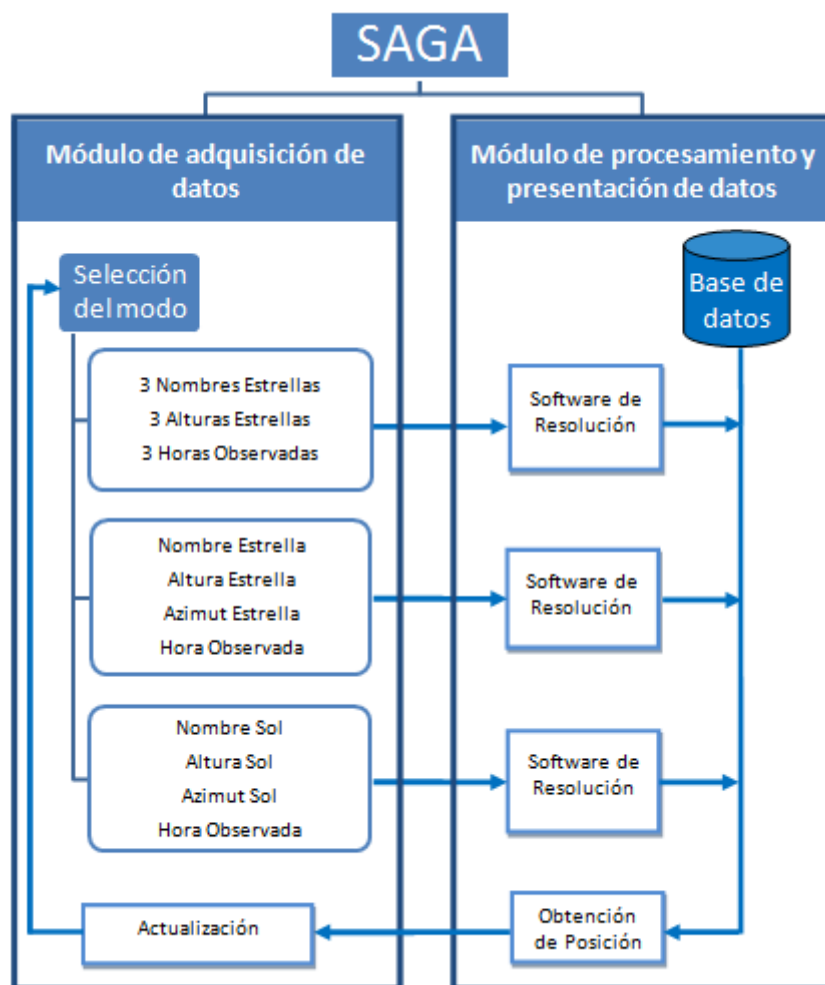


Figura 1-1 Esquema de relación entre los módulos de adquisición y de procesamiento y presentación de datos.

El problema más importante a resolver en este módulo es la precisión que pueda tener este sistema, para que el módulo paralelo pueda obtener una situación moderadamente correcta.

Con este trabajo se pretende dejar resueltos los cálculos a realizar e investigar la forma de obtener datos, así como estudiar la precisión que se podría obtener. Sin embargo, aunque los resultados que se obtengan con las capacidades de las que se disponga no sean tan precisos como lo es el sistema GPS, este proyecto será reflejo de las posibilidades de desarrollo de la navegación astronómica con la tecnología actual. A medida que pasen los años, la tecnología facilitará el avance de la navegación astronómica moderna.

1.3 Estudios preliminares

Tras establecerse los objetivos, y al comienzo del planteamiento de este trabajo, se propusieron diferentes formas de desarrollar este sistema, que debería ser un modelo sencillo, reflejo de lo que podría instalarse a bordo de un buque de la Armada. Es importante conocer estos primeros acercamientos al proyecto antes de indagar en el mismo.

En primer lugar, se planteó el uso de una placa de desarrollo *Raspberry Pi* [3] con una cámara integrada como sistema de obtención de datos. Con esta cámara, podrían realizarse fotos de varios astros. El objetivo era el estudio de las imágenes obtenidas con un software de reconocimiento de

imágenes capaz de obtener las diferentes alturas de los astros. Este proyecto se rechazó debido a la escasa resolución de la cámara integrada de la *Raspberry* y a la dificultad del proceso de reconocimiento de imagen, que se vuelve aún más difícil con esa escasa resolución. Se consideró, debido al tiempo del que se disponía, que esta opción no era viable, pero se explicará más tarde que el uso de cámaras será probablemente clave en el futuro en la navegación astronómica óptica en diferentes Armadas.

Posteriormente, se planteó el uso de un telescopio al que debía ir acoplado algún aparato que ofreciese la inclinación del mismo como, por ejemplo, un *inclinómetro*. De este modo, se usaría el telescopio para localizar los astros y el aparato acoplado para transferir datos de altura de los astros. Este aparato sustituiría al software de reconocimiento de imágenes para calcular las alturas. Sin embargo, este proceso implica que debe apuntarse al astro manualmente y conseguir mantener el mismo en el centro de la mira del telescopio. Esto implica una dificultad de encontrar los astros debido al gran aumento de la imagen en el telescopio. Aún así, se conoce que existen telescopios capaces de apuntar automáticamente un astro concreto sabiendo la posición del observador. Esto plantea que se puede desarrollar, del modo inverso, un software que, conociendo un astro y siguiéndolo, pueda obtener la posición del observador.

Esta idea sigue siendo algo ambiciosa para el tiempo requerido, aunque se podría plantear para posteriores proyectos una vez se haya realizado el software y perfeccionado el método de obtención de datos de este proyecto.

Por último, se planteó el uso de un teléfono móvil. Este móvil tendría la capacidad de obtener su propia orientación mediante acelerómetros, giróscopos y brújula. De esta manera, utilizando la cámara del móvil para apuntar a un astro, podría obtenerse la altura y el azimut del mismo. Además, ese mismo teléfono móvil podría ejecutar una aplicación que resuelva el problema de posición, que se plantea en el módulo paralelo de procesamiento y presentación de datos. Por último, este móvil podría acoplarse a un trípode, de modo que pueda mantenerse estable durante el momento en que se apunta a un astro.

Después de varias sesiones, se decidió abordar esta última idea para la elaboración del proyecto. Los motivos son la facilidad de adquirir el material, la simplificación del problema con el uso del móvil (que integra el software de resolución) y, por último, el bajo coste de dicho material.

Llegado el momento, se planteó para qué sistema operativo debía desarrollarse la aplicación del proyecto. Uno de los requisitos más importantes era tener la posibilidad de programar e instalar la aplicación, de manera directa y sencilla, en este sistema operativo. Además, se buscaba la posibilidad de lograrlo en la mayor diversidad y cantidad de móviles posibles. Por estas razones, se decidió usar un teléfono móvil con sistema operativo *Android* [4], desarrollado por la empresa *Android.Inc* y comprada más tarde por la empresa *Google*.

El primer motivo de esta elección es el hecho de que actualmente *Android* se ejecuta en la mayor parte de los dispositivos del mercado, estando presente en más de un 60% de los móviles más modernos [5], como muestra la Figura 1-2. Además, es un sistema operativo totalmente libre para poder desarrollar y modificar el código de las aplicaciones, sin inconvenientes legales. Esto nos permitirá desarrollar una aplicación propia e instalarla en un móvil para el desarrollo del trabajo.

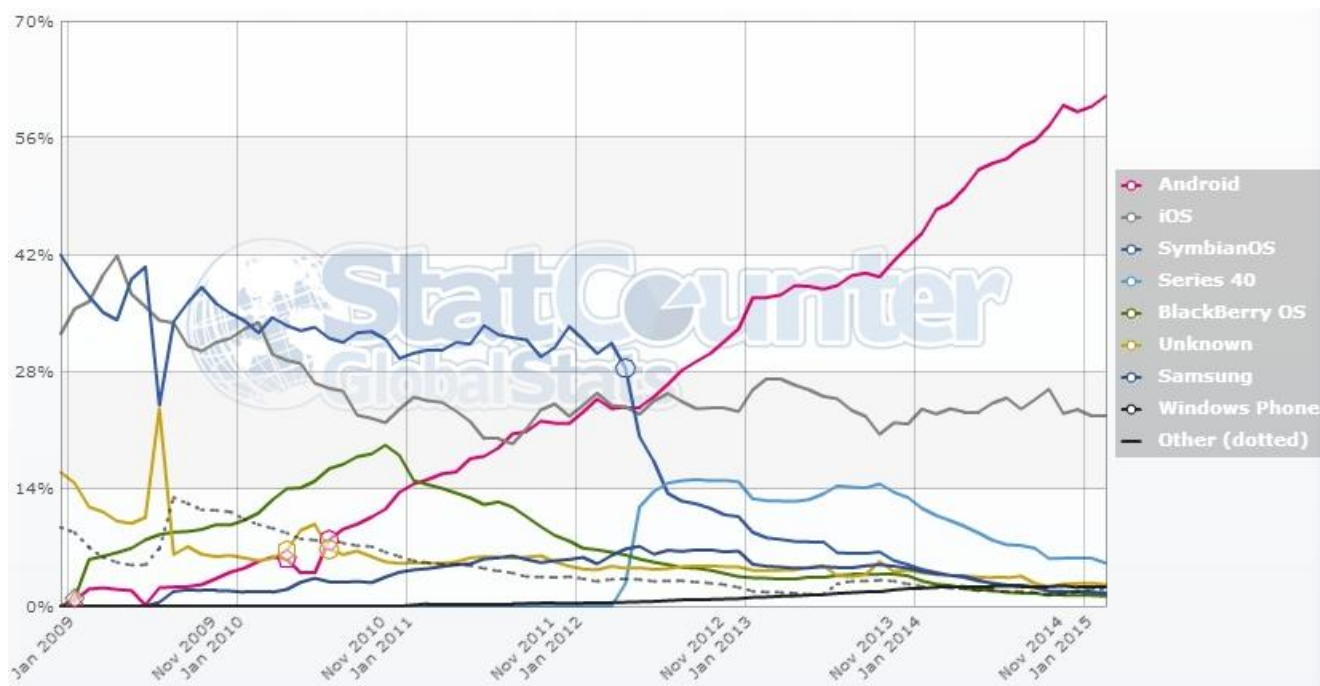


Figura 1-2 Estadística global de uso de sistemas operativos en dispositivos móviles [5].

Más concretamente, uno de los módulos del SAGA se centrará en la creación de una aplicación que resuelva los problemas de obtención de la posición, y el presente módulo se centrará en las capacidades de obtención de datos. Ambos lo harán usando el lenguaje de programación *Java* [6]. En última instancia, se creará una aplicación que conjuntamente obtenga los datos de los astros y directamente pueda utilizarlos para el cálculo de la posición mediante el código *Java* desarrollado.

1.4 Organización de la memoria

Después de contextualizar el trabajo y de clarificar los objetivos del mismo en este primer capítulo, se describe a continuación la organización del trabajo y el desglose de sus apartados.

En el capítulo 2, se describe el estado del arte de la navegación astronómica. En primer lugar, en el apartado 2.1, se pretende introducir al lector en los diferentes métodos de navegación que existen en la actualidad. Posteriormente, en los apartados 2.2 y 2.3, se explica más detalladamente la navegación por GPS y la navegación astronómica, con el objeto de comparar el método de navegación más usado hoy día (GPS) y el propuesto en el trabajo (astronómico). En el apartado 2.4, se actualiza al lector sobre lo más reciente en cámaras infrarrojas y se explican algunos ejemplos de automatización y seguimiento de astros que se pueden encontrar hoy día. El apartado 2.5 cierra el estado del arte explicando diferentes aplicaciones y software que se utilizarán en el proyecto.

En el capítulo 3, se describe el desarrollo del proyecto. Primeramente, se define el alcance del mismo en el apartado 3.1. Posteriormente, en el apartado 3.2, se explican los diferentes sensores que poseen los dispositivos móviles. Seguidamente, en el apartado 3.3, se explica la utilización de estos sensores para obtener la orientación y el movimiento de los dispositivos que los tienen. En el apartado 3.4, se consideran los diferentes aspectos respecto a la exactitud y la precisión de los datos obtenidos de los dos apartados anteriores. Posteriormente, en el apartado 3.5, se realizan unos primeros cálculos de alturas y azimut mediante el uso de los apartados 3.2, 3.3 y 3.4, llegando a unas conclusiones preliminares y definiendo los métodos concretos de cálculo para el proyecto. A continuación, en los apartados 3.6 y 3.7, se explican, respectivamente, la utilización de la cámara del móvil y el cálculo de la hora universal respecto a la hora proporcionada por el móvil. En el apartado 3.8, se desarrolla la fusión del módulo de adquisición de datos con el módulo de procesamiento y presentación de datos,

así como la creación y el funcionamiento de la aplicación SAGA. En un último apartado 3.9, se explica el montaje del móvil sobre un trípode, para dar paso así a la realización de pruebas.

En el capítulo 4, se describen los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo, detallándose las pruebas realizadas. En un primer apartado 4.1 se comparan los datos obtenidos con otras aplicaciones existentes. Posteriormente, en el apartado 4.2, se comparan los resultados de las alturas proporcionadas por el módulo de adquisición con las alturas obtenidas mediante el uso de un sextante. En el apartado 4.3, por otro lado, se comparan estas alturas con las proporcionadas por un programa informático. En el apartado 4.4 se exponen unas generalidades sobre las pruebas realizadas respecto al azimut. Por último, en el apartado 4.5, se desarrollan las pruebas realizadas con la aplicación SAGA, ya integrada con los dos módulos.

En el capítulo 5, se realiza una valoración global y se exponen las conclusiones del proyecto, así como las líneas de trabajo futuras. Comienza con una serie de conclusiones en el apartado 5.1, respecto a los objetivos del proyecto y la precisión y exactitud de la aplicación. El apartado 5.2 define las posibles mejoras y líneas de actuación futuras específicas del TFG realizado. Finalmente, el apartado 5.3 considera una serie de posibles líneas de actuación respecto a la modernización de la navegación astronómica en la Armada de hoy día.

El capítulo 6 cierra el proyecto con la bibliografía empleada durante el desarrollo del trabajo.

Por último, se podrán consultar, para más información, el Anexo I, referente a la teoría de la navegación astronómica y el Anexo II, referido a los errores producidos en las observaciones astronómicas.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción a las técnicas de navegación marítima

La OMI (Organización Marítima Internacional) define la navegación como “el proceso de planificación, registro y control del movimiento de un buque de un lugar a otro” [7].

2.1.1 Métodos de navegación

Como se describe en el Manual de Ayudas a la Navegación de la IALA/AISM (*International Association of Lighthouse Authorities* o Asociación Internacional de Señalización Marítima), los principales métodos de navegación marítima se pueden clasificar de la siguiente manera [7].

- Navegación por estima.

Navegación basada en el control de la velocidad, el tiempo transcurrido y la dirección seguida desde una posición conocida. Este método se basa en el registro de los rumbos mantenidos durante diferentes intervalos de tiempo a unas velocidades concretas, a las que se añaden correcciones aproximadas calculadas debido a elementos perturbadores como el viento y la corriente.

Básicamente se utiliza la cinemática para conocer la posición estimada respecto a la última posición conocida. De entre todas las técnicas de navegación, ésta es, con diferencia, la de mayor error a medio y largo plazo.

- Navegación costera o terrestre.

Navegación calculada por medio de información obtenida por la observación visual o mediante radar de elementos notables de la costa o marcas situadas en tierra. Con ella se consigue una gran precisión en zonas cercanas a costa.

- Navegación celeste o astronómica.

Navegación que utiliza la información obtenida de diferentes astros celestes (por ejemplo, el Sol, la Luna, los planetas o las estrellas). Esta navegación se limita hoy día a la enseñanza de alumnos de algunas academias navales militares o de centros de formación de navegación civiles. Esta navegación obtiene precisión de, al menos, una milla náutica en alta mar, y su utilización cerca de costa es menos exacta que la técnica de navegación costera. Además, la contaminación lumínica y la falta de horizonte dificultan su uso cerca de costa.

- Radionavegación.

Navegación que utiliza señales de radio para determinar la posición del buque (por ejemplo, el uso de la señal satélite del GPS o del GLONASS). Es, en la actualidad, el sistema de navegación más

extendido y de mayor uso. La radionavegación suele venir incluida dentro del grupo de navegación electrónica, que incluye el resto de sensores electrónicos de ayuda a la navegación.

Aunque el manual de la AISM no contempla la navegación inercial, ya que su uso no está totalmente extendido en el mundo de navegación marítima, en este proyecto se quiere dar una idea del funcionamiento de la misma, de la que se detallará su importancia respecto a posibles líneas futuras.

- Navegación inercial.

La navegación inercial es el proceso de medir la velocidad, orientación y desplazamiento de un vehículo desde un punto de partida conocido mediante la detección de las aceleraciones que actúan sobre él en direcciones conocidas por medio de instrumentos que mecanizan las leyes del movimiento de Newton [8].

La navegación inercial se dice que es *auto-contenida*, es decir, independiente de ayudas externas a la navegación. También se dice que es *pasiva*, porque no se emite ninguna energía para obtener información de fuentes externas.

La navegación inercial es fundamentalmente diferente de otros métodos de navegación electrónica en que sólo depende de medidas realizadas dentro del propio vehículo que navega.

Estos sistemas básicamente constan de tres giróscopos y tres acelerómetros que permiten determinar los valores de rumbo, cabeceo, balanceo y oleaje. Este sistema cobra importancia en momentos en los que se pueda dar una pérdida de señal de GPS o reducción drástica de la precisión aportada por el receptor GPS. La navegación inercial es utilizada sobre todo en aeronaves, aunque también es conocido su uso en barcos [9].

El SINS (*Ship Inertial Navigation System*), a pesar de su gran precisión, presenta un inconveniente grave: la acumulación en el tiempo de pequeñísimos errores instrumentales y de los imprevisibles errores accidentales, debidos principalmente al imperfecto cálculo de la dirección de la gravedad en el lugar.

Como la distancia se calcula por una doble integración, proporcional al cuadrado de los tiempos transcurridos, el error aumenta rápidamente con el tiempo, obteniéndose una precisión suficiente para vehículos muy veloces y durante desplazamientos de breve duración, pero escasa para vehículos que emplean largo tiempo en desplazarse.

Por ello es imprescindible ir corrigiendo la situación SINS por otros medios después de haber navegado un cierto tiempo, generalmente cada 8 horas [8].

El SINS se puede enlazar con cualquier otro sistema de navegación: costera, astronómica o electrónica, de modo que se refresque la situación inercial [10].

Por ejemplo, en el informe acerca de los ejercicios de perturbación de GPS realizados por la fragata F-101, se menciona que se detecta un fallo de 150 yardas (140 metros aproximadamente) en el tiempo de media hora en que el sistema inercial de navegación no recibe señal de GPS. Este error seguiría acumulándose al cabo del tiempo, pudiendo alcanzar fácilmente 1 kilómetro en el transcurso de 6 horas [11]. Posteriormente, volveremos a comentar acerca de este informe con más detalle.

2.1.2 Fases de navegación

Tradicionalmente la navegación se ha dividido en tres fases: navegación oceánica, navegación costera y navegación en aguas restringidas. Más recientemente, algunos documentos han introducido otras fases como aproximaciones a puerto, navegación dentro del puerto y navegación en canales interiores. Sin embargo, a efectos prácticos para este proyecto, se puede concluir que estas tres últimas son simplemente casos específicos de navegación por aguas restringidas.

Las definiciones específicas de las fases que se explicarán a continuación se han extraído de la IALA/AISM, que se explicarán a continuación desde un punto de vista del proyecto.

- Navegación oceánica.

Simplificando, puede definirse como aquella navegación alejada de costa para travesías más o menos largas. A día de hoy prácticamente todos los buques utilizan radionavegación (navegación electrónica) mediante GPS y GLONASS. Si, por cualquier motivo, alguno de estos sistemas fallase, no existe hoy día una alternativa fiable para navegación oceánica [12].

- Navegación costera.

Es aquella que tiene lugar cerca de tierra. En esta fase, existen técnicas de navegación costera alternativas al uso del GPS y que se podrían emplear en caso de fallo.

- Navegación en aguas restringidas.

Esta navegación es la más exigente puesto que debe implicar una gran exactitud. En este sentido requiere el uso de GPS y de navegación costera, en el caso de que éste no estuviese disponible.

Por estos motivos, la navegación astronómica cobra verdadera importancia en la navegación oceánica, donde un fallo de GPS no puede sustituirse actualmente por otro sistema de navegación que sea suficientemente preciso. La navegación astronómica desarrollada con la tecnología actual podría suplir esta carencia.

2.1.3 Estándares de exactitud para la navegación

La siguiente tabla presenta los estándares más importantes adoptados en los apéndices 2 y 3 de la resolución A915 de la OMI [7].

Planteamos los requerimientos mínimos necesarios para las diferentes fases de aplicación, para poder analizar más tarde la exactitud que debería tener un sistema de navegación astronómica para poder ser aceptado por la OMI.

Requerimientos mínimos de exactitud para los navegantes	
Aplicación	Exactitud horizontal absoluta (95%) (m)
Oceánica	10-100 ¹
Costera	10
En Aguas Restringidas	10
En Puerto	1
En Aguas Interiores	10

Tabla 2-1 Estándares más importantes de navegación

Comprobamos que, en la navegación oceánica, se requerirá una exactitud de mínimo 100 metros. Si en pocos años se avanzase tecnológicamente en la navegación astronómica moderna, como se explicará más adelante según los planes de la Marina Americana, podría empezar a extenderse el uso de la misma en los buques. Y aunque no se pudiese desarrollar de manera que cumpliera los requisitos de la OMI para poder llegar a ser el elemento primario de situación, siempre podrá ser una ayuda a la navegación que complementa otros sistemas.

¹ La resolución de la OMI A.915(22) en su Apéndice 2 incluye el requerimiento para una exactitud de 10 metros en la navegación oceánica, mientras que la resolución de la OMI A.953(23) menciona que *en aquellos lugares en los que se emplea un sistema de radionavegación para asistir a los barcos en la navegación en aguas oceánicas, el sistema debería proporcionar una precisión de 100 m. con una probabilidad del 95%*.

2.2 Navegación GPS

Los sistemas de posicionamiento por satélite surgieron de la siguiente idea: si desde una estación de tierra, se puede predecir la órbita de un satélite, también se puede determinar la posición de un punto de la tierra, si la órbita del satélite se conoce. Este proceso realizado por varios satélites es lo que permite triangular una posición de un receptor GPS en tierra.

El sistema de satélites GPS americano permite una cobertura global para navegación marítima, aérea y terrestre, de una precisión de hasta 2 ó 3 metros, frente a los 7 ó 10 metros del sistema GLONASS ruso; según menciona el presidente de la asociación GLONASS, Alexander Gurko [2]. Esto le hace ser el más usado entre los sistemas GNSS. Hace falta entender el funcionamiento de este sistema para analizar las limitaciones que pueda implicar.

2.2.1 Estructura del GPS

El sistema GPS está formado por tres segmentos muy diferenciados [13].

- Segmento Espacial.

El segmento espacial está formado por 24 satélites (3 de ellos de reserva) que orbitan circularmente a un altura media de 20.000 km en 6 órbitas diferentes. Esta distribución permite que, desde cualquier punto de la superficie terrestre, puedan observarse al menos 4 satélites (normalmente se pueden observar entre 5 y 8 satélites). Es el Departamento de Defensa Norteamericano el que asegura la puesta en órbita de los satélites, su mantenimiento y seguimiento.

- Segmento Control.

Está formado por una serie de cinco estaciones próximas al Ecuador que monitorizan y siguen los satélites. La Estación de Control Principal, además, se encarga de calcular la situación exacta de cada uno de los satélites según los datos del resto de estaciones.

- Segmento Usuario.

Está formado por los receptores GPS que permiten al usuario conocer su posición. Este segmento incluye los dispositivos usados en buques civiles y militares, en automóviles, e incluso los usados en dispositivos móviles.

2.2.2 Inconvenientes del uso del GPS

Las satélites que forman parte del sistema GPS envían varias señales de diferentes frecuencias. De ellas, algunas son para uso comercial (de uso "abierto"), y otras para uso militar, y por tanto están protegidas mediante cifra. Todas las señales son débiles cuando llegan a la Tierra, y es fácil perturbar estas frecuencias e impedir su uso por parte de cualquier usuario en un determinado área, emitiendo ruido en las frecuencias correspondientes con una potencia no demasiado grande.

Tras analizar los informes de los ejercicios realizados por la fragata F-101 sobre perturbación del GPS, que se comentaron anteriormente, se puede hacer uno a la idea de la vulnerabilidad táctica y de seguridad que presenta [11].

El primero de ellos consistía en el empleo de perturbación de la señal satélite por parte de una estación en tierra para analizar sus efectos en el Sistema de Combate y en los sistemas de navegación de a bordo, como la WECDIS (*Warship Electronic Chart Display and Information System*), el GMDSS (*Global Maritime Distress and Safety System*), el EPIRB (*Emergency Position Indicating Radio Beacon*) o las comunicaciones satélite. La estación de perturbación colaboradora utilizada desde tierra tenía un alcance de 7NM (millas náuticas) y un ancho de haz de 60°, como se puede ver en la Figura 2-1.



Figura 2-3 Pérdida de señal en el sistema satélite militar [11].

En un segundo ejercicio, se probaron dos perturbadores portátiles alemanes que se trasladaron a bordo de la fragata. El primero de ellos, que puede verse en la Figura 2-4, fue diseñado para perturbación de banda civil, y tenía un alcance de pocos kilómetros con tan solo 20 mW de potencia gracias a una antena acoplada. Según informó su operador, que asistió a las pruebas realizadas, se puede encontrar por Internet por un precio que ronda los 15 euros y, aunque consta que en los Estados Unidos ha sido retirado del mercado, se puede encontrar en otros países.



Figura 2-4 Primer perturbador portátil utilizado.

El segundo perturbador puede actuar tanto en la banda civil como en la militar (véase Figura 2-5). En cuanto se puso en funcionamiento, y según la frecuencia de perturbación, se perdió la señal del GPS civil y, posteriormente, el militar. El buque permaneció sin señal GPS durante poco más de media hora, tiempo que duró la perturbación. Los equipos de navegación volvieron a verse afectados.



Figura 2-5 Segundo perturbador portátil utilizado.

Además, recientes estudios han demostrado que es posible realizar *spoofing* (técnica que permite radiar en las mismas frecuencias que las de los sistemas de posicionamiento por satélite para suplantar la señal) en señales comerciales. Emitiendo señales cerca de la plataforma iguales a las que recibiría de los satélites del sistema GPS, no solo se puede inhibir el sistema, sino que se le podría engañar. Esto podría derivar incluso en perturbar vehículos UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) o a aquellas plataformas que utilicen el piloto automático para poder dirigirlos donde se desee [14].

Un perturbador GPS puede comprarse en muchas tiendas; con sólo 1W se pueden interferir equipos a 50 km a la redonda, y con 9W se puede interferir la frecuencia militar. Aunque algunos receptores militares van equipados con equipos anti-contra medidas electrónicas, no dejan de ser filtros que hacen que la recepción sea peor y no son siempre fiables [15].

Teniendo en cuenta estos aspectos, el segmento usuario parece el más vulnerable frente a las perturbaciones externas, ya que se ve afectado de forma directa y se necesita poca potencia para ello. Sin embargo, no es el único segmento susceptible de verse afectado por causas externas.

Los satélites están expuestos a colisiones con chatarra espacial u otros objetos extraterrestres, así como a tormentas solares que podrían inducir un ruido potente en las frecuencias de GPS, incluso impidiendo su uso temporalmente. Por ejemplo, si las tormentas solares fuesen de dimensiones similares a las tormentas acaecidas el 23 de julio de 2012, o a la famosa tormenta solar “evento Carrington” en 1859, podrían dañar el segmento espacial del GPS [16].

Como última vulnerabilidad del GPS, es importante saber que el operador del segmento control (que, en el caso del GPS, sigue siendo el Pentágono) sigue teniendo la posibilidad de apagar la señal civil en un determinado territorio o bajar la precisión de forma artificial. Esta función está soportada por la nueva generación de satélites GPS. Y no solo nos referimos a un conflicto militar, si no que se puede utilizar la amenaza del apagón “del interruptor del navegador” para objetivos políticos y económicos. Por eso, de la dependencia tecnológica en el estrecho sector de la navegación por satélite no hay más que un paso hacia la dependencia económica, política y militar [2].

2.2.3 Conclusiones

Desde el punto de vista de la Armada Española, este sistema está totalmente controlado por los EEUU, lo que supone una dependencia estratégica considerable hasta que Europa ponga en

funcionamiento el sistema Galileo, que tendría las mismas vulnerabilidades que el GPS, y que no contará con frecuencias de uso exclusivamente militar [17].

A medida que nuestras fuerzas de defensa se basan cada vez más en el GPS, es importante que esta dependencia no se convierta en un riesgo para las operaciones militares. Se necesitan alternativas independientes del GPS. La aplicación imaginativa de la tecnología disponible puede garantizar que la navegación astronómica tenga un papel importante que desempeñar en el futuro como lo ha hecho en el pasado, para ayudar a proporcionar un paso seguro para nuestras fuerzas militares en todo el mundo.

Todas estas vulnerabilidades y dependencias nos hacen pensar que sería necesario un sistema auxiliar, sobre todo para las navegaciones oceánicas, y para las largas navegaciones lejos de costa.

Antes del desarrollo de los sistemas de posicionamiento por satélite, los marinos debían situarse tras largas estancias alejados de costa, usando el Sol o los astros en los crepúsculos. La idea de este proyecto es volver a analizar esta forma de navegación desde un punto de vista más actual, planteando su uso en la navegación moderna.

2.3 Navegación astronómica

2.3.1 Introducción a la navegación astronómica

La navegación astronómica ha estado marcada por diferentes hitos a lo largo de la historia.

En sus comienzos, los marinos sólo podían obtener su latitud, mediante la observación de la estrella Polar o la observación del Sol a la hora de la meridiana (hora en la que el Sol se encuentra en su punto más alto en el cielo), utilizando un cuadrante.

Con la invención del sextante, véase la Figura 2-6, en el siglo XVIII, se mejoró la precisión con la que se obtenía la latitud, y con la invención del cronómetro de John Harrison, en el siglo XIX, fue posible obtener la longitud. En el año 1930, Ageton, oficial de la Marina Americana graduado de la Academia Naval de Annapolis (USA), desarrolló un método que, mediante tablas de logaritmos y funciones trigonométricas, simplificaba los cálculos para obtener situaciones observando a los astros o al Sol.

La navegación astronómica fue ganando precisión a medida que avanzaba la tecnología y era el arte de navegación más usado hasta hace pocas décadas. Pero con el desarrollo de los sistemas de posicionamiento por satélite, este arte de navegación ha ido perdiendo paulatinamente importancia, hasta el punto de que en academias navales tan importantes como la de Annapolis ya no se exige su conocimiento por parte de los alumnos.

2.3.2 Explicación teórica básica

Para poder comprender del todo el funcionamiento del proyecto, es necesario asimilar algunos conceptos claves de la navegación astronómica.

- Horizonte visible

Comúnmente, y para efectos prácticos del lector, se entiende como línea divisoria del mar y del cielo. Esta línea es la que tradicionalmente se ha utilizado en la navegación astronómica a la hora de tomar la altura de un astro.

- Altura del astro

Arco vertical contado desde el horizonte hasta el astro en estudio. Es decir, el ángulo de separación, desde el punto de vista del observador, entre el horizonte y el astro, tal y como se ve en la Figura 2-6. Esta altura suele medirse con el sextante, aparato que, mediante un sistema de espejos, facilita la medición de esta altura con una precisión de hasta varios segundos de arco.

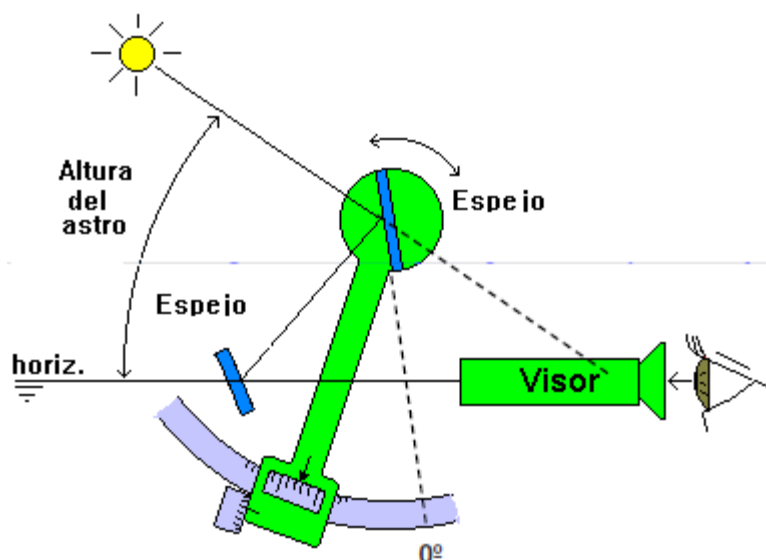


Figura 2-6 Representación esquemática de un sextante [18]

- Azimut del astro

Suele definirse, en navegación astronómica y de forma reducida, como el arco medido sobre el horizonte desde uno de los puntos cardinales norte o sur hasta la vertical del astro que se está estudiando.

Estos dos conceptos son los más importantes a la hora de entender el módulo de adquisición de datos del SAGA. El concepto de horizonte volverá a tratarse posteriormente en el apartado 3.5.3. También, para ampliar más información sobre navegación astronómica, puede consultarse el Anexo I.

2.3.3 Comparativa con el sistema GPS

En comparación con el sistema GPS, este sistema no dependería de ningún elemento artificial externo, como el segmento espacial del GPS o sus estaciones de control del segmento terrestre. Por ello, no compartiría sus vulnerabilidades, y además sería prácticamente despreciable su coste de instalación comparado con el coste de mantenimiento de los sistemas de posicionamiento por satélite.

En la actualidad, este sistema serviría tanto de comprobación del correcto funcionamiento del GPS, como sistema alternativo, en caso de que el GPS no funcionase correctamente por motivos externos al barco, o de que se sufriera una perturbación en sus frecuencias de trabajo.

Al igual que muchos sistemas de navegación por GPS, y como se ha comentado anteriormente, este sistema astronómico podría funcionar integrado junto a un sistema de navegación inercial, que funciona de manera independiente del exterior. Los sistemas inerciales son precisos, aunque acaban adquiriendo mayor error al cabo de un tiempo.

El sistema de posición astronómico puede corregir al menos este sistema cada ciertos intervalos de tiempo, y el sistema inercial suplir la carencia del astronómico cuando las condiciones meteorológicas impidan su correcto funcionamiento. En este sentido, se complementarían mutuamente para poder formar un sistema de posicionamiento secundario e independiente al GPS [19].

Como curiosidad, es interesante saber que para poner los satélites en órbita, las agencias espaciales se basan en la observación del mapa celeste [20]. Tal y como lo aseguran ingenieros de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), para que el GPS funcione, se requiere saber la posición del satélite en su órbita con respecto a la Tierra con mucha precisión, pero a la vez es necesario conocer el movimiento y la posición exacta de la Tierra. Por ello, se mira al espacio en busca de alguna referencia que pueda indicar la posición y movimiento exacto de la Tierra. Sin embargo,

incluso las estrellas se mueven, y en este sentido tampoco servirían. Por ello, la NASA suele utilizar como referencia los cuásars (*quásar*, *Quasi-Stellar Radio source*). Son objetos celestes muy lejanos que emiten cantidades enormes de energía, siendo centenares de miles de veces más brillantes que las estrellas. Esta radiación y su lejanía los hacen ser puntos prácticamente fijos y además visibles en el espacio y, por ello, una referencia ideal.

2.3.4 Navegación astronómica moderna

Han existido y todavía existen sistemas que utilizan la navegación astronómica con objeto de obtener la situación de diferentes plataformas móviles, sobretudo en el ámbito militar. Parte de estos sistemas y proyectos acabaron desapareciendo al dejar de ser económicamente rentables tras el vertiginoso desarrollo del GPS; aunque es posible que en pocos años esta tecnología vuelva a emplearse. El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema basado en la navegación astronómica de menor coste que sistemas anteriores, aprovechando los avances tecnológicos de los últimos años. Se indican a continuación algunos ejemplos del uso de técnicas de navegación astronómica.

- Aeronaves

El sistema NAS-14V2 ANS, desarrollado por *Nortronics* (Compañía de Seguridad de Sistemas Integrados), e instalado en el avión de reconocimiento estratégico de largo alcance, SR-71 *Blackbird*, fue desarrollado a comienzos de los años sesenta, pocos años antes de que el sistema TRANSIT fuese declarado operativo [21]. El avión usaba el sistema de navegación inercial mediante giróscopos y acelerómetros para obtener su posición y corregía los errores provocados en ésta mediante el seguimiento de las estrellas con el uso de un telescopio. La resolución del problema astronómico por este sistema no es exactamente la que se desea para este proyecto, ya que lo que hacía este sistema era analizar las imágenes tomadas de un determinado grupo de estrellas mediante un telescopio para, mediante el uso de una base de datos, obtener su posición y poder corregir el sistema inercial de navegación que utilizaba.

- Misiles

De modo parecido al sistema desarrollado por *Nortronics*, es sabido que la mayoría de misiles balísticos intercontinentales existentes hoy día se aprovechan de la navegación astronómica para corregir y comprobar su rumbo en las capas más exteriores de la atmósfera, siendo así completamente inmunes a posibles interceptaciones. El método de observación que utilizan estos misiles es diferente al método clásico de navegación astronómica en los buques. Incluye una cámara que capta la luz de los astros celestes y calcula el ángulo de elevación en un grupo de, al menos, cinco estrellas. Este software incluye la capacidad de reconocer los astros y de calcular la posición exacta del misil. Este sistema funciona bien en las capas más altas de la atmósfera, debido a la falta de nubes y de contaminación atmosférica y lumínica, y no serviría para buques. Sin embargo, pone de manifiesto que es posible y viable el uso de la navegación astronómica de forma automática mediante el uso de cámaras.

- Buques y Submarinos

Peter Boyne, Oficial retirado de la Marina de los Estados Unidos, explica en una entrevista cómo se hacía cargo hace 50 años de obtener la situación exacta del submarino nuclear donde estaba embarcado como Oficial de Derrota, encargado de la navegación [22]. Explica que parte de su tarea era utilizar un periscopio especial que integraba un sextante muy preciso y un software de resolución. El periscopio reconocía las estrellas y obtenía la posición del submarino en menos de un minuto. Sin embargo, la mejora en los sistemas de navegación inercial (SINS) provocó su desuso.

Mucho más tarde, en 1993, el Jefe de Operaciones Navales de la Marina de los Estados Unidos propuso al Observatorio Naval Americano la tarea de proporcionar software estándar de navegación astronómica para el uso de su flota de guerra. Comenzó entonces el desarrollo del proyecto STELLA, software que recogía los algoritmos de resolución astronómica para obtener una situación en un momento determinado [19].

Fácilmente puede uno deducir que cuando se combinan varios métodos de navegación, el objetivo es utilizar las ventajas de una técnica para compensar las debilidades de la otra de modo que obtengamos significativamente mayor precisión y fiabilidad. Con este fin, la Marina Americana comenzó hace más de una década el proceso de implementación del NAVSSI (*Navigation Sensor System Interface*), un ordenador en tiempo real que ofrece al navegante una solución única para la posición, la velocidad y la información de rumbo del GPS, sistema inercial, ecosonda, brújula giroscópica, radar y otras fuentes [23].

Debido a que la Marina de los Estados Unidos volvió a interesarse a finales del siglo XX en utilizar de nuevo la navegación astronómica como modo secundario de navegación para sus buques y aeronaves, desde hace una década, la Marina Americana cuenta con el sistema STELLA plenamente integrado en el sistema NAVSSI, de manera obligatoria en todos sus buques. El problema que se encontró fue encontrar el hardware necesario para proporcionar al STELLA unos datos suficientemente precisos para poder utilizar el software en su máxima eficiencia, que se aproxima en unos 17 metros [19].

2.4 Nuevas tecnologías

2.4.1 Uso de cámaras infrarrojas

No ha sido hasta hace pocos años que se ha podido desarrollar el hardware necesario para la localización de estrellas con la suficiente precisión como para poder integrarse con el sistema STELLA de modo que se aproveche su máxima precisión. La empresa Americana OPS (*Optical Physics Company*) desarrolló un aparato capaz de detectar estrellas llamado OCNS (*Optical Celestial Navigation System*), conocido también como *Star Tracker* (Seguidor de Estrellas) [24]. Este aparato es capaz de proporcionar ángulos medidos entre estrellas con mucha precisión, ideal para proporcionar datos al sistema STELLA. La Marina Americana subvenciona a día de hoy la creación de un segundo modelo que permita obtener datos tanto de día como de noche [25].

El funcionamiento de este aparato consiste básicamente en la recepción de rayos de la región de infrarrojo cercano procedente de los diferentes astros celestes. Tiene una sensibilidad suficiente como para poder detectarlos de día o de noche, incluso con cierta nubosidad o niebla. El *Star Tracker* necesita dos o más estrellas para obtener su posición, además de que tiene un sensor de horizonte muy preciso, lo que permite apurar su posición y altura para su uso en aeronaves, objetivo para el que fue diseñado. Estos aparatos llegan a tener una precisión de 0.002° (aproximadamente 7 segundos de arco), lo que implica mucha más precisión que un sextante, además de ser mucho más exacto [24].

Sin embargo, el uso de cámaras infrarrojas no es, en ningún caso, un invento reciente. Las cámaras infrarrojas se han utilizado durante décadas para diferentes usos. Para acercarnos a una realidad más accesible que el *Star Tracker*, se aprovechó la visita del Patrullero “Atalaya” a la Escuela Naval Militar para utilizar la cámara infrarroja del buque, conocida como FLIR (*Forward Looking Infra Red*). Se hizo uso de la cámara para realizar un seguimiento (*tracking*) del Sol, y así comprobar la viabilidad de utilizar la cámara y ese seguimiento para el cálculo de posición mediante cálculos astronómicos.

En un primer momento, con el cielo despejado, el sistema FLIR no era capaz de realizar un filtrado de la imagen infrarroja que la cámara detectaba procedente del Sol, por lo que la pantalla se cubría de un brillo blanco que impedía distinguir claramente su situación. Sin embargo, cuando el Sol fue cubierto por cierta nubosidad y era imposible su visualización por el ojo humano, la cámara FLIR era capaz, no sólo de localizarlo, si no de hacer un seguimiento preciso de su situación. Ejemplos de estas imágenes pueden verse en la Figura 2-7. A la izquierda, se observa una imagen del Sol en una parte del cielo descubierto; sin embargo, a la derecha, se observa una imagen del Sol detrás de cierta nubosidad. Es más, aunque no fue posible la realización de pruebas con las estrellas durante la noche, miembros de la dotación aseguran que es posible el seguimiento de la Luna y, en ciertas ocasiones de cielo

despejado y mucha claridad, de las estrellas más brillantes. Esto nos hace pensar en la posible realidad del uso de cámaras infrarrojas para la navegación astronómica.

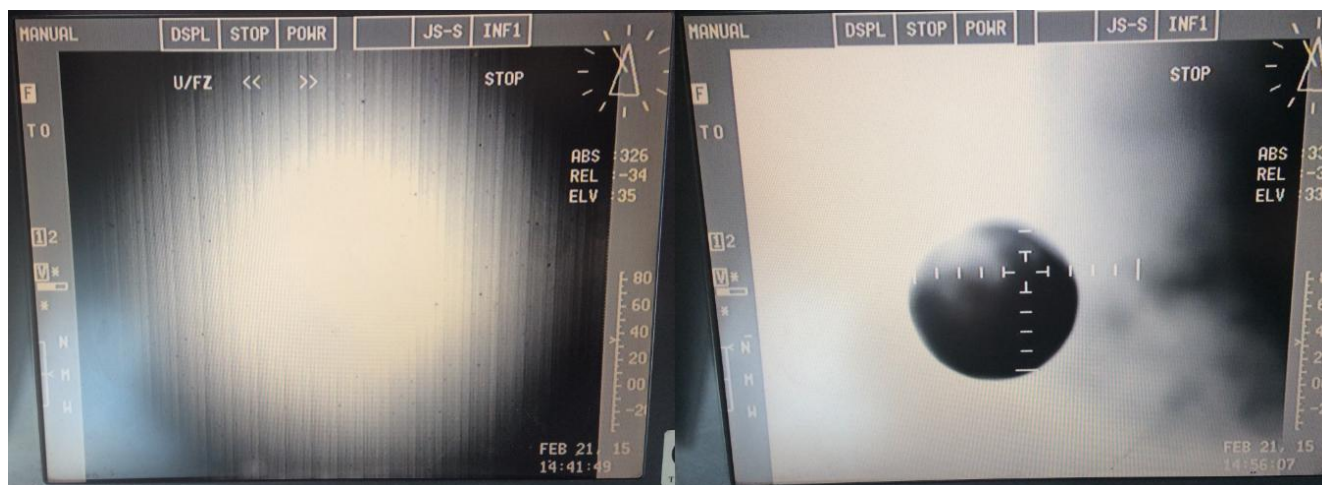


Figura 2-7 Comparación de imágenes del Sol obtenidas con FLIR en modo cámara infrarroja según la nubosidad.

En la práctica, la cámara fue capaz, incluso cuando densas nubes cubrían parcialmente parte del astro, de realizar su seguimiento del Sol mientras variaba ligeramente su valor de altura y azimut, demostrando que el seguimiento del Sol mediante cámaras infrarrojas, incluso en situaciones de cielos cubiertos, es factible. Posteriormente, en la Figura 2-8, pueden observarse ciertas imágenes tomadas de las pruebas realizadas durante el momento en que el Sol se encontraba totalmente cubierto por densa nubosidad. En la parte izquierda, se encuentra la imagen correspondiente al modo de cámara normal y, a la derecha, el modo infrarrojo.

Las cámaras infrarrojas resuelven uno de los mayores problemas de la navegación astronómica durante toda su historia: la nubosidad. Sin embargo, las soluciones a la nubosidad no son algo nuevo del siglo XXI, ni siquiera del siglo XX. Podemos remontarnos a la época en la que los vikingos dominaban los mares del norte, y se embarcaban en largas navegaciones atravesando el norte del océano Atlántico, allí donde reinan las borrascas y la nubosidad. Se dice que los vikingos utilizaban lo que se conoce como la “piedra solar”, actualmente llamada “espató de Islandia”, una forma transparente y de formación natural de cristal de calcita que polariza la luz y puede indicar la posición del Sol [26]. Restos de esta piedra fueron encontrados recientemente en un buque de guerra inglés del siglo XVI [27]. A día de hoy, no es necesaria la creación de lentes polarizadas que faciliten la percepción de los rayos solares a través de cierta nubosidad, puesto que, como hemos visto, las cámaras infrarrojas construidas y ajustadas para tal fin pueden realizar esta función.



Figura 2-8 Comparación de imágenes obtenidas en modo cámara normal y cámara infrarroja.

2.4.2 Automatización y seguimiento de astros

Acercándonos un poco más al objetivo del proyecto, podríamos plantearnos si se ha desarrollado algún dispositivo capaz de realizar seguimiento o búsqueda de diferentes astros del cielo. Existen proyectos de placas solares controladas por un sistema capaz de mantenerlas apuntando en todo momento al Sol, de forma que los rayos incidan siempre de forma perpendicular, consiguiendo de este modo una máxima eficiencia.

Este sistema funciona trasladando a un brazo robótico los datos de la altura y el azimut del Sol para cada momento y para una situación concreta (aquella donde se instala la placa). Estos datos se transmiten al brazo después de haber sido calculados con los algoritmos astronómicos muy parecidos a los que se utilizan en el módulo paralelo de este proyecto, con los que se puede saber la posición del Sol en todo momento para una localización fija.

Sin embargo, existe un proyecto en concreto que puede incluso corregir posibles pequeñas variaciones a esta posición provocadas por viento u otras fuerzas externas [28]. El proyecto propone dos formas diferentes de centrar el Sol, de modo que se corrijan esas pequeñas variaciones. La primera de ellas consiste en una serie de pequeñas células fotovoltaicas inclinadas respecto a un centro. Estas placas podrían indicar a un microprocesador, mediante señales eléctricas proporcionales a la recepción de rayos solares, la mayor o menor luminosidad que reciben, y así dar una idea de la pequeña desviación respecto al Sol. De este modo, podrían corregirse esas pequeñas diferencias para dar una posición de la placa perfectamente perpendicular a los rayos solares.

El segundo método se trataría de un software de reconocimiento de imagen que permita filtrar una imagen del Sol y mandar pequeñas señales para mantener centrada la imagen recibida por la cámara, de modo que reciba señal perpendicular a la placa, tal y como se muestra en la Figura 2-9.

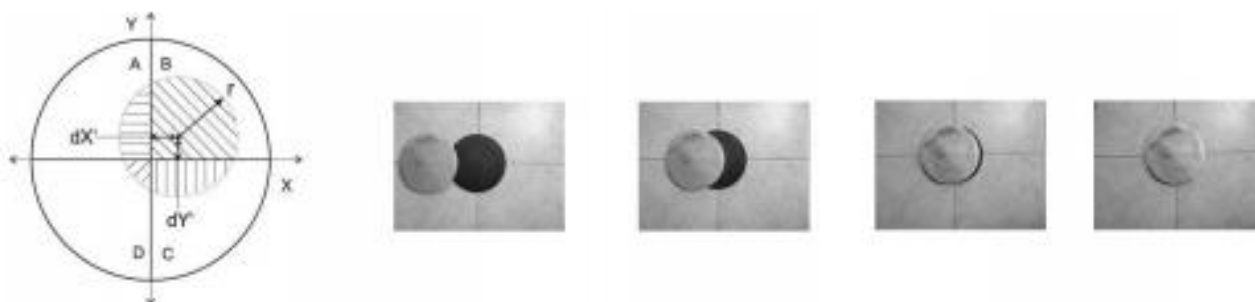


Figura 2-9 Ilustración conceptual de seguimiento del Sol mediante alineamiento del mismo con una cámara con software reconocimiento de imagen

Cualquiera de estos dos métodos nos da una idea de que puede desarrollarse un sistema que mantenga una cámara apuntando a la teórica posición del Sol para una localización dada. Además, el segundo método podría ser también utilizado para el seguimiento de estrellas y planetas de noche. Aunque la plataforma se mueva, ésta podrá calcular una corrección en ángulo de azimut y de altura para mantener el Sol (o la estrella) en el centro, y estas correcciones pueden traducirse en un cambio de posición. Este sistema, desarrollado a la inversa, podría calcular la posición de una plataforma móvil (de velocidad relativamente lenta, como un barco) a partir del seguimiento del Sol o de alguna estrella.

Al igual que en el proyecto, mencionado anteriormente, se explican detalladamente posibles formas de hacer seguimiento del Sol, y de una forma hasta cierto punto accesible, existen diferentes programas de reconocimiento de imágenes que son capaces de realizarlo. Por ejemplo, y como se mencionó en el apartado anterior, se consiguió hacer un seguimiento de la imagen infrarroja del Sol haciendo uso de su cámara FLIR del Patrullero “Atalaya”. La fusión del cálculo de la posición estimada del Sol con la posibilidad de su seguimiento, haría posible obtener unos valores correctos de

azimut y altura en todo momento del Sol, para obtener así una posición continua mediante su observación.

2.5 Tecnología empleada

2.5.1 Acceso a los sensores de dispositivos móviles

De forma más concreta, y relacionada con el montaje de este proyecto, existen en el mercado numerosas aplicaciones para el sistema operativo *Android* capaces de calcular la posición relativa del móvil accediendo a sus sensores, lo que se podrá usar para conocer la altura del astro. Además, existen también aplicaciones para conocer el norte magnético y el norte verdadero, y poder saber así el azimut de los astros. Esto último plantea un problema, puesto que, para conocer el norte verdadero, es necesario conocer la posición del dispositivo. Más adelante se explicarán, más detalladamente, sus limitaciones y sus posibles soluciones. De manera general, el problema principal de estas aplicaciones es tanto la exactitud en la medida como la precisión de la misma.

- *Clinometer*

Esta aplicación gratuita ofrece la posibilidad de medir ángulos con una precisión de 0.1° aproximadamente (correspondiente a 6 minutos de arco) en todas las direcciones de giro. Además, tiene la opción de calibrar de manera precisa según la dirección en que se quiera medir. Posee una función en la que el móvil espera a tener una cierta estabilidad para señalar el ángulo calculado en ese momento.

- *Transportador*

Aplicación gratuita que permite conocer el ángulo de inclinación del dispositivo en dos ejes de rotación. Cuenta también con la opción de calibración a cero y su precisión es de 0.1° .

Éstas y alguna otra aplicación pueden utilizarse para poder medir la altura de un astro respecto del horizonte verdadero del observador.

- *Compass*

Esta aplicación gratuita ofrece la posibilidad de obtener tanto el norte magnético como el norte verdadero. Tiene posibilidad de calibrar la brújula para obtener una mayor precisión. Ofrece una presentación moderadamente estable del norte magnético. El único inconveniente, al igual que en el resto de aplicaciones parecidas, es que se necesita conocer la posición del móvil para poder calcular el norte verdadero. El motivo es que, para poder corregir la ubicación del norte magnético y obtener el geográfico, se requiere conocer la declinación magnética, que depende de cada zona. Por ello, permite el acceso a la posición del móvil mediante GPS o red inalámbrica WiFi. Su precisión es de 1° (60 minutos de arco).

- *Compass Pro*

Esta aplicación es una mejora a la aplicación *Compass*. Básicamente posee una mayor precisión por el coste de 2.49 euros.

Éstas y otras aplicaciones de brújulas permitirían obtener, de alguna forma, el azimut de los astros.

- *Magnet Meter*

Aplicación gratuita que proporciona una medida del norte magnético, además de proporcionar datos del acelerómetro del móvil. Tiene una precisión de 1° y poca estabilidad en su presentación, ya que varía constantemente según la recepción del sensor de campo magnético.

- *Phone Tester*

Esta sencilla aplicación gratuita accede a los datos de los diferentes sensores del móvil y los representa en la pantalla. Presenta datos del acelerómetro y del giróscopo en las tres direcciones del

espacio, con una precisión de 0.001 m/s^2 . Además, presenta los datos de la brújula con una precisión de 0.1° , aunque para una posición fija varía constantemente aproximadamente $\pm 2^\circ$. Proporciona también diferentes ángulos con respecto al plano horizontal, además de otros muchos sensores y parámetros del móvil que no son de interés en este trabajo.

- *Google Sky*

Esta herramienta gratuita permite al usuario localizar los diferentes astros del cielo para un momento dado y en una posición concreta a la que accede mediante GPS, representándolos en la pantalla.

Existen además muchas otras aplicaciones que representan un puntero en la pantalla para poder apuntar a determinados objetos y poder centrarlos en la cámara. Con este mismo objetivo, se podría crear un puntero con el que poder apuntar a cualquier astro y centrarlo en el centro de la pantalla, para poder así obtener con mayor precisión la altura de los mismos.

Estas aplicaciones reúnen los requisitos que debería tener la aplicación a realizar en este proyecto, de modo que se utilicen conjuntamente para obtener la altura y el azimut de un astro en un momento determinado al apretar un botón; o bien obtener la altura de tres astros diferentes en sus respectivos momentos. En la Tabla 2-2 se observa un resumen de estas aplicaciones.

Del mismo modo que existen aplicaciones para dispositivos con sistema operativo *Android*, existen otras aplicaciones disponibles únicamente para sistema operativo *iOS*. Éstas no se estudiarán puesto que, como ya se ha indicado en el capítulo 1, se pretende desarrollar la aplicación en el sistema *Android*.

Nombre App.	Medición	Precisión	Precio	Utilidad	Observaciones
<i>Clinometer</i>	Ángulos	0.1°	0	Cálculo alturas	Sensor de estabilidad
<i>Transportador</i>	Ángulos	0.1°	0	Cálculo alturas	Muy estable
<i>Compass</i>	Norte mág./verd.	1°	0	Cálculo azimut	Uso sencillo
<i>Compass pro</i>	Norte mág./verd.	1°	2.49 €	Cálculo azimut	No mejora notable
<i>MagnetMeter</i>	Norte magnético	1°	0	Cálculo azimut	Poco estable
<i>Phone tester</i>	Giróscopo Acelerómetro Brújula	0.001 m/s^2 0.001 m/s^2 0.1°	0	Acceso a todos los sensores de móviles	No posibilita congelar los datos, que varían constantemente
<i>Google Sky</i>	Presentación astros	-	0	Reconocimiento de astros	Necesita posición GPS para localización

Tabla 2-2 Tabla resumen de las aplicaciones más conocidas en el sistema operativo *Android*.

2.5.2 Software empleado

Para el desarrollo de la aplicación, se han utilizado los siguientes programas y lenguajes de programación:

- *Java*

Es un lenguaje de programación de propósito general, concurrente, orientado a objetos y multiplataforma, lo que quiere decir que se puede utilizar para varios propósitos, que soporta varios procesos simultáneamente, que se basa en la creación de objetos y la forma de relacionarse entre ellos

y que puede ser ejecutado sobre cualquier arquitectura informática siempre y cuando tenga instalada la máquina virtual de *Java*.

Este lenguaje de programación es ampliamente usado hoy en día, y en lo que concierne a este proyecto, es importante mencionar que la mayor parte de las aplicaciones que se utilizan en el sistema operativo *Android* están escritas en *Java*.

Para el presente proyecto, ha sido necesario instalar el denominada JDK (*Java Development Kit*), imprescindible para diseñar programas basados en *Java*. Esta herramienta contiene, entre otras cosas, el JRE (*Java Runtime Environment*), que hace de intermediario entre el sistema operativo en concreto y *Java*; y el JVM (*Java Virtual Machine*), que es la aplicación donde se ejecutan los programas que se diseñan. Estas herramientas han sido descargadas de la página de Internet oficial de *Java* [6].

- *Android*

Es el sistema operativo más utilizado en el mundo en dispositivos portátiles como *smartphones* o *tablets*. Fue diseñado para funcionar en este tipo de dispositivos y está basado en Linux. La mayor parte de las aplicaciones que se utilizan en *Android* están escritas en *Java*.

Para poder crear aplicaciones en *Android*, ha sido necesario descargar el *Android SDK* (*Software Development Kit*) de la página oficial de *Android* [4].

- *Eclipse Luna*

El *Eclipse Luna* [29], es un programa de código abierto multiplataforma que nos permite, junto con la JDK de *Java* y el SDK de *Android*, escribir y compilar en tiempo real código tanto en *Java* como en *Android*. Este programa nos servirá para diseñar y crear programas en *Java* para la resolución de los problemas astronómicos, y, posteriormente, para diseñar y crear la aplicación móvil que resuelva los problemas obteniendo los datos de los sensores del móvil.

- *Navigator*

A día de hoy existen muchos programas que resuelven los problemas de situación astronómica recibiendo los datos de las alturas de los astros, la hora y la situación estimada, que son transmitidos al programa de forma manual. Es el usuario el que tiene que tomar las alturas con el sextante, para que el programa resuelva el problema. Este tipo de programas se acerca más al propósito de este proyecto. Uno de los más conocidos es el *Navigator* [30], que además es usado en la Escuela Naval Militar en la asignatura de Navegación, así como durante la navegación a bordo del Buque Escuela “Juan Sebastián de Elcano”. Este software será utilizado posteriormente en el proyecto como ayuda a la realización de pruebas.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Definición del alcance del TFG

La primera característica a destacar es la necesidad de comenzar a desarrollar este sistema en una plataforma fija, con objeto de poder abordar la adquisición de datos con precisión. No se va a plantear en este trabajo la instalación de un sistema en una plataforma móvil, como sería el caso de un buque.

En este proyecto se requiere acceder a los *microsensores* de un dispositivo móvil para poder calcular los datos necesarios para la resolución del problema de situación. Se contemplarán las posibilidades de acceso a los mismos y su procesado y precisión.

Además, tras este acceso a los sensores de los móviles, deberá ser necesario tratar los datos de modo que puedan ser útiles para el cálculo de la situación. Posteriormente se verá que posibilidades existen de tratamiento de datos.

Otra cuestión importante a resolver es el hecho de que, en cualquiera de los métodos de resolución, explicados en el apartado 1.2, es muy aconsejable o necesaria una primera posición inicial estimada para poder funcionar. Se planteará en este proyecto que el software realice una serie de iteraciones continuas que suplan esta carencia.

Respecto a cada uno de estos métodos, hay que considerar unos aspectos iniciales. El modo de “Cálculo de posición mediante la obtención de la altura y el azimut del Sol”, presenta una ventaja interesante sobre las otras dos y es el simple hecho de que todo el mundo reconoce el Sol durante el día. Sin embargo, no todo el mundo es capaz de reconocer las estrellas más importantes en el firmamento, ni diferenciarlas de los planetas.

Esto presenta la siguiente necesidad: o bien el usuario o bien el software deben reconocer los astros de los que se están tomando los datos. En un primer planteamiento del proyecto, será el usuario el que conozca y elija los nombres de los astros en la aplicación, que ofrecerá una lista de los mismos para que el usuario escoja.

3.2 Sensores

El objetivo principal de este apartado es la explicación de los diferentes sensores que ofrecen la mayoría de dispositivos móviles actuales y la forma de acceder a ellos. En este sentido, *Android* ofrece una serie de funcionalidades que facilitan la labor para ello [31].

3.2.1 Introducción

Antes de comenzar a extraer datos de los sensores de los dispositivos móviles, debemos conocer las herramientas que *Android* nos ofrece.

Los sensores micro electromecánicos (*Microelectromechanical Systems*, MEMS) son sensores contruidos a muy pequeña escala que incorporan en su diseño una parte que se mueve o vibra de forma física. *Android* utiliza estos sensores para medir presión, aceleración, velocidad angular e incluso campos magnéticos. Estos sensores pueden clasificarse en dos tipos.

- Sensores en bruto (*Raw sensors*)

Estos sensores proporcionan datos en crudo que se corresponden con el verdadero comportamiento físico dentro de los mismos. Es decir, estos datos no están procesados de ningún modo, y presentan una variación casi continua, correspondiente a la velocidad de percepción de cambio del sensor en concreto.

- Sensores sintéticos (*Synthetic sensors*)

Proporcionan una capa abstracta entre el código de aplicación y los componentes de bajo nivel del sensor, combinando datos en crudo de varios sensores en bruto o bien modificando los datos en crudo para facilitar su tratamiento o procesado. Suelen proporcionar magnitudes físicas procedentes de dos o más sensores (por ejemplo, la orientación del dispositivo mediante el procesado de acelerómetros, giróscopos y brújulas).

A continuación, la Tabla 3-1 muestra un resumen de los sensores más importantes y más utilizados facilitados por *Android*. Posteriormente, explicaremos con más detalle aquellos que nos interesan.

Sensores en bruto	Datos obtenidos
<i>Sensor.TYPE_AMBIENT_TEMPERATURE</i>	Temperatura ambiente (°C)
<i>Sensor.TYPE_ACCELEROMETER</i>	Aceleración (m/s^2) en 3 ejes
<i>Sensor.TYPE_GYROSCOPE</i>	Velocidad de rotación (rad/s)
<i>Sensor.TYPE_MAGNETIC_FIELD</i>	Corriente magnética (μT) en 3 ejes
<i>Sensor.TYPE_PRESSURE</i>	Presión atmosférica (mbars)
<i>Sensor.TYPE_RELATIVE_HUMIDITY</i>	Humedad relativa (%)
<i>Sensor.TYPE_PROXIMITY</i>	Cercanía a un objeto (cerca/lejos)
<i>Sensor.TYPE_LIGHT</i>	Iluminancia (lx)
Sensores sintéticos	Datos obtenidos
<i>Sensor.TYPE_GRAVITY</i>	Dirección y magnitud gravedad (m/s^2) en 3 ejes
<i>Sensor.TYPE_LINEAR_ACCELERATION</i>	Aceleración sin gravedad (m/s^2)
<i>Sensor.TYPE_ROTATION_VECTOR</i>	Orientación del dispositivo mediante varios sensores

Tabla 3-1 Tabla de sensores a los que se tiene acceso mediante dispositivos *Android*.

3.2.2 Sensor Manager

Sensor Manager es la herramienta proporcionada por *Android* que permite a las aplicaciones acceder a los sensores explicados anteriormente. Esta clase permite registrar y actualizar los cambios relacionados con los sensores, procedentes de lo que se conoce como *Android Sensor API* (*Application Programming Interface*), que consiste en una serie de clases que solicitan y procesan la información del hardware del dispositivo.

Una vez registrada la clase, los valores de los datos se envían a un *SensorEventListener* en la forma de *SensorEvent* que contiene la información ofrecida por un *Sensor* de los vistos anteriormente. La clase *SensorManager* también proporciona métodos de procesamiento de los datos en crudo, como, por ejemplo, la función *SensorManager.getOrientation()* que proporciona la orientación del dispositivo.

No se abordará una explicación detallada del funcionamiento interno de los sensores de los móviles, tales como acelerómetro, giróscopo o brújula. Aún así, para introducir al lector en ellos, se explicarán brevemente sus funciones.

3.2.3 Acelerómetros

El acelerómetro es un aparato que nos permite conocer la aceleración que sufre el dispositivo en los tres ejes del espacio. Su funcionamiento es sencillo: de acuerdo a la fórmula $F=ma$ (la fuerza ejercida sobre un cuerpo provoca una aceleración proporcional a la masa del cuerpo), cualquier fuerza aplicada sobre el móvil provocará una aceleración proporcional. El acelerómetro contiene una pequeña masa dentro de una estructura que permite el contacto con la masa con cierta flexibilidad. De este modo, la fuerza producida provoca un desplazamiento proporcional de la masa del acelerómetro, limitado por su estructura flexible. Este desplazamiento, al ser proporcional, nos permite conocer la fuerza aplicada y, por tanto, la aceleración producida.

Un acelerómetro, en una posición de equilibrio, mide una aceleración de 9.8 m/s^2 aproximadamente, provocada por la fuerza vertical que sostiene el acelerómetro para evitar su descenso producido por la gravedad, como representa la Figura 3-1. Además de la gravedad, el acelerómetro medirá todos los movimientos producidos por fuerzas externas al dispositivo, fruto del movimiento del usuario. Por ejemplo, en la imagen A de esta misma figura, se representa el movimiento de la masa del acelerómetro en estático, que tiene desplazamiento vertical y hacia abajo provocado por la gravedad. En la imagen B, se observa cómo el acelerómetro mide la gravedad y una cierta aceleración hacia la derecha, que desplaza la masa hacia la izquierda. Por último, en la imagen C de la misma figura, se observa un momento de caída libre del acelerómetro, en la que no se tiene medición de ninguna aceleración puesto que el dispositivo está cayendo con una aceleración igual a la de la gravedad.

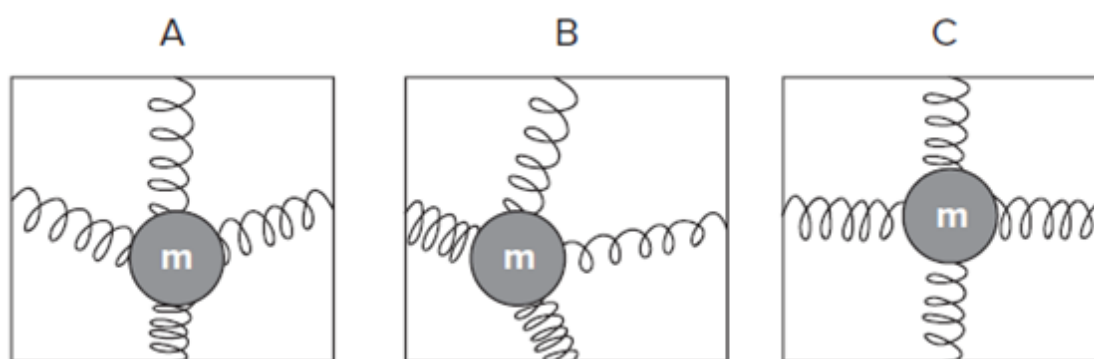


Figura 3-1 Esquema explicativo del funcionamiento de un acelerómetro [31].

Android nos ofrece una serie de tipos de sensores para recoger los datos obtenidos por el acelerómetro, que analizaremos posteriormente

- *Sensor.TYPE_ACCELEROMETER*
- *Sensor.TYPE_GRAVITY*
- *Sensor.TYPE_LINEAR_ACCELERATION*

Además, toma como referencia para el valor de la gravedad los siguientes valores:

- *SensorManager.GRAVITY_EARTH*: 9.80665

- `SensorManager.STANDARD_GRAVITY`: 9.80665

3.2.4 Giróscopos

Los giróscopos se pueden definir, de manera gráfica, como pequeñas masas sostenidas por pequeños muelles, de manera similar a los acelerómetros, pero diseñadas para medir la aceleración de *Coriolis* debida a la rotación. El efecto *Coriolis* es aquel que se observa en un sistema de referencia en rotación cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia. Este efecto consiste en la existencia de una aceleración relativa del cuerpo en dicho sistema en rotación. Esta aceleración es siempre perpendicular al eje de rotación del sistema y a la velocidad del cuerpo.

En el mundo MEMS, y de manera gráfica, los giróscopos funcionan empujando una pequeña masa a un lado y sobre uno de los tres ejes. Cuando el giróscopo rota, la fuerza de *Coriolis* hace que se mueva fuera de ese eje y sobre otro diferente. Este movimiento se percibe eléctricamente, obteniéndose la velocidad angular a la que está rotando respecto a ellos. Por tanto, en una posición estacionaria, un giróscopo mide valor cero. Sin embargo, el giróscopo no mide ángulos directamente, sino que se suelen integrar los datos con respecto al tiempo para obtener los ángulos de variación. Esto suele provocar mucho ruido y desviación del valor real, haciéndolo menos útil cuando se utiliza solo. Como se mencionó anteriormente, se utiliza el tipo de sensor siguiente para acceder a los datos del giróscopo: `Sensor.TYPE_GYROSCOPE`.

Ésta proporciona valores de radianes por segundo sobre los ejes *x*, *y* y *z*, siguiendo el convenio matemático conocido comúnmente como la regla de la mano derecha: si el eje en cuestión apunta hacia el observador, los valores positivos indican rotaciones en sentido contrario al de las agujas del reloj.

3.2.5 Magnetómetros o brújulas

Los sensores magnéticos pueden funcionar tanto por el efecto *Hall* como por la ley de *Lorentz*. No se pretende entrar en detalle en cuanto al funcionamiento interno de cada uno de ellos. Cualquiera que sea el mecanismo, el dispositivo es capaz de obtener el campo magnético en los tres ejes de coordenadas del dispositivo mediante tres sensores independientes y alineados en cada uno de los ejes. Con estos sensores se puede calcular la dirección del norte magnético. También son conocidos más comúnmente como brújulas.

En los propios manuales de *Android* se especifica que, comparado con otros sensores, los campos magnéticos calculados parecen mucho menos precisos y exactos, obteniéndose valores que oscilan varios grados aún encontrándose el dispositivo estacionario. Más tarde, se estudiará si estos sensores podrán darnos precisión suficiente para poder calcular la posición del observador conociendo la altura y el azimut de un solo astro.

El tipo de sensor utilizado para acceder a los valores de los campos magnéticos en los tres ejes es la siguiente: `Sensor.TYPE_MAGNETIC_FIELD`.

3.2.6 Primeras pruebas y conclusiones

Tras unas primeras pruebas con todos los sensores explicados, se obtuvieron valores de diferentes resultados para cada uno de ellos. En general, el acelerómetro, el giróscopo y el magnetómetro proporcionan unos valores en crudo con muchos decimales, pero que varían multitud de veces en menos de un segundo debido al ruido, variando en un rango de $\pm 0.1^\circ \text{ m/s}^2$ en el caso de acelerómetros y giróscopos y varios grados en el caso de la brújula. Esto hace que no podamos, para un momento determinado, obtener unos valores precisos. Los datos necesitarán de un cierto procesado, como veremos en el apartado 3.4. Antes de llegar a explicar este procesado, se planteará la manera de obtener la orientación del dispositivo a partir de estos sensores, y conseguir así los datos que deseamos de los astros.

3.3 Detección de la orientación y del movimiento

En este apartado indagaremos en los sensores inerciales ofrecidos por *Android* [31]. Entendemos el término inercial como la medida de movimiento a partir de sensores internos. Esto se diferencia de los sensores en crudo en tanto que describe lo que el dispositivo está haciendo respecto al entorno y no describiendo simplemente lo que capta de él.

3.3.1 Sistemas de coordenadas

En los manuales de *Android* se describen dos sistemas de coordenadas diferentes necesarios a la hora de calcular orientación y movimiento del dispositivo.

3.3.1.1 Sistema de coordenadas global

Las coordenadas son las siguientes:

- Y_E : Apunta al norte magnético, muy aproximado el norte verdadero, y es paralelo a la superficie de la Tierra.
- X_E : Apunta aproximadamente al este, paralelo a la superficie de la Tierra pero 90° desplazado de Y_E .
- Z_E : Apunta hacia fuera de la Tierra, perpendicularmente a la superficie desde el centro de la misma.

Este sistema de coordenadas se utiliza en todos los sensores y métodos que se refieren a una orientación absoluta con respecto a la Tierra (excepto *sensor.ORIENTATION*, que está obsoleto) y se resumen en la Tabla 3-2.

<i>Sensor.TYPE_ROTATION_VECTOR</i>	Utiliza acelerómetro, magnetómetro y giróscopo para determinar la orientación del dispositivo
<i>getRotationMatrix()</i> <i>getRotationMatrixFromVector()</i> <i>getQuaternionsFromVector()</i>	Obtienen la matriz o el “cuaternión” de rotación que puede transformar el sistema de coordenadas del dispositivo al sistema global de coordenadas
<i>getOrientation()</i>	Utiliza una matriz de rotación del método anterior y proporciona un vector de orientación
<i>getInclination()</i>	Utiliza una matriz de rotación del método <i>getOrientation()</i> y devuelve la declinación magnética (desviación vertical de la brújula respecto al plano horizontal de la Tierra)

Tabla 3-2 Tabla resumen de los sensores que calculan y proporcionan datos relativos a la orientación con respecto a las coordenadas de la Tierra.

3.3.1.2 Sistema de coordenadas del dispositivo

Los sensores inerciales de tres ejes (acelerómetros, magnetómetros y giróscopos) proporcionan valores correspondientes al sistema de coordenadas propio del dispositivo. Por defecto, los dispositivos móviles vienen definidos, cuando se mira la pantalla en modo vertical, de la siguiente manera:

- El eje x es horizontal respecto a la pantalla con valores positivos hacia la derecha.
- El eje y es vertical respecto a la pantalla con valores positivos hacia arriba.
- El eje z es perpendicular a la pantalla y de valor positivo cuando sale de ella en la parte anterior.

Este sistema de coordenadas es fijo para cada dispositivo y no cambia al pasar de modo vertical a modo horizontal. En la mayoría de dispositivos, el centro de los ejes se encuentra en el centro de la pantalla, aunque las APIs Android 2D, por ejemplo, utilizan el origen situado en la esquina superior izquierda de la pantalla.

En la Figura 3-2 vienen representados ambos sistemas de coordenadas.

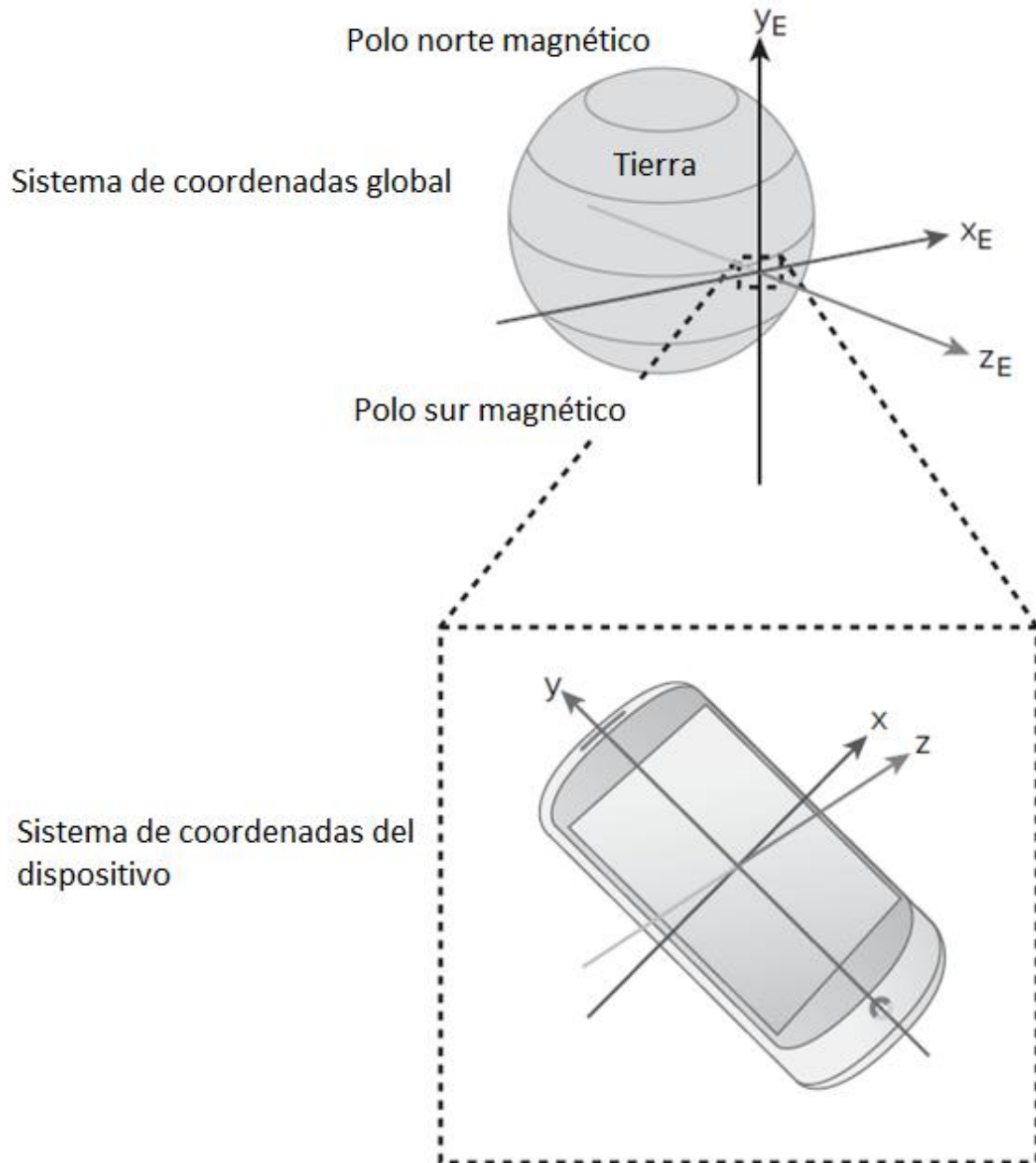


Figura 3-2 Representación de los ejes de coordenadas del sistema global y del dispositivo [31].

3.3.2 Expresión de ángulos de Euler

Para representar la orientación de una plataforma con respecto a las coordenadas terrestres (o respecto a un plano horizontal) se suelen utilizar lo que se conocen como ángulos de *Euler*. Estos ángulos, principalmente en aviación, son conocidos como:

- *Yaw* (guiñada)

Representa el ángulo de giro que realiza el dispositivo respecto a su eje Z , que es aquel que, en su posición inicial, es perpendicular a la plataforma horizontal de referencia (o la Tierra). Debido a que

este ángulo también indica el rumbo respecto al norte que mantiene la plataforma, se le suele llamar también *azimut (azimuth)*. Además, en el ámbito de aviación tiene una traducción como guiñada.

- *Pitch* (cabeceo)

Representa el ángulo de giro que realiza el dispositivo respecto de su eje X. En la posición inicial del dispositivo (apoyado de forma horizontal y con la pantalla hacia arriba) su valor es 0.

- *Roll* (alabeo)

Representa el ángulo de giro que realiza el dispositivo respecto de su eje Y. En la posición inicial del dispositivo su valor también es 0.

Normalmente, para facilitar la comprensión de estos términos, se hace referencia a los movimientos de un avión. En este sentido, y haciendo una semejanza, el avión en su posición normal (horizontal) se correspondería con el dispositivo móvil apoyado en una superficie horizontal con la pantalla hacia arriba. De este modo, el *Yaw* representa el giro del morro hacia la izquierda o a la derecha manteniéndose el avión en posición horizontal. El *Roll* representa el giro alrededor del morro hacia un lado u otro. Por último, el *Pitch* representa la elevación del morro hacia arriba o hacia abajo alrededor del eje que atraviesa las alas. La Figura 3-3 representa gráficamente estos conceptos, que el lector puede asemejar a un dispositivo móvil

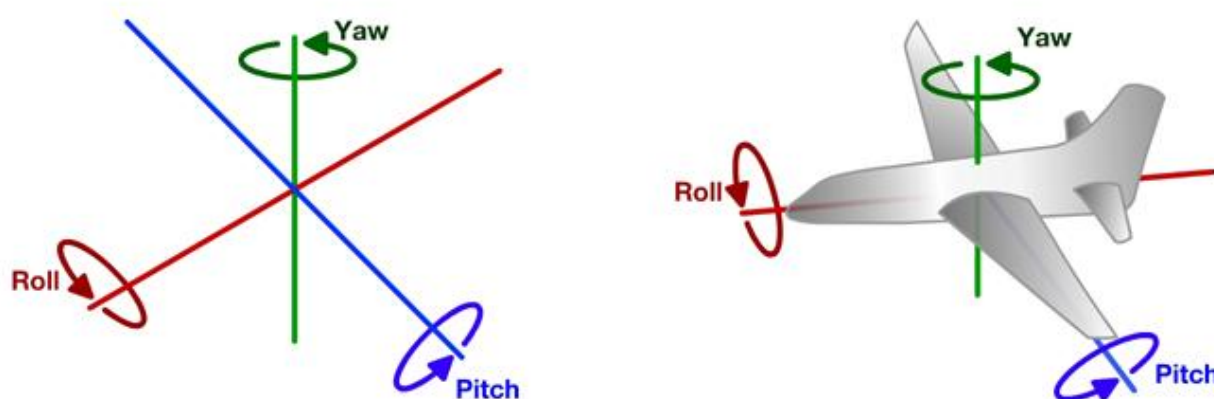


Figura 3-3 Representación de los ángulos *Pitch*, *Roll* y *Yaw*.

3.3.3 Medición de ángulos

La medición de los ángulos sobre los ejes del dispositivo puede darse tanto por vectores tridimensionales, matrices de rotación o “cuaterniones”.

3.3.3.1 Cálculo de ángulos mediante vectores de los datos en crudo

Los ángulos de orientación del dispositivo pueden calcularse directamente a partir de los datos en crudo de los diferentes sensores. Al fin y al cabo, tanto el giróscopo, el acelerómetro y el magnetómetro proporcionan los valores respecto a los tres ejes del dispositivo.

- Acelerómetros

Como vimos anteriormente, los acelerómetros proporcionan los valores de aceleración en los tres ejes explicados. Esto implica que el móvil en estacionario sólo sufriría la aceleración producida por la gravedad. Por ello, con unas sencillas relaciones trigonométricas, se pueden hallar los valores de *Pitch* y *Roll* del dispositivo según los valores proporcionados por el acelerómetro. Sin embargo, al moverse el dispositivo aparecerían nuevas aceleraciones que podrían provocar una incorrecta interpretación de los datos, proporcionando unos ángulos incorrectos. Esto se produciría durante los cortos intervalos de tiempo en que el móvil sufre esa aceleración. Más tarde, se comprobará que no es gran inconveniente.

- Giróscopos

Como se explicó en el apartado 3.2.5, los giróscopos pueden proporcionar, con cierto ruido y desviación, el valor de los ángulos respecto a un punto inicial de partida. Los giróscopos presentan un valor de prácticamente cero en estacionario, lo que implica que, tomando una referencia y con una sencilla fórmula que integre y “sume” las pequeñas variaciones angulares, los giróscopos pueden proporcionar valores angulares.

Sin embargo, en la práctica y tal como mencionan los manuales, esta integración va sufriendo pequeñas desviaciones fruto de las imprecisiones de medida, que provocan a la larga una gran desviación del valor real. Por ello, y al no tener una referencia en estático como los acelerómetros, llega un momento que la posición proporcionada por los giróscopos no es exacta. Sin embargo, proporcionan una respuesta mucho más rápida y exacta a corto plazo que los acelerómetros.

- Magnetómetros

Pueden proporcionar, según los diferentes valores de intensidad en cada uno de los ejes, el valor del norte magnético. Sin embargo, este sensor por sí sólo no puede calcular el azimut al que apunta el dispositivo, ya que necesita una referencia respecto al plano horizontal, que es aquel donde se expresa, por definición, el azimut de la brújula. Por ello, suele ir combinado con los sensores del acelerómetro y/o del giróscopo, de modo que complete la información de *pitch* y *roll* con el valor del azimut. El mayor problema de los magnetómetros es la menor precisión y exactitud de sus valores, además de que, en un principio, sólo proporciona el azimut relativo al norte magnético y no al verdadero.

3.3.3.2 Matrices de rotación (Rotation Matrix)

Android proporciona una serie de funciones que permiten calcular de forma directa la orientación del dispositivo y que han sido explicadas brevemente en la Tabla 3-2.

La función que obtiene esta orientación es *SensorManager.getOrientation()*. En una primera parte, se obtiene una matriz de rotación, que representa el cambio de las coordenadas del dispositivo a las coordenadas globales. Ésta puede obtenerse de dos formas diferentes:

- *getRotationMatrix()*

A partir de los datos del acelerómetro y del magnetómetro (*TYPE_ACCELEROMETER* y *TYPE_MAGNETOMETER*).

- *getRotationMatrixFromVector()*

A partir de los datos proporcionados por *TYPE_ROTATION_VECTOR*, que combina giróscopo, acelerómetro y brújula mediante el método llamado *Sensor Fusion*, que se explicará más adelante.

Posteriormente, para cualquiera de los dos métodos anteriores, se llama a la función *getOrientation()* que proporciona un vector *values* con tres valores:

- *values[0]*=Azimut

Rotación sobre el eje Z. Proporciona valores en radianes de 0, cuando el dispositivo apunta al norte; $\Pi/2$, cuando apunta al este; $-\Pi/2$, cuando apunta al oeste y Π radianes, cuando apunta al sur.

- *values[1]*=Pitch

Rotación sobre el eje X. Su valor también varía entre $\Pi/2$ y $-\Pi/2$, según los ejes de coordenadas definidos en el apartado 3.3.1.

- *values[2]*=Roll

Rotación sobre el eje Y. Su valor también varía entre $\Pi/2$ y $-\Pi/2$, según los ejes de coordenadas definidos en el apartado 3.3.1.

Este tipo de sensor *TYPE_ROTATION_VECTOR* utiliza lo que se conoce como *Sensor Fusion*. Este nombre se le da al proceso de combinar más de un sensor para obtener mejores resultados. Por ejemplo, el acelerómetro responde bien y rápido a los cambios, pero es muy ruidoso. Esto le hace necesitar un filtro que lo hace excesivamente lento para obtener resultados precisos. Por otro lado, los giróscopos, cuando se integran respecto al tiempo, proporcionan una medida angular sin ruido, pero son inútiles cuando funcionan solos, porque la deriva hace que los datos no se correspondan con la orientación real. Sin embargo, un sistema de fusión usa, principalmente, los datos del giróscopo evitando su deriva comparándolo constantemente con el acelerómetro, que no sufre deriva.

3.3.3.3 Cuaterniones

Los “cuaterniones” presentan otra forma de trabajar con ángulos. Estos no vienen explicados en los manuales de programación de *Android* utilizados. Además, los resultados respecto de la utilización de matrices de rotación son bastante similares; por ello, no se contemplarán en el proyecto.

3.4 Exactitud y precisión

3.4.1 Introducción

Para poder evaluar la exactitud y la precisión se necesitan dos valores. El primero es el valor real de lo que se quiere medir y el segundo es el valor medido por el sensor en concreto.

Gran exactitud significa que el valor medido se acerca a la realidad, mientras que alta precisión implica que las diferentes medidas se ajustan de manera muy cercana a un valor en particular. En la Figura 3-4 se pueden observar gráficamente diferentes situaciones que implican mayor o menor exactitud y precisión respecto a una serie de impactos en una diana.

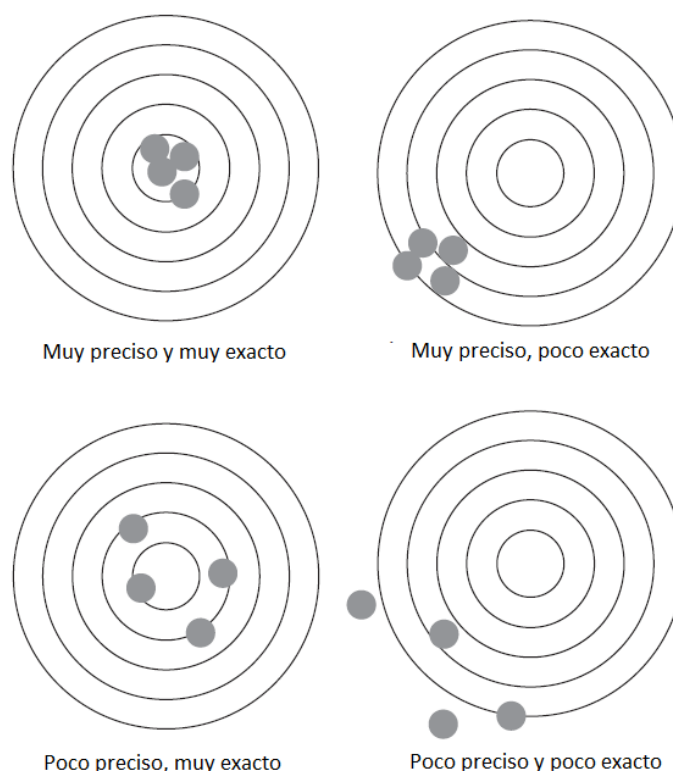


Figura 3-4 Imágenes explicativas de la diferencia entre precisión y exactitud [31].

En los siguientes apartados, se explicarán los diferentes errores y las técnicas para su corrección que aparecen en el manual de programación de *Android* utilizado en este trabajo [31].

3.4.2 Tipos de errores

Cuando se interpretan los datos de los sensores es importante entender los tipos de errores que nos podemos encontrar. Para profundizar más en los diferentes tipos de errores en las observaciones científicas, se recomienda leer el Anexo II. De manera más particular, se explican, a continuación, los errores que se pueden encontrar en los sensores de los dispositivos móviles, aquellos que nos afectarán a la hora de extraer conclusiones.

- Ruido

El ruido es la fluctuación aleatoria del valor de una medida. Aunque el ruido puede clasificarse en diferentes tipos, no es el propósito de este proyecto explicarlos. A efectos prácticos de programación, veremos más adelante cómo pueden usarse diferentes filtros para mitigar los efectos del ruido cuando sea necesario. El ruido es característico, sobre todo, de los acelerómetros y, usualmente, también de los magnetómetros y giróscopos.

- Deriva o desviación

El término de deriva o desviación describe una variación lenta y a largo plazo de los datos calculados por un sensor con respecto de la medición real. Esta deriva se produce debido a las pequeñas degradaciones del valor con el paso del tiempo. También suele ocurrir cuando se integra el valor del sensor, como ocurre con los giróscopos.

- Decalaje² del cero

Cuando la señal del sensor no capta valor cero cuando el valor real es cero, se dice que el sensor no está bien compensado o calibrado. Aunque exista cierto ruido, los valores del sensor deberían estar centrados en el valor exacto al comienzo de la medición, cuando la deriva no ha comenzado a afectar. Por ejemplo, si la media de la medida del acelerómetro cuando el móvil está en una posición estable no es exactamente (0,0,-9.80665) entonces sufre “decalaje”.

- Tiempo de ejecución

Debido a que *Android* no es un sistema operativo de tiempo real, algunas de las medidas pueden estar retrasadas, resultando en tiempos incorrectos. Cuanto el dispositivo está procesando mucha información, aumenta el tiempo de ejecución (*runtime*) y los datos proporcionados pueden sufrir un cierto retraso. Normalmente esto no es importante para la mayoría de aplicaciones, pero es interesante conocerlo.

3.4.3 Técnicas de corrección de errores

En el apartado anterior se explicaron los diferentes errores que se pueden encontrar a la hora de utilizar los datos de los sensores. En la mayoría de los casos, los sensores tienen que lidiar con alguno de estos errores. Los métodos más utilizados son los siguientes:

- Calibración (*Re-zeroing*)

Si existe un “decalaje” con respecto al valor real inicial que afecta a la aplicación, suele ser útil calibrar con respecto al cero verdadero de modo que el sensor sustraiga la diferencia inicial para todas las medidas. Suele facilitarse al usuario un botón para calibrar una aplicación. Por ejemplo, suelen calibrarse aplicaciones que proporcionan orientación situando el dispositivo en una plataforma totalmente horizontal para corregir los valores iniciales. Posteriormente, en el apartado 3.5.4 se explicará con detalle el calibrado utilizado en el proyecto.

² La palabra decalaje no existe en el diccionario de la Real Academia Española. Sin embargo, suele utilizarse en disciplinas como mecánica, aerodinámica, electricidad, electromagnetismo, traumatología u oftalmología. Proviene del francés *décalage* y significa distanciamiento o falta de concordancia entre dos personas o cosas. En el ámbito del trabajo, se pueden utilizar sinónimos como desajuste o desfase.

- *Sensor Fusion*

El *Sensor Fusion*, explicado anteriormente, utiliza varios sensores para hacer uso de las ventajas de cada uno de ellos. En cierta medida, supone una corrección en cuanto que atenúa las debilidades de los diferentes sensores dando una mayor precisión. Las funciones que utilizan los sensores sintéticos, en muchas ocasiones, ayudan a la mejor precisión de los resultados finales.

- Filtros

El uso de filtros es la técnica más utilizada para la corrección de errores. Los filtros suelen clasificarse en filtros paso bajo, paso alto y paso banda, aunque existen muchos otros.

3.4.3.1 Filtros paso bajo (Low pass filtering)

Los filtros de baja frecuencia permiten filtrar cualquier señal de alta frecuencia o ruido y tiene un efecto de allanamiento o alisamiento en la variación de los datos. Aunque los sensores de los móviles están mejorando día a día, en muchos casos necesitan de alguna forma de allanar o hacer una media de sus datos, y ahí es cuando entra en acción el filtrado paso bajo.

Los manuales indican que, si lo único que se quiere es hallar la fuerza de la gravedad en cada uno de los ejes, es aconsejable utilizar *Sensor.TYPE_GRAVITY*. Éste es un sensor sintético que contiene un filtro de baja frecuencia de los datos del acelerómetro. Ha sido optimizado para cada acelerómetro particular de cada móvil. Aún así, los datos pueden seguir siendo demasiado poco estables como para obtener una resolución fiable. Al aplicar un filtro paso bajo sobre los datos de este tipo de sensor, se obtienen unos resultados mucho más estables que con otros sensores, sin que afecte en mayor medida a la lentitud de respuesta.

Existen dos métodos principales de filtrado paso bajo:

- Tasa ponderada de atenuación

Un método sencillo y conocido para implementar un filtro de baja frecuencia es la tasa ponderada de atenuación. Esta tasa da un peso diferente al último valor del sensor y al nuevo. Se utiliza un parámetro (valor ponderado) que se usa normalmente en programación de la siguiente manera:

$$(New\ value) = (Last\ value) + xi * a - (Last\ value) * a \quad (1)$$

Donde *New value* es el nuevo valor obtenido ponderado, *Last value* es el último valor obtenido ponderado y *xi* es el último valor no ponderado obtenido por el sensor. De este modo, al último valor ponderado se le suma el valor proveniente de los sensores multiplicado por la constante de ponderación, *a*, y se le resta el mismo último valor ponderado multiplicado por la misma constante de ponderación.

Otra forma de representar la misma ecuación, de una forma más sencilla para programar, es la que se encuentra a continuación, siendo las variables las mismas que en la anterior:

$$(New\ value) = (Last\ value) * (1 - a) + xi * a \quad (2)$$

De manera general, los manuales de *Android* ajustan la constante de ponderación a 0.01, aunque el filtro puede ser creado por el usuario ajustando la constante según su conveniencia. Parece lógico que el valor de esta constante permanezca entre 0 y 1. El valor *a=1* implicaría que los valores corregidos equivaldrían a los valores procedentes de los sensores, que no se verían afectados por el filtro. Por otro lado, el valor *a=0* implicaría que el valor corregido no se actualizase según los datos del sensor, sino que permanecería constante con el paso del tiempo, siendo inútiles los datos del sensor.

- Media móvil simple (*Simple moving average, SMA*)

Unas pocas líneas extra de código para calcular la media móvil podrían proporcionar una mejor atenuación de las variaciones en los picos de datos. Simplemente encuentra el valor aritmético de los datos más recientes de un flujo de k datos. La k integrada denota el tamaño de la ventana de ponderación. Este método complica el código y su efecto no se aprecia mientras no se han recogido un número k de datos. Para solucionarlo, se pueden proporcionar unos datos aleatorios para los primeros datos de la ventana $k-1$, o bien retrasar el proceso hasta obtener k datos.

A continuación se muestran ejemplos de la utilización de la tasa ponderada de atenuación en la Figura 3-5, y de la utilización de la media móvil simple en la Figura 3-6.

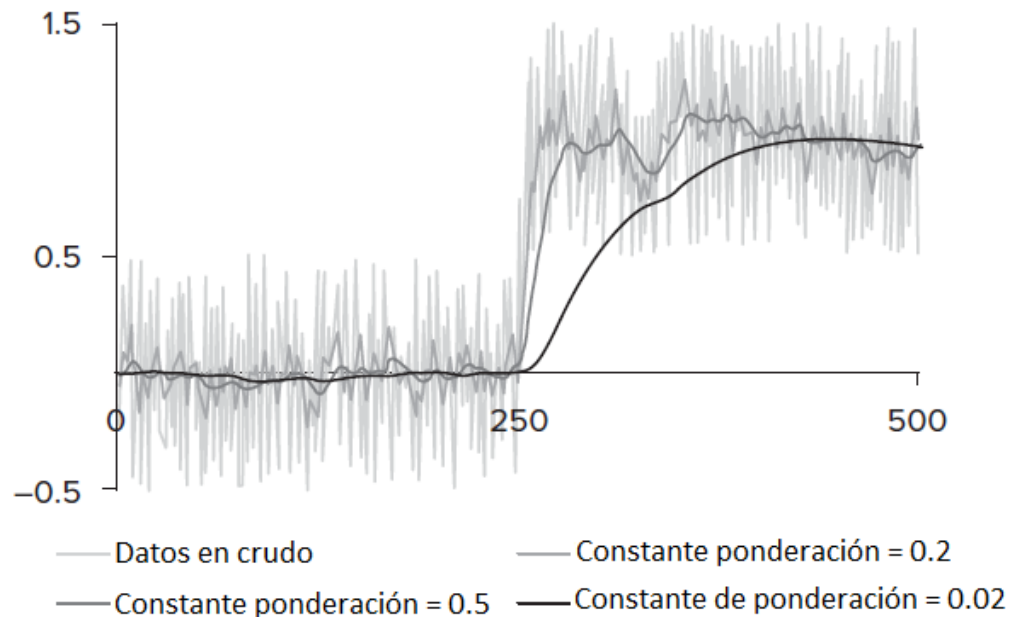


Figura 3-5 Efectos del uso de la tasa ponderada acorde a diferentes valores de la constante de atenuación [31].

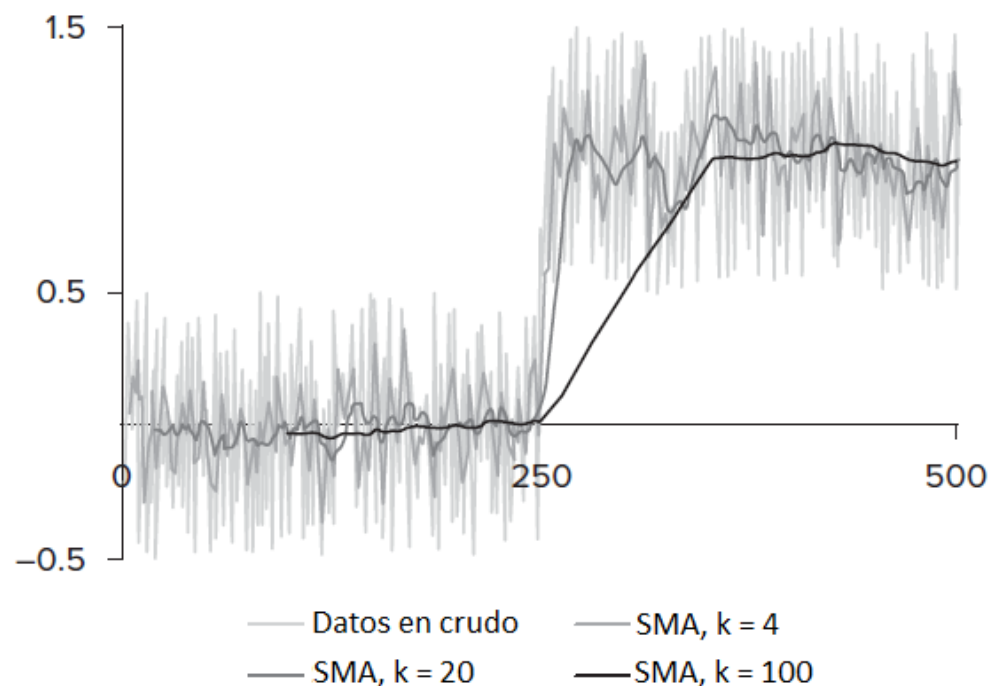


Figura 3-6 Efectos del uso de la media móvil simple acorde a los diferentes valores de k [31]

- Conclusiones

Se puede concluir de la Figura 3-5 que la tasa ponderada tiene un retraso inicial importante, que aumenta considerablemente con la disminución de la constante de operación. Sin embargo, se observa que, para valores que oscilen (debido al ruido) respecto a un punto fijo, los resultados son mejores cuanto menor es esta constante. Los resultados con valores similares a $a=0.02$ pueden proporcionar buenos resultados. Aún así, se debería encontrar una manera de evitar el excesivo retraso de la corrección en los primeros segundos.

En cuanto a la media móvil simple, obtiene buenos resultados con datos centrados en un punto fijo y además, aunque depende de la k , una respuesta más rápida ante cambios bruscos en los valores en crudo. Se puede observar que la corrección a los nuevos valores es lineal, lo que agiliza su corrección. Sin embargo, incluso con una $k=100$, se pueden observar pequeños picos en los valores corregidos que no se encuentran en la primera gráfica. Posteriormente, se analizará qué filtros son los más aconsejables.

3.4.3.2 Filtros paso alto (High pass filtering)

Estos filtros rechazan la deriva lenta y el “decalaje” y mantienen los cambios de alta frecuencia. Un filtro paso alto resta importancia a las pequeñas variaciones y enfatiza los componentes de alta frecuencia. Por ejemplo, el tipo de sensor `Sensor.TYPE_LINEAR_ACCELERATION` permite un filtrado de la componente de la gravedad, transmitiendo por ello únicamente las variaciones de más frecuencia de aceleración en los tres ejes.

Los filtros paso alto son ideales para mejorar los datos proporcionados por los giróscopos. De esta manera, se obtienen con mejor precisión las variaciones bruscas de movimientos, uso principal para el que fueron diseñados los giróscopos.

El modo más simple de crear un filtro paso alto es crear, en un primer paso, un filtro paso bajo y, posteriormente, restar estos a los datos del sensor. A este proceso se le llama filtrado paso bajo inverso. En la Figura 3-7 podemos ver un ejemplo de utilización de este filtro.

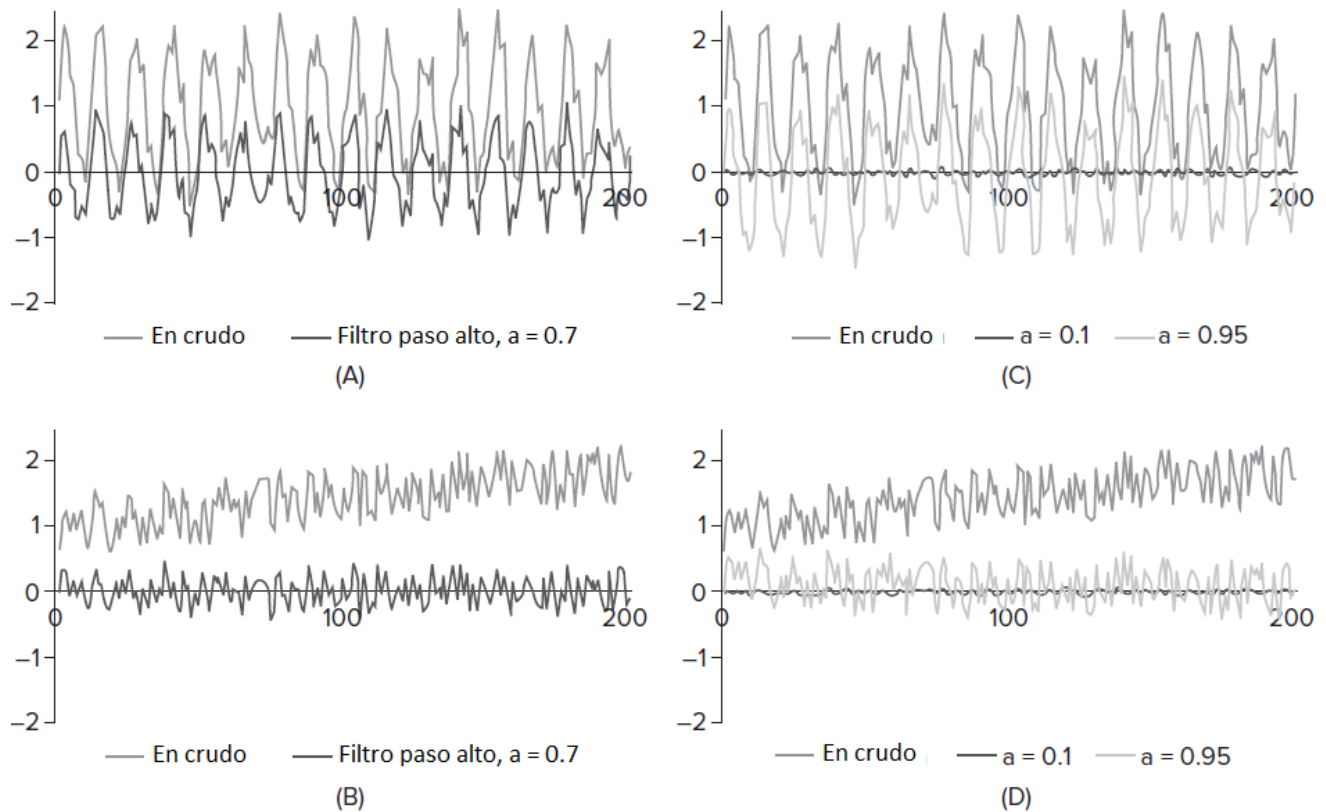


Figura 3-7 Ejemplo de filtrado paso alto [31]

3.4.3.3 Otros filtros

- Filtros paso banda (*Band pass filter*)

Estos filtros rechazan datos de baja y alta frecuencia y mantienen aquellos que están en un rango de frecuencia de interés. Un filtro paso banda es útil para enfatizar en una señal una determinada frecuencia y menospreciar frecuencias más altas o más bajas. No será considerado en este proyecto puesto que no tiene una utilidad directa.

- Filtros *Kalman*

Un filtro *Kalman* puede proporcionar muy buenos resultados de procesamiento de señales, pero es complicado de implementar, incluso los ejemplos más sencillos. Para poder usarse, se necesita conocimiento de las fuentes de los datos. Los algoritmos *Kalman* utilizan datos de medidas de ruido, predicciones de cómo se comporta el valor real y puede incluso que algún conocimiento sobre las fuerzas que causan cambios en el sistema. Con todo ello, puede encontrar una estimación más precisa del valor real que está midiendo el sensor. Estos filtros tienen muchas utilidades, pero se salen de los objetivos de este proyecto y por ello no serán considerados.

3.4.4 Resumen

Teniendo conocimientos de las diferentes formas de obtener la orientación según el apartado 3.3.3, podemos simplificar las diferentes formas de procesado de datos visualizándolas en las figuras 3-8, 3-9, 3-10, 3-11, y 3-12, tal y como vienen reflejadas en el manual de *Android*.

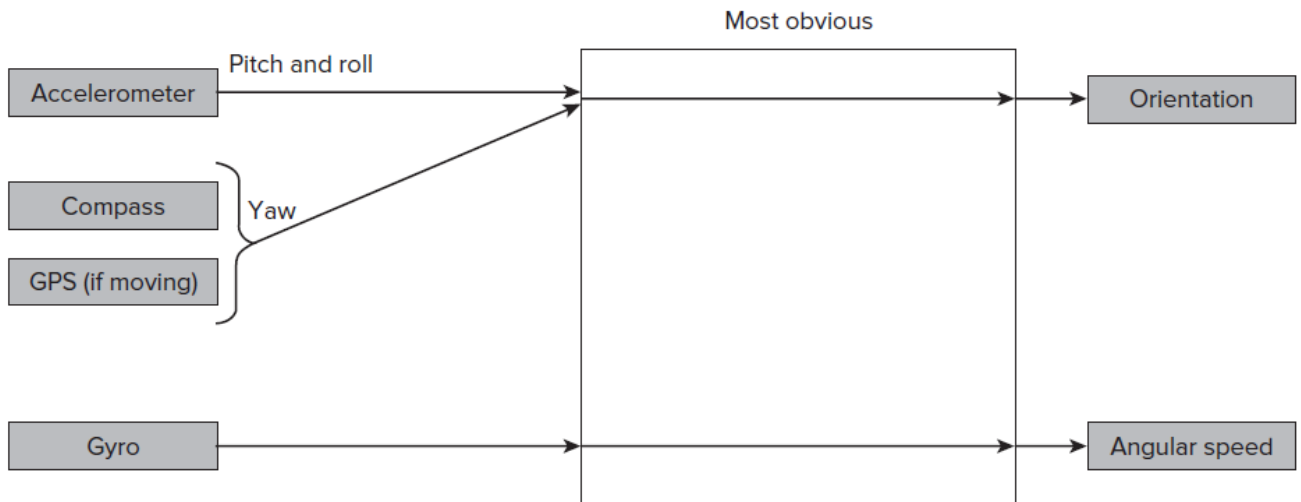


Figura 3-8 Cálculo de la orientación mediante los datos en crudo de los sensores[31].

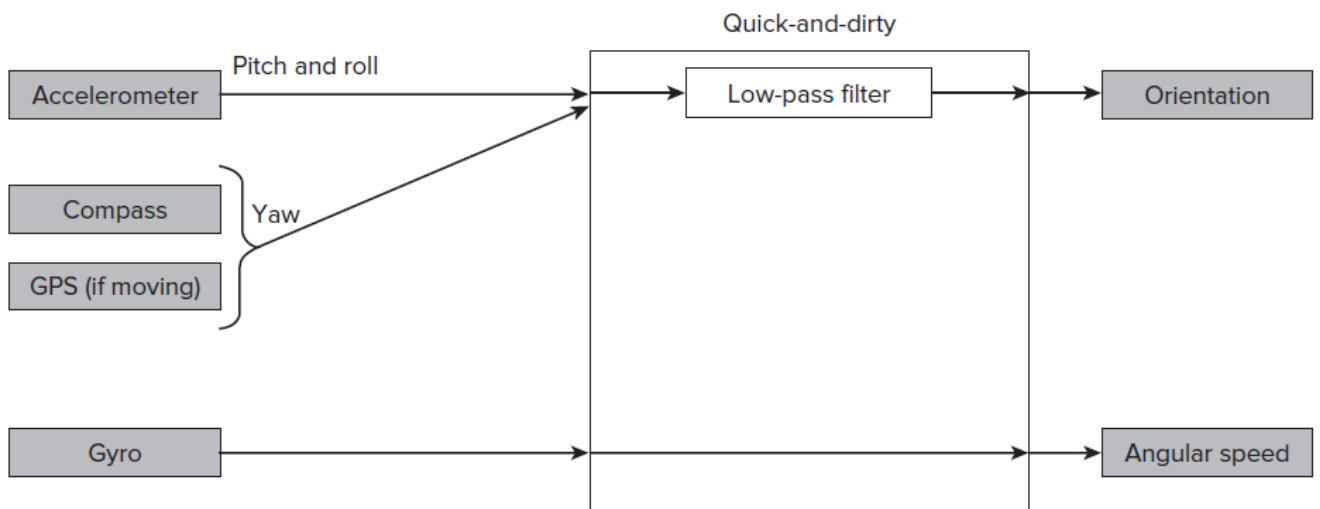


Figura 3-9 Cálculo de la orientación mediante filtrado paso bajo de los datos del acelerómetro y de la brújula[31].

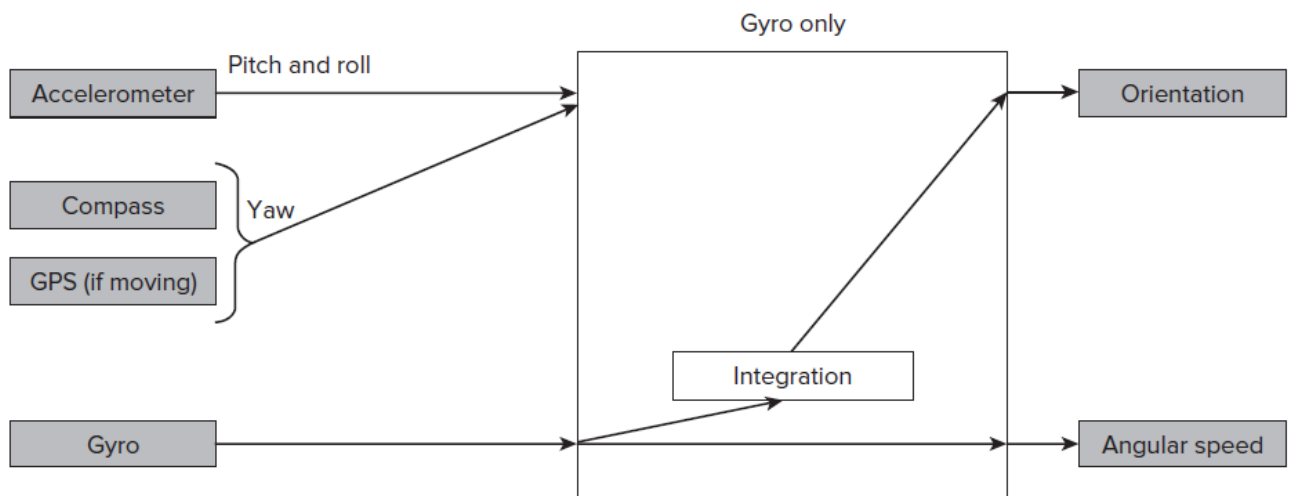


Figura 3-10 Cálculo de la orientación mediante integración de los datos del giróscopo[31].

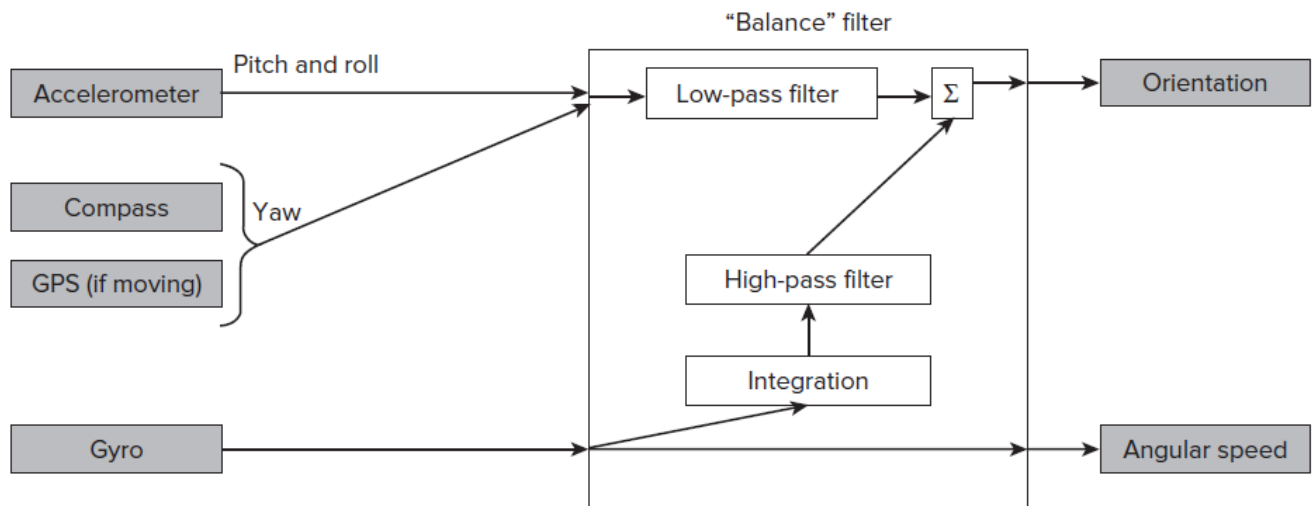


Figura 3-11 Cálculo de la orientación mediante la utilización del *Sensor Fusion*[31].

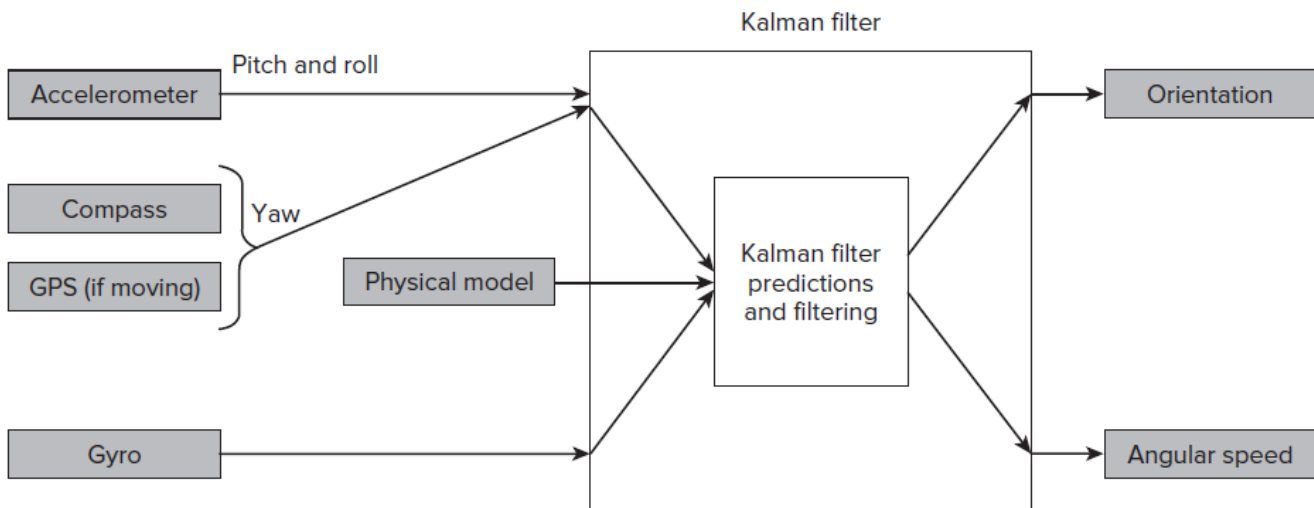


Figura 3-12 Cálculo de la orientación mediante la utilización de filtros *Kalman*[31].

3.5 Cálculos de azimut y altura

A efectos prácticos del proyecto, se quiere obtener la altura y el azimut de los astros del cielo. Por ello, se utilizarán los ángulos de *Euler* explicados anteriormente como referencia. Partiendo de una posición horizontal del móvil, la variación única del *Pitch* o del *Roll* (cuando sólo varía uno de los dos) podría proporcionar el valor semejante a la altura que se desea calcular de un astro, y el azimut obtenido del móvil representaría el azimut del astro que se está observando.

3.5.1 Métodos de obtención de altura

Se han probado varios métodos de obtención de la altura a la que apunta el dispositivo, obteniéndose unas conclusiones explicadas al final de este apartado. A la hora de preparar la obtención de la altura, se decidió representar la aplicación en su modo apaisado (*landscape*), de modo que facilite la interacción con el usuario, aunque podría representarse en su modo retrato (*portrait*) si se quisiese. Posteriormente, se explicarán otros motivos de elección del modo apaisado.

- Uso de los datos en crudo del acelerómetro

Éste es el primer paso que se dio para la obtención de las alturas *Pitch* y *Roll*. En un primer momento, se obtuvieron los datos del acelerómetro, según el sensor *TYPE_ACCELEROMETER*,

comparándose posteriormente con los resultados de *TYPE_GRAVITY*, en el que, como se explicó anteriormente, los datos vienen procesados y filtrados.

De cualquier manera, los datos debieron ser tratados posteriormente con un filtro paso bajo o de baja frecuencia. Entre los dos métodos más sencillos y utilizados de filtrado paso bajo, se escogió trabajar utilizando una tasa de ponderación según el apartado 3.4.3.1 y la Figura 3-5, debido a su simplicidad y su mayor estabilidad ante situaciones estáticas. Para obtener unos datos suficientemente estables, se debió utilizar un parámetro muy pequeño, lo que provoca una ralentización en la actualización de la información muy notable. En la Figura 3-13 se muestra un extracto de una impresión de pantalla de la aplicación realizada con el fin de comparar los datos en crudo de *Sensor.TYPE_GRAVITY* en cada eje (valor superior) y los datos una vez filtrados paso bajo (valor inferior para cada eje). Se comprueba que aunque existan variaciones bruscas debidas al ruido, tras el filtro los datos permanecen más estables y precisos.



Figura 3-13 Aplicación que muestra los datos de *TYPE_GRAVITY* antes y después de su filtrado paso bajo.

Si únicamente se desea obtener la altura utilizando un trípode, esta limitación no es un gran problema, aunque retrasa la toma de datos. Debido a esta ralentización, se añadieron unas líneas adicionales de código que permiten, a variaciones mayores de 0.2° de altura, compensar rápidamente las correcciones obtenidas por los datos en crudo. De este modo, el filtro paso bajo sólo se aplica al mantenerse en una posición prácticamente estable (ya sea trípode o sosteniendo el móvil manualmente).

Estas líneas de código no son útiles para la utilización del método de media móvil. Para obtener buenos resultados, se necesita una constante k alta, lo que provoca un retraso con respecto a los cambios. Sin embargo, empezar de nuevo la ventana con una k alta implica alrededor de un minuto para obtener buenos resultados. Por ello, se descartó este método de filtrado a favor del allanamiento ponderado (*weighted smoothing*).

Tras varias pruebas, se obtienen mejores resultados utilizando *TYPE_GRAVITY*, no sólo por la mayor estabilidad y precisión de los datos, sino porque corrige un “decalaje” que se obtiene al utilizar *TYPE_ACCELEROMETER* en el que, en posición estática horizontal, el sensor obtiene un valor centrado en 9.5 m/s^2 en el eje Z, mientras que los otros dos ejes obtienen valores centrados en 0.

En cuanto al cálculo de los ángulos de *Pitch* y *Roll*, se utilizaron sencillas ecuaciones trigonométricas a partir de los datos de aceleración en los tres ejes, de acuerdo al sistema de coordenadas del dispositivo. Teórica e idealmente, si se consiguiese una perfecta rotación sobre los

ejes X e Y, además de encontrarse el dispositivo en posición perfectamente horizontal respecto a las coordenadas globales, los valores de los ángulos serían los siguientes:

$$AnguloPitch = \text{atan}\left(\frac{ValorAcc(Y)}{ValorAcc(Z)}\right) \quad (3)$$

$$AnguloRoll = \text{atan}\left(\frac{ValorAcc(X)}{ValorAcc(Z)}\right) \quad (4)$$

Siendo:

- *atan*: arco-tangente
- *ValorAcc()*: valor del acelerómetro en un eje determinado
- *AnguloPitch*: Valor en radianes del ángulo que forma el dispositivo sobre el eje X respecto a las coordenadas globales.
- *AnguloRoll*: Valor en radianes del ángulo que forma el dispositivo sobre el eje Y respecto a las coordenadas globales.

De esta forma, se obtienen los valores del *Pitch* y el *Roll* utilizando únicamente los valores del acelerómetro. Sin embargo, existiendo siempre un mínimo giro respecto al plano horizontal tangente a la Tierra y además no siendo perfecta la rotación sobre los ejes X e Y (ya sea manual o con trípode), se corrigen estas pequeñas desviaciones añadiendo el valor del *Pitch* o el *Roll*, según corresponda, al denominador de la ecuación, tal y como se muestra en las ecuaciones (5) y (6).

$$AnguloPitch = \text{atan}\left(\frac{ValorAcc(Y)}{\sqrt{ValorAcc(X)^2 + ValorAcc(Z)^2}}\right) \quad (5)$$

$$AnguloRoll = \text{atan}\left(\frac{ValorAcc(X)}{\sqrt{ValorAcc(Y)^2 + ValorAcc(Z)^2}}\right) \quad (6)$$

- Uso del método *getOrientation()*

Posteriormente, se utilizó el método *getOrientation()* para obtener todos los valores de orientación necesarios para situar el dispositivo de manera completa (*Pitch*, *Roll* y *Azimet*). Este método se probó de dos maneras diferentes, explicadas en el apartado 3.3.3.2. En primer lugar, se utilizaron los sensores *TYPE_ACCELEROMETER* y *TYPE_MAGNETOMETER* y, en segundo lugar, el sensor sintético *TYPE_ROTATION_VECTOR*, siendo considerablemente mejor este último. El motivo principal es la utilización de *Sensor Fusion*, que obtiene una mejor respuesta.

En la Figura 3-14 se puede observar un extracto de una captura de pantalla de la aplicación realizada con el fin de obtener los datos tal y como los proporciona *getOrientation()*.

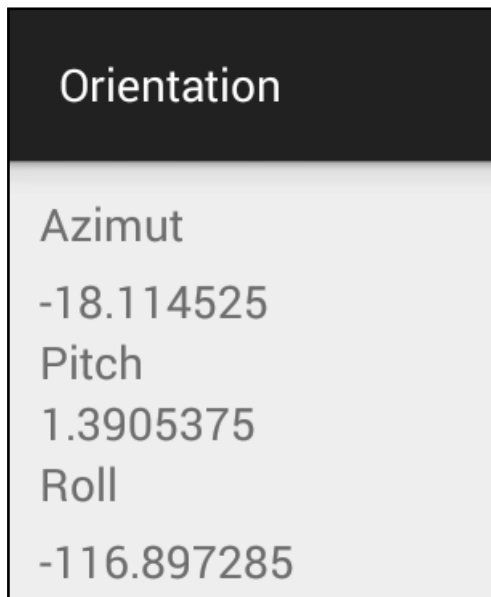


Figura 3-14 Aplicación que muestra los datos obtenidos por la función *getOrientation()*.

- Pruebas con *Sensor Fusion*

También se probó a programar la fusión directa de los sensores. En este sentido, se obtuvo el código que fusiona el acelerómetro, giróscopo y magnetómetro según los manuales de *Android*. Sin embargo, este código viene predeterminado para obtener los resultados más eficientes, y diferentes cambios en las ponderaciones y constantes utilizadas en el mismo no resultaron provechosas. Existen, además, sensores sintéticos que han sido procesados mediante *Sensor Fusion* y, por ello, no mejoraría en nada desarrollar este código en el proyecto.

3.5.2 Métodos de obtención del azimut

Como se explicó en el apartado 3.3.3.1, los magnetómetros no pueden, por sí mismos, proporcionar un ángulo respecto al norte magnético (azimut). Por ello, es necesario obtenerlo de la función *getOrientation()*, de forma que utilice la brújula conjuntamente con otros sensores para obtener la orientación total del dispositivo.

Cuando se empezaron a realizar pruebas con los datos de azimut calculados, se hallaron determinados problemas que podrían afectar al trabajo:

- Precisión de los sensores magnéticos

El principal problema de los datos obtenidos por los sensores magnéticos de los móviles es la poca precisión que, de momento, tienen. Los datos del azimut obtenidos por la función *getOrientation()* varían en valores de uno o dos grados en estático. Esto, en una primera conclusión, nos hace pensar que no se podrá obtener una posición adecuadamente correcta en los métodos de obtención de situación mediante altura y azimut de una estrella o del Sol. Se intentará procesar en la mayor medida posible estos datos y, posteriormente, podremos juzgar los resultados obtenidos a modo de conclusión.

- Norte verdadero y norte magnético

Los sensores magnéticos, valga la redundancia, obtienen el norte magnético, que difiere del norte verdadero, en mayor o menor medida, dependiendo de la posición en la Tierra.

Este norte magnético debe ser corregido para obtener una situación correcta. A diferencia del problema de precisión de la brújula, es necesario solventar este inconveniente para poder resolver el problema de situación utilizando los métodos de uso de una sola altura y un solo azimut. De otro modo, la diferencia de situación sería tan grande que resultaría inservible.

Para mejorar la precisión de la magnitud medida, la clase *android.hardware.GeomagneticField* estima el campo magnético y su dirección en un punto determinado de la Tierra. Se deben aportar los datos de latitud, longitud, altitud y tiempo para poder inicializarla. Esta clase utiliza el Modelo Magnético Mundial (*World Magnetic Model*) producido por la Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial de los Estados Unidos (*United States National Geospatial-Intelligence Agency, NGA*) [32]. Esta clase utiliza el modelo de 2010, válido hasta 2015, aunque proporciona buenos resultados en años posteriores. Futuras versiones de *Android* proporcionarán versiones actualizadas. Con esta clase se podría tener acceso a los siguientes campos:

- *float.getDeclination()*

La declinación es el ángulo entre el norte magnético y el norte verdadero. Esta declinación varía según la zona de la Tierra, aunque se mantiene más o menos estable para zonas de varios kilómetros. Esta declinación podría usarse para corregir el norte magnético proporcionado por los sensores magnéticos del móvil. Con una primera posición estimada, se podría saber la declinación magnética de la zona, que permanece constante aproximadamente en varios kilómetros a la redonda, para calcular así una posición más exacta.

- *float.getFieldStrength()*

Obtiene la intensidad teórica total del campo magnético para una posición dada.

- *float.getHorizontalStrength()*

Obtiene la intensidad del campo magnético en el plano horizontal (plano tangente a la superficie de la Tierra en un punto concreto).

- *float.getInclination()*

Obtiene el ángulo teórico que formaría el campo magnético que atraviesa el dispositivo con respecto al plano horizontal (el horizonte), tanto si apunta hacia arriba como hacia abajo.

- *float.getX(), float.getY(), float.getZ()*

Proporcionan la intensidad del campo magnético que atraviesa el dispositivo según las coordenadas globales de la Tierra.

Todo parece indicar que es necesario corregir la declinación magnética utilizando la función *float.getDeclination()*. Sin embargo, esta función hace necesaria la obtención de una posición estimada para poder transmitir latitud y longitud a la función y así poder obtener la declinación verdadera de la zona. Esta resolución de la situación inicial se plantea en el módulo paralelo de procesamiento de datos, que corregirá la información del azimut cuando ambos módulos se fusionen.

La Figura 3-15 representa los valores de la declinación magnética principal en una zona concreta de la Tierra, acorde a los datos del Modelo Magnético Mundial.

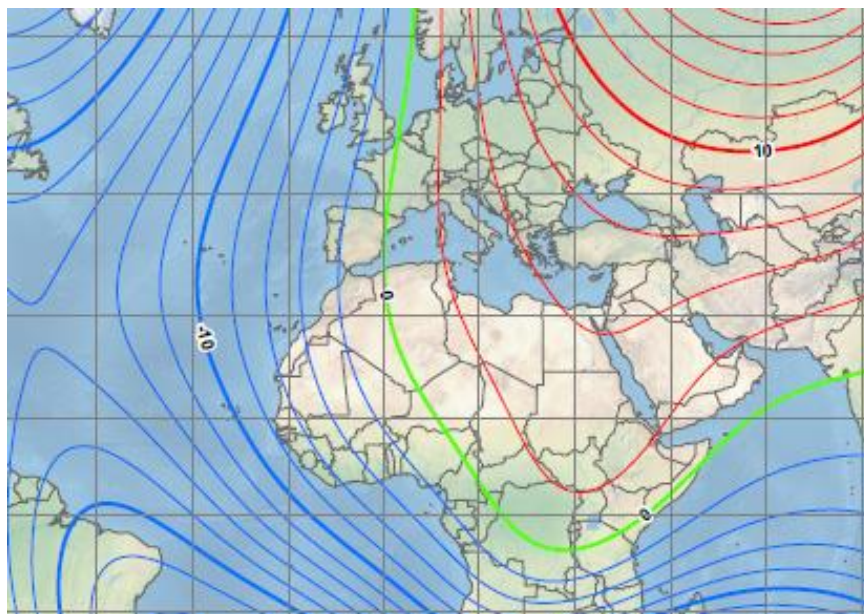


Figura 3-15 Extracto del mapa del Modelo Magnético Mundial Británico-Estadounidense para el año 2015 [32].

- Variación del valor según *Pitch* y *Roll*

Otro problema es que la función *getOrientation()* proporciona, por defecto, la dirección respecto del norte magnético cuando el dispositivo se encuentra en el plano horizontal, siendo el eje Y, según las coordenadas del dispositivo, el eje de cálculo para el azimuth. Por ello, a medida que aumenta el *Pitch* del dispositivo, manteniéndose apuntando al mismo azimuth, los valores obtenidos de la brújula varían considerablemente, ya que el eje Y se desvía del plano horizontal. Sin embargo, los valores obtenidos ante la variación del *Roll*, que, por definición, es el giro sobre el eje Y del dispositivo, permanecen más estables, ya que el eje Y seguirá apuntando al mismo sitio. En resumen, el modo de presentación de los datos, apaisado o retrato, influirá, en mayor o menor medida, en la mayor exactitud de los datos.

Una de las posibles soluciones al uso del móvil en modo vertical es un código sencillo de cambio de coordenadas. Un cambio del eje X del dispositivo por el eje Y podría facilitar esta labor. De este modo, el azimuth se referiría sobre el eje de giro, minimizando la variación del azimuth cuando varía el *Pitch*. Otra solución sería el uso del trípode para, una vez obtenida la altura del astro, hacer volver al dispositivo a una posición horizontal (con la pantalla hacia arriba). De esta manera, se obtendría una mejor exactitud en la obtención del azimuth del astro. El intervalo de tiempo transcurrido durante este cambio de posición afectará mínimamente a los resultados, sobretodo comparado con la diferencia de azimuth ante una variación del *Pitch* o del *Roll*.

- Desvío de la brújula

En estructuras metálicas, como es el caso de los buques, las brújulas magnéticas sufren desviaciones debidas a los campos magnéticos producidos por la propia estructura metálica donde está montada. Todas las brújulas se ven afectadas, en mayor o menor medida, por los campos magnéticos a su alrededor.

En el caso de los dispositivos móviles, estos no afectan por sí mismos a la brújula que tienen en su interior. Sin embargo, el acercamiento a dispositivos electrónicos como ordenadores, tabletas o incluso otros dispositivos móviles sí afectan a la medida del azimuth magnético. Del mismo modo, grandes estructuras férricas pueden afectar también, en mayor o menor medida, a la precisión de los datos. Por ello, durante las pruebas y mediciones, se deben prevenir todas estas características que puedan afectar a los cálculos.

3.5.3 Elección de la altura y el azimut

- Elección del método de cálculo de la altura

Tras varias pruebas realizadas, se obtuvieron dos conclusiones principales:

Para el propósito de este proyecto, la utilización del giróscopo proporciona mucho ruido a las medidas de los ángulos. Aún utilizando filtros sobre los valores obtenidos, los giróscopos siempre proporcionan una oscilación del valor real. Por ejemplo, en la utilización de un giróscopo en estacionario, los valores en cada uno de los ejes deberían ser 0. Sin embargo, puede comprobarse que siempre existen unas pequeñas oscilaciones sobre el valor 0, que no pueden llegar a ser corregidas y que confunden la realidad del movimiento del móvil.

Los giróscopos están diseñados para calcular velocidad angular y su integración para obtener ángulos proporciona una desviación. Aunque proporcionan una mejor respuesta ante los cambios, pierden fácilmente su orientación al pararse y, por tanto, no aportan gran información trabajando en estático.

Por ello, se pretende utilizar sólo el acelerómetro para el cálculo de ángulos, de modo que se trabaje principalmente en estacionario.

Como se dijo anteriormente, el uso de tipo de sensor `TYPE_ROTATION_VECTOR` provoca un mayor ruido en los valores finales, debido a la utilización del giróscopo. Esta deducción nos deja con dos opciones de elección: el cálculo de ángulos mediante la información del acelerómetro, según fórmulas trigonométricas, o la utilización directa del método `getOrientation()` mediante los tipos de sensores `TYPE_ACCELEROMETER` y `TYPE_MAGNETIC_FIELD`. Ambos métodos necesitan de un filtrado de datos, de modo que el ruido se vea minimizado. La prioridad la tiene aquél que pueda proporcionar un valor constante y lo más exacto posible para una posición estacionaria.

En este sentido, aplicando un parámetro a suficientemente pequeño, ambas podrían tener estas características. Sin embargo, el filtrado anterior que realiza el tipo de sensor `Sensor.TYPE_GRAVITY`, proporciona cierta ventaja y permite una mejor estabilidad de los datos sin una espera excesiva para su cálculo.

Después de varias pruebas, se comprueba definitivamente que los valores de *Pitch* y *Roll* obtenidos mediante el cálculo a partir de los datos en crudo del acelerómetro son mejores que los ofrecidos por el método `getOrientation`, independientemente del tipo de sensor que utilice. Además, el filtrado realizado sobre los datos de aceleración en los tres ejes obtenidos del sensor `TYPE_GRAVITY` es mucho más efectivo y preciso que la implementación del filtro sobre los datos del ángulo. En este sentido, cuanto más profundo se realice el filtro (más cercano a la capa de sensores) será más preciso; y si es anterior a la aplicación de fórmulas, evita la pérdida de precisión al redondeo que conllevan los cálculos.

Una vez obtenidas estas conclusiones, se decide aplicar al proyecto la obtención del *Pitch* y el *Roll* (semejantes a la altura en cada uno de los modos vertical y horizontal del móvil, respectivamente) utilizando `TYPE_GRAVITY` y aplicando un filtro paso bajo de método de tasa de ponderación de atenuación con una constante de ponderación $a=0.02$ y aplicando las fórmulas pertinentes descritas anteriormente para su cálculo.

A efectos de cálculo de la altura, en un principio podría realizarse asemejándola o bien al *Pitch* o al *Roll*. En este sentido, según el modo de presentación de la pantalla que se desee, y la forma de utilización que se desea que haga el usuario, se deberá escoger el *Pitch* o el *Roll* para representar la altura del astro. Durante este trabajo se entenderá la elección del modo apaisado de la pantalla para el cálculo de la altura que, en este caso, se corresponde con el valor del *Roll* obtenido.

En la Figura 3-16 se muestra un extracto de captura de pantalla de la aplicación creada para obtener los datos del *Pitch* y del *Roll* haciendo uso únicamente de los datos proporcionados por el acelerómetro.

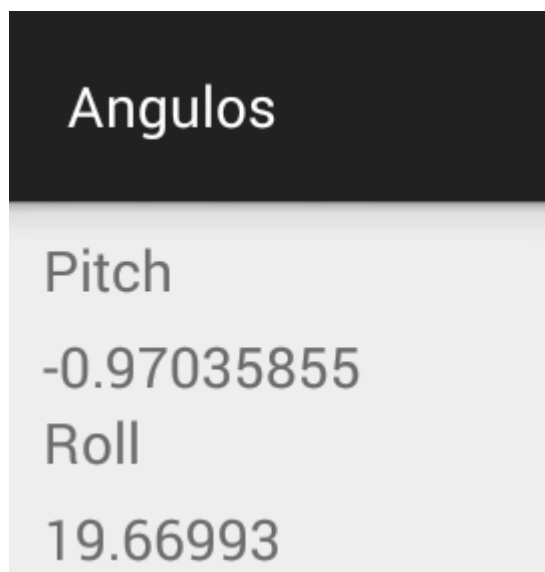


Figura 3-16 Aplicación que muestra el *Pitch* y el *Roll* en base a los datos del acelerómetro.

- Correcciones a realizar a la altura obtenida

En primer lugar, es importante resaltar la referencia horizontal respecto a la cual se toma la altura de un astro. En la navegación astronómica tradicional, el ojo humano detecta un horizonte que se conoce como horizonte visible. Este horizonte depende de la altura sobre el nivel del mar del observador, y no es perpendicular a la Tierra en el punto de observación. Por ello, en los problemas tradicionales de navegación, esta altura obtenida por un sextante mediante el ojo humano, debe corregirse para calcular el horizonte aparente, aquel que es perpendicular y tangente a la superficie de la Tierra en el punto de observación. Para esta corrección, suele utilizarse una tabla que resta una serie de minutos de arco según la altura de la observación respecto del nivel del mar. Posteriormente, se calcula la altura respecto del horizonte verdadero, aquel que es perpendicular a la superficie de la Tierra y que pasa por el centro de la misma. Este horizonte verdadero es el utilizado por la navegación tradicional y, por tanto, por el módulo de procesamiento y presentación para realizar los cálculos de posición. Esta corrección de horizonte aparente a horizonte verdadero se conoce como paralaje. Para aclarar y visualizar mejor estos conceptos se recomienda acudir al Anexo I, donde se explican los tres tipos de horizontes existentes.

En el caso de uso de un acelerómetro, éste proporciona en estacionario los valores de la gravedad. Por ello, los ángulos calculados según las ecuaciones 5 y 6 del apartado 3.3.3.1 se miden según el horizonte aparente, debido a que el vector de la gravedad es siempre perpendicular a la superficie de la Tierra en el punto de observación y con sentido negativo (en dirección al centro de la Tierra). De este modo, el módulo de adquisición no requiere transmitir la altura sobre el nivel del mar de la posición de la observación al módulo de procesamiento y presentación, puesto que calcula la altura del astro respecto del horizonte aparente. En cuanto a la corrección del paralaje (para el cálculo del horizonte verdadero), el módulo de procesamiento se encargará de corregir estos valores según la altura del astro en concreto que se le transmite. Cabe mencionar que el paralaje de las estrellas se desprecia, debido a sus casi nulas variaciones respecto a las alturas (al igual que se desprecia en la navegación astronómica tradicional). Sin embargo, sí se tiene en cuenta la corrección del paralaje en el caso del Sol.

Por otro lado, y además de las correcciones al uso del horizonte de referencia, hay que considerar otras correcciones como la refracción o la corrección por semidiámetro. La corrección por refracción depende de la altura del astro observada, y es considerada también por el módulo de procesamiento y

adquisición. Sin embargo, la corrección por semidiámetro, utilizada tradicionalmente para el Sol en el caso del uso de un sextante, no es necesaria en la utilización de la cámara, puesto que está preparada para apuntar directamente al centro del Sol, tal y como se explicará en el apartado 3.6.2.

En conclusión, el módulo de adquisición transmite al módulo de procesamiento y presentación las alturas relativas al horizonte aparente respecto del punto de observación. No hacen falta correcciones a mayores, puesto que el módulo de procesamiento y presentación de datos se encarga de calcular las correcciones de paralaje en el caso del Sol y de refracción en el caso de estrellas o del Sol.

Otro aspecto a considerar, que no se tiene presente en el módulo de procesamiento y presentación, es el cálculo de los errores para la altura de los planetas, que requiere otras correcciones diferentes. Como línea futura, estas correcciones son fácilmente calculables de acuerdo a las correcciones ya realizadas sobre estrellas y sobre el Sol.

Por último, y para poder calcular la altura de los astros respecto al horizonte, es necesario referir el cambio del *Roll* respecto del horizonte aparente. En un principio, la referencia para el valor de *Roll* de 0 está definida, según las fórmulas (3) y (4) cuando el móvil está en posición horizontal. Sin embargo, se requiere que la altura tenga un valor de 0 cuando la cámara del móvil apunta al horizonte, es decir, cuando el móvil pasa de una posición horizontal a una posición de 90° de *Roll*. De este modo, cuando, posteriormente, se utilice la cámara para apuntar a un astro, los ángulos calculados harán referencia al horizonte. Esto se consigue simplemente restándole el valor obtenido a 90°, según la fórmula (7).

$$AnguloRoll = 90 - \operatorname{atan}\left(\frac{ValorAcc(X)}{\sqrt{ValorAcc(Y)^2 + ValorAcc(Z)^2}}\right) \quad (7)$$

- Cálculo del azimut

Para el cálculo del azimut, y tras varias pruebas realizadas, se escogió el azimut proporcionado por la función *getOrientation()* y el sensor *TYPE_ROTATION_VECTOR*, ya que incluye el proceso *Sensor Fusion* que permite corregir mucho mejor el azimut en las variaciones de *Pitch* y *Roll* que sufre el dispositivo.

En cuanto al cálculo de la declinación magnética, se deja la utilización de la función *getDeclination()* al módulo de procesamiento y presentación de datos, que es capaz de calcular una primera posición inicial utilizando el azimut sin corregir, para, posteriormente, utilizar la declinación de esa posición para corregir el azimut. Tras una serie de iteraciones, el software es capaz de calcular de una manera muy precisa la declinación magnética del observador, y así corregir con mayor exactitud el azimut proporcionado por la función *getOrientation()*.

En cuanto a las variaciones del azimut durante los cambios del *Pitch* y el *Roll*, se escogió el modo apaisado de representación de la aplicación a la hora de tomar los datos de altura y azimut. De esta manera, no solo el dispositivo es más cómodo de sostener por el usuario, sino que minimiza estas pequeñas variaciones debidas al cambio en el *Roll*.

En referencia al desvío sufrido por las estructuras férreas y otros dispositivos electrónicos, se debe advertir al usuario para que evite cualquiera de estos objetos anteriores que puedan afectar e inducir cierto campo magnético sobre el dispositivo móvil.

Aún así, durante la realización de las pruebas y teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se aprecia que el azimut proporcionado por el móvil es poco estable y preciso. Una posibilidad para mejorarlo es utilizar una constante de allanamiento α mucho más pequeña en el filtro que se aplica sobre los datos obtenidos de *getOrientation()*. Sin embargo, esto retrasa enormemente el tiempo de estabilización de los datos presentados, haciendo las pruebas muy lentas e incómodas. Por ello, hay un compromiso entre rapidez y precisión. Entendiendo el funcionamiento de la brújula 3D que posee el móvil, que calcula el azimut según los campos magnéticos terrestres que lo atraviesan, puede deducirse

que la precisión no es fácil que sea la deseada para este proyecto. Incluso algunos manuales de *Android* adelantan futuras mejoras en las brújulas que se utilizan hoy día en los móviles.

En la Figura 3-17 se presenta un esquema explicativo de la obtención de los datos de los diferentes sensores para el cálculo final de la altura y el azimut que se utilizarán en el proyecto.

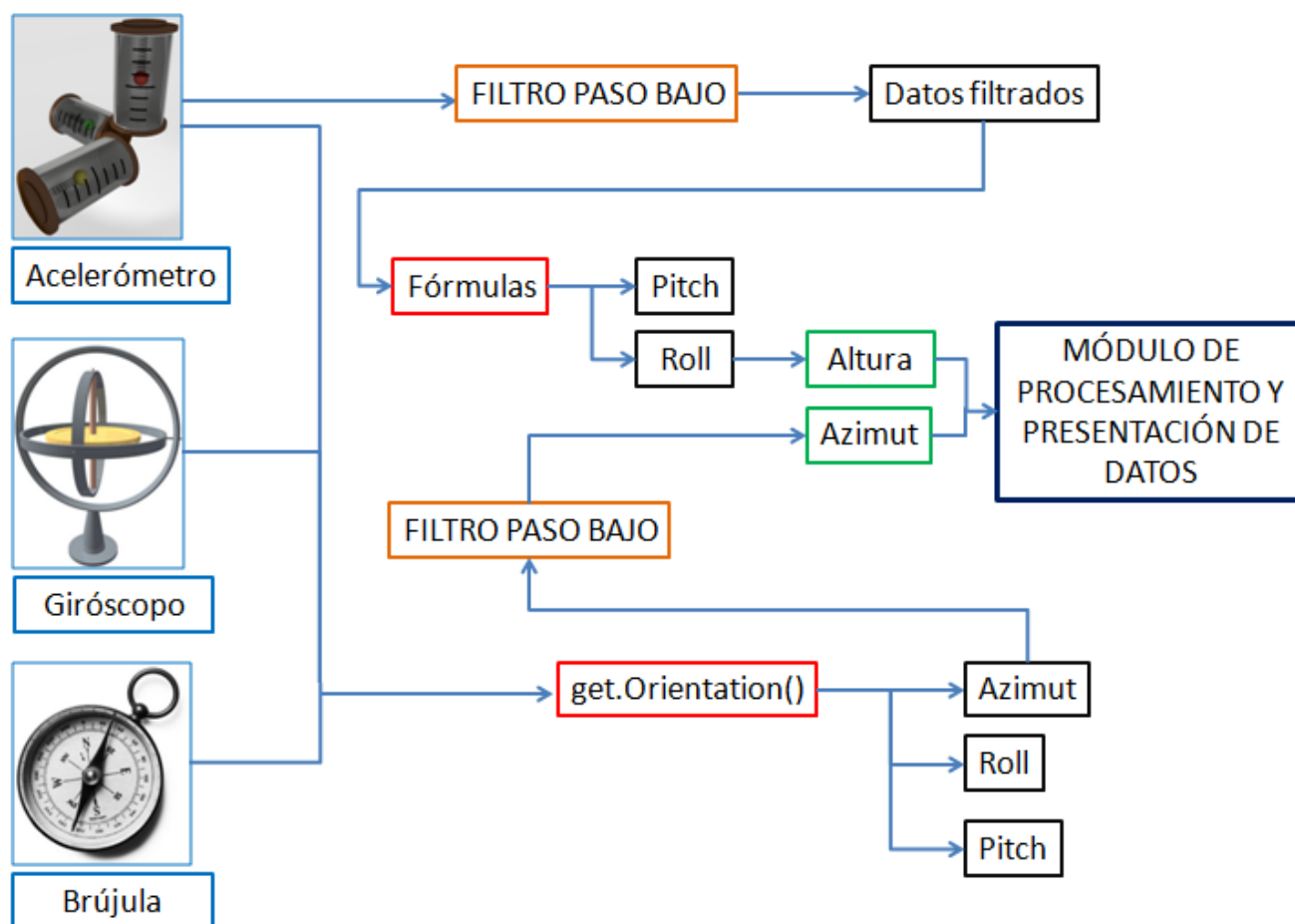


Figura 3-17 Esquema de la obtención de datos de los sensores

3.5.4 Calibrado de los datos del acelerómetro

Después de realizar determinadas pruebas usando el sensor *TYPE_GRAVITY* para el cálculo del *Pitch* y el *Roll*, se comprobó que existía un pequeño “decalaje” en los valores de aceleración en los ejes de medida al apoyar el móvil en una superficie horizontal. En el caso de los ejes Z e Y, este pequeño desajuste es casi inapreciable. Sin embargo, por algún motivo de ajuste interno del acelerómetro, en el eje X este “decalaje” alcanza valores que pueden afectar a la precisión de los ángulos calculados respecto al acelerómetro.

Para detectar este “decalaje”, se hicieron diferentes pruebas con el móvil apoyado en superficies planas horizontales y otras con cierta pendiente. En teoría, en una superficie plana horizontal, los valores de los ejes X e Y debe ser de 0 m/s². Sin embargo, si existiese una cierta pendiente, estos valores tendrían un cierto valor apreciable, negativo o positivo según su posición respecto a la horizontal. Este pequeño valor no implica en sí mismo un desajuste. Si diésemos la vuelta al móvil 180° en una superficie casi horizontal, deberíamos obtener en los ejes X e Y, para cada una de las posiciones contrarias, unos valores de un mismo valor absoluto y de signo contrario.

Por ejemplo, si colocamos el móvil en una superficie horizontal (Figura 3-18), y comparamos los datos del acelerómetro con aquellos obtenidos en la misma posición pero girado 180° (Figura 3-19), podemos comprobar que existe cierto desajuste. Cabe destacar que resultó imposible realizar capturas

de pantalla para mostrar los datos del acelerómetro puesto que, como debe hacer, el acelerómetro percibe la presión de los dedos sobre el dispositivo, variando los valores de las aceleraciones.

En el eje X, ambos valores son negativos (-0.17 y -0.15 aproximadamente), lo que indica que el sensor tiende a restar un valor de 0.16 a todas las medidas obtenidas en ese eje. En el caso del eje Y, se aprecia un mínimo “decalaje” al obtenerse valores de diferente signo y prácticamente iguales.

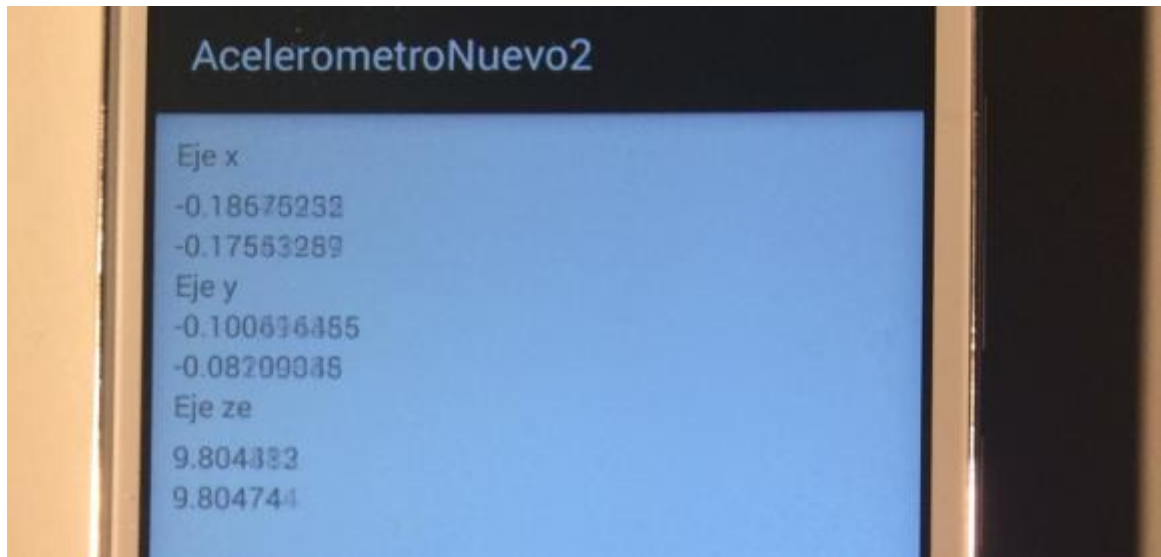


Figura 3-18 Datos del acelerómetro sin calibrar en posición horizontal.

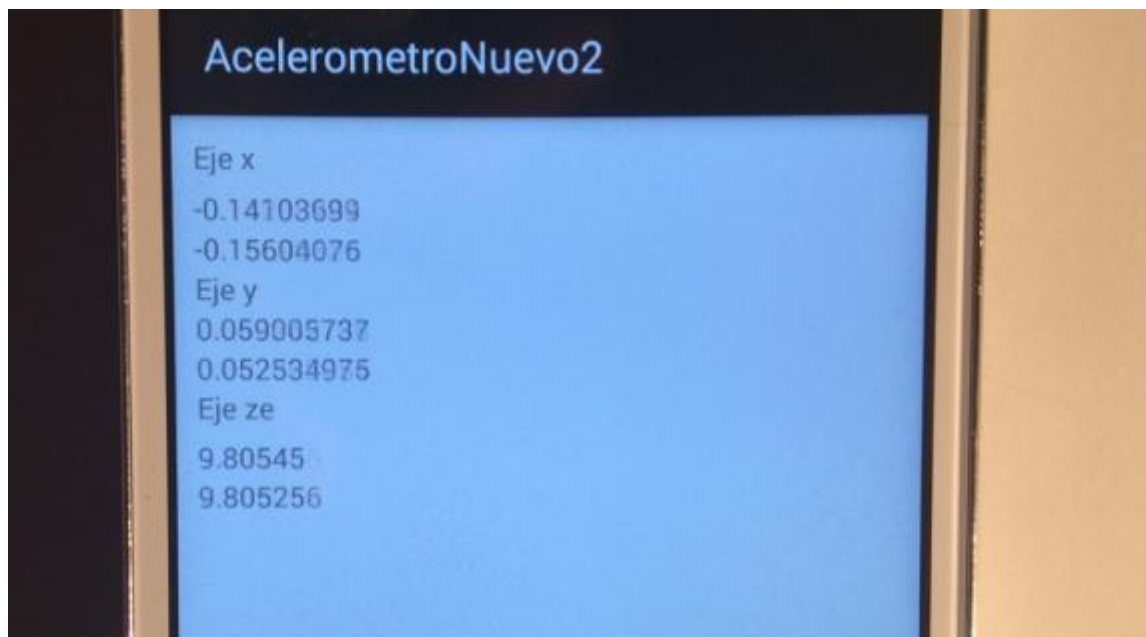


Figura 3-19 Datos del acelerómetro sin calibrar en posición 180° respecto a la Figura 3-18.

Sin embargo, posteriormente al calibrado, se pudo observar que los valores obtenidos en los ejes X e Y son prácticamente iguales y de sentido contrario, debido a que se le ha aplicado una corrección del desfase inicial.

Después de ciertas pruebas, se puede asumir un valor de “decalaje” del eje X de alrededor de -0.16 m/s^2 y en el eje Y de -0.01 m/s^2 . Incluso corrigiendo manualmente estos desfases calculados de manera fija a todos los valores proporcionados por el acelerómetro, el efecto sobre los ángulos es muy pequeño y casi inapreciable. Es decir, con corregir sólo los valores del eje X con un desfase de entre -0.12 y -0.2 , los valores del *Pitch* o del *Roll* no se ven afectados de forma notable. Aún así, siempre será

más exacto facilitar la posibilidad de calibrar los sensores para cada medida. Es importante, sin embargo, que el usuario sepa calibrar de forma correcta, ya que si no, podría estarse corrigiendo un valor erróneo en todas las medidas y provocar que todos los ángulos medidos sean erróneos.

Cabe mencionar que este “decalaje” no afecta sólo a los sensores que utilizan *TYPE_GRAVITY*, sino que también afecta al sensor *TYPE_ROTATION_VECTOR* a la hora de calcular la orientación mediante *getOrientation()*.

A la hora de hacer el calibrado, se ha creado un código que permite calcular los valores de la aceleración en los ejes X e Y en una posición horizontal, y compararlos con los valores obtenidos cuando se gira el móvil 180°. Después de obtener los valores, se hace una media de cada par de valores (en el eje X y en el eje Y, de forma separada). Estos dos valores medios obtenidos, positivos o negativos, son los “decalajes” que, de manera automática, ajusta la aplicación. Para corregirlo, una vez calculados, se deben restar estos valores medios de cada uno de los ejes a los datos que se obtienen en adelante por el acelerómetro.

3.6 Cámaras e interfaces con el usuario

Una vez se pudo extraer la información de los sensores de los móviles para el cálculo de la altura y el azimut hacia el que apunta el dispositivo, se requiere crear una interfaz para que el usuario pueda observar los astros a través del móvil y poder apuntar a un astro para conocer sus valores.

3.6.1 Uso del Preview

Android permite utilizar cierto código para llamar a la aplicación de la cámara del móvil, que tienen implantada, de manera predeterminada, la mayoría de los móviles actualmente. De este modo, se podría crear una aplicación independiente desde la cual se pueda acceder a la cámara tal y como un usuario la ve cuando accede a la aplicación predeterminada. Sin embargo, éste no es el objetivo de este trabajo, sino que se quiere facilitar únicamente la imagen que proporciona la cámara, de modo que se puedan superponer, por encima de la imagen ofrecida por la cámara, otras imágenes alternativas, que veremos posteriormente.

Para ello, se utiliza lo que se conoce como *Preview*. Esta función crea una vista previa de la cámara, a la que puede llamarse e integrar su imagen en una aplicación cuando se desee (por ejemplo, al presionar un botón). Esta función *Preview* utiliza lo que se conoce como *SurfaceHolder* que comunica la cámara con la superficie donde se proyecta la vista previa, llamada *SurfaceView*.

Cabe destacar que, dependiendo de la situación de la cámara y la configuración de la vista previa, puede darse el caso de que la imagen previa de la cámara no esté orientada como queremos. Al fin y al cabo, los móviles reciben una imagen del exterior formada por una matriz de píxeles. Esta matriz, dependiendo del punto de referencia (0,0), proyectará la imagen que se desea u orientada de manera diferente. Por ejemplo, en la Figura 3-20 se puede observar como el centro de referencia (0,0) está situado en la esquina superior derecha, y no en la izquierda como uno podría pensar. En este sentido, cuando se representa una aplicación en apaisado, como es el caso, puede aparecer representada la imagen de la cámara girada 90°. Esto se puede solucionar cambiando los parámetros de la aplicación y fijando la orientación como apaisado.

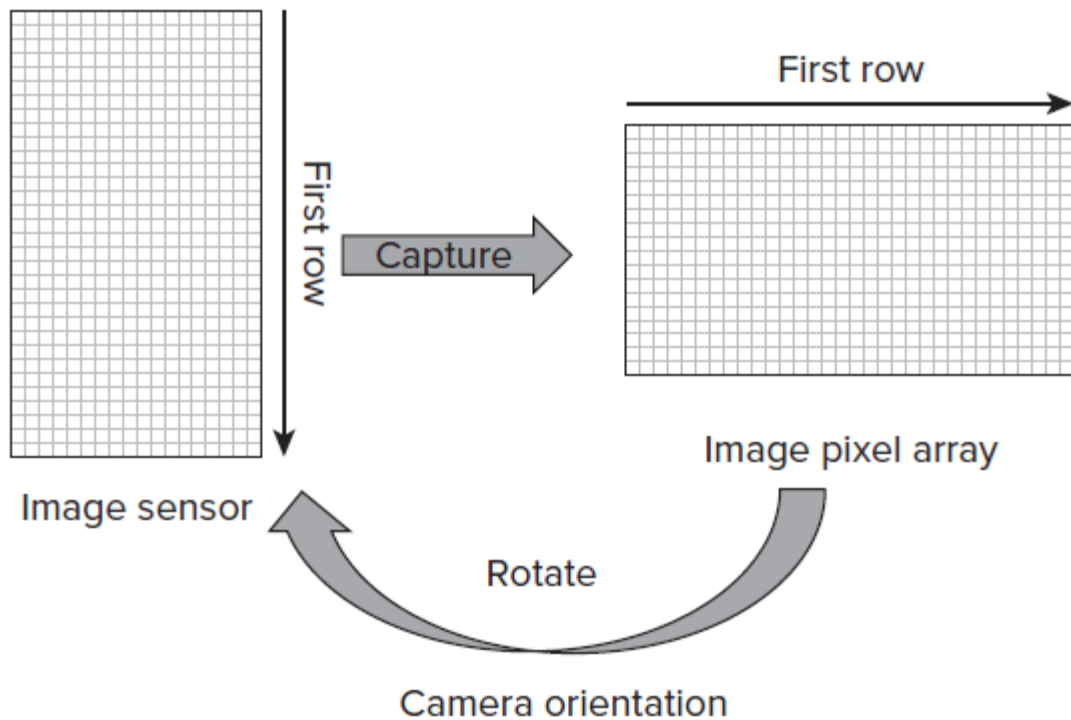


Figura 3-20 Representación de la orientación de la cámara [31].

3.6.2 Creación de la interfaz

Hay que destacar que, cuando se escribe el código correspondiente al uso de la *Preview*, no es posible la interacción con la cámara de ninguna manera. Obviamente, no es factible cambiar la imagen recibida por la cámara del móvil, y únicamente se accede a esta imagen mediante el *SurfaceHolder*. El único modo de poder modificar esta vista previa es poner una imagen transparente por encima de la *SurfaceView* y dibujar sobre ella. De este modo, sin modificar la vista de la cámara, se pueden superponer dos imágenes para dar la sensación de dibujar sobre la vista.

Basándose en este método, ha sido necesario crear una interfaz que facilite al usuario centrar el astro de modo que se obtenga la altura y azimuth precisos. Para ello, se ha dibujado por encima de la vista previa (*SurfaceView*) un puntero en forma de cruz, cuyas líneas son perpendiculares a los bordes de la cámara, de modo que ocupe todo el alto y el ancho de la pantalla y el corte de ambas líneas quede en el centro de la pantalla, tal y como se puede observar en la Figura 3-21.

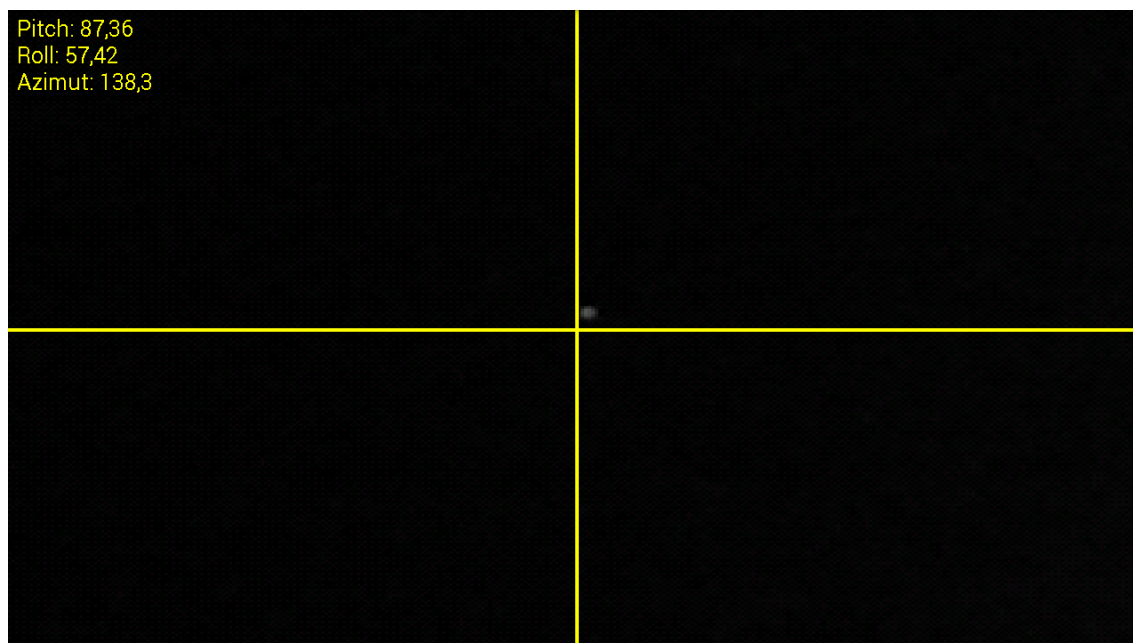


Figura 3-21 Captura de pantalla de la interfaz de la aplicación.

Además, para facilitar la realización de pruebas y la localización de los astros, se incluye en el borde superior izquierdo de la pantalla (en modo apaisado) los valores del *Pitch*, el *Roll* y el *azimut* del punto medio de la pantalla, tal y como aparece en la Figura 3-21.



Figura 3-22 Extracto de la captura de pantalla correspondiente a la Figura 3-21.

3.6.3 Ajuste de parámetros

Android facilita una función que permite modificar algunos parámetros de la cámara, *get.Parameters()*. Estos se utilizarán para facilitar la visión de los astros en la pantalla del móvil, sobre todo por la noche.

- Zoom

La intención en el uso de la cámara es configurar el máximo zoom posible para que se puedan reconocer las estrellas durante la noche. Además, en el caso del Sol, facilita el situar el centro del Sol en el centro de la pantalla con más precisión. *Android* ofrece la función *getZoomRatios()* para variar el zoom de la cámara. Sin embargo, dado que el objetivo es obtener el máximo zoom disponible, se ha hecho uso de *getMaxZoom()*.

- Enfoque

Se puede definir el enfoque como la distancia a la cual la imagen de un objeto se ve lo más nítida posible. Existe la posibilidad de controlar el enfoque, ajustándolo al infinito, a un valor fijo, o a tomas

más de cerca. Conviene ajustar el enfoque de la misma al infinito mediante el uso de *FOCUS_MODE_INFINITY* en los parámetros de la cámara.

- Modo nocturno

Además, para ayudar a localizar astros de noche, conviene también elegir el modo nocturno (el *SCENE_MODE_NIGHT*) de entre una serie de modos de escena (*Scene Mode*) que ofrece *Android*. Este modo predeterminado permite una mejor visualización de las estrellas por la noche.

- Escala de grises

Para finalizar, como última mejora para el uso de la aplicación de noche, se puede ajustar la vista previa para que se reproduzca en escala de grises. De este modo, debido a que no se utiliza la mezcla de los colores rojo, verde y azul para definir exactamente los colores percibidos por la cámara, se consigue un mayor contraste entre los puntos de luz y la parte más oscura de la vista previa. Así, es ligeramente más sencillo poder localizar los pequeños puntos de luz provenientes de las estrellas y que se proyectan sobre la pantalla.

3.7 Cálculo de la hora exacta

Como se mencionó en la introducción de este proyecto, además de la altura y el azimut es necesario transmitir la hora exacta a la que se toman dichas medidas. Para ello, hay que transmitir el tiempo respecto de la hora universal, requisito indispensable para la correcta resolución del problema por parte del módulo de procesamiento y presentación. Para ello, existen ciertas funciones proporcionadas por *Android* para obtener la hora exacta [33].

Principalmente se usa la clase *Calendar*. Esta clase convierte los objetos definidos como *Date* (que representan el instante de tiempo del momento expresado en milisegundos respecto a una fecha de referencia) en años, meses, semanas, días, etc., mediante el uso de *getInstance()*. Además, para obtener la hora universal (UTC, *Coordinated Universal Time*) es necesario completarlo con el siguiente código:

- *getInstance(TimeZone.getTimeZone("UTC"))*

De este modo, se obtiene la hora UTC respecto de la hora establecida por el móvil, según el huso horario. Es decir, es capaz de identificar el huso horario que está utilizando el móvil de manera automática y calcula, a partir del mismo, la hora UTC, restando o sumando las respectivas horas requeridas, sin modificar los minutos y los segundos. Una vez obtenido el tiempo UTC, se pueden obtener las variables de tiempo que se requieran (años, días, horas, etc.). Para hacer posible la resolución del problema por parte del módulo de procesamiento y presentación, se deben transmitir los siguientes:

- Segundos: *get(Calendar.SECOND)*
- Minutos: *get(Calendar.MINUTE)*
- Horas: *get(Calendar.HOUR_OF_DAY)*
- Día del mes: *get(Calendar.DAY_OF_MONTH)*.

Cabe destacar que, en el mes proporcionado por *DAY_OF_MONTH* los valores varían de 0 a 11. Es decir, que para enero devuelve el valor 0, para febrero, el 1 y así sucesivamente. Esto se soluciona sumando el valor 1 a la salida de la función.

- Mes: *get(Calendar.MONTH)*
- Año: *get(Calendar.YEAR)*

Respecto a la hora universal exacta, los móviles suelen tener una hora bastante aproximada a la verdadera, procedente de su conexión a la red telefónica. Incluso si careciese de acceso a la red durante intervalos de tiempo, el móvil sigue manteniendo una hora suficientemente precisa a efectos de este proyecto. La variación de ciertos segundos en la hora es un error despreciable a la hora de calcular la

posición. Sin embargo, si por cualquier motivo el usuario cambiase la hora del dispositivo de manera manual, aunque sea unos pocos minutos, el resultado sobre el cálculo de la posición sería notable. Por ello, es importante que la hora esté bien configurada según el huso horario.

En este sentido, lo ideal es que la aplicación pudiese obtener la hora de manera independiente a la hora que determina el dispositivo que lo ejecuta. Sin embargo, no existe ninguna aplicación a día de hoy que facilite una herramienta como ésta. Al fin y al cabo, la medida del tiempo es mucho más compleja de lo que parece ser. Sólo hay que saber que es el Observatorio de la Marina de San Fernando el encargado de proporcionar una hora oficial a toda España [34]. Para ello, hace uso de un reloj atómico, que se corrige en un segundo periódicamente para hacerlo coincidir con la hora exacta; que es, por supuesto, la astronómica.

3.8 Integración de los dos módulos en la aplicación

Posteriormente a la implementación de los dos módulos diferenciados del proyecto SAGA, se llevó a cabo la integración de ambos en la creación de una aplicación conjunta.

3.8.1 Funcionamiento de *OnTouchEvent*

Sobre el código desarrollado para crear la interfaz de la vista previa de la cámara, se ha utilizado la función *OnTouchEvent* de manera que se pueda obtener a la vez la altura, el azimut y la hora de una observación. Es un método que permite a la aplicación realizar una serie de acciones inmediatamente después de tocar la pantalla. Con este objetivo se pretende que el usuario de la aplicación presione la pantalla cuando considere que el astro que se está utilizando esté en el centro de la misma, lo que facilita su uso.

3.8.2 Creación de una media de datos

Para corregir posibles errores accidentales provocados por los pequeños movimientos de la mano, por pequeñas vibraciones y por la falta de precisión del ojo humano, entre otros, se plantea en este proyecto realizar una serie de mediciones seguidas para obtener una media de datos para un mismo astro y, así, obtener una mayor precisión.

Por ello, se ha programado la interfaz de modo que, para un mismo astro, el usuario presione tres veces la pantalla cuando considere que el astro está en el centro de la misma. De este modo, las pequeñas desviaciones que pueda sufrir la medida se verán en parte corregidas. El número de veces que se pueda presionar la pantalla puede cambiarse. En un principio, parece lógico entender que, a mayor número de medidas, mayor es la exactitud de la media. Sin embargo, hay un compromiso entre la precisión y el tiempo de espera del usuario. Se ha notado que la diferencia entre tomar tres medidas, cinco o más no es realmente notable. Por ello, se ha optado por una serie de tres medidas para cada astro y facilitar la rapidez de resolución procurando obtener una mejor precisión.

Justamente después de presionar por tercera vez la pantalla, se transmiten al módulo de procesamiento y presentación los valores de altura, azimut y hora de la observación de un astro en concreto.

3.8.3 Listado de astros

Anterior a cada medida, se facilita al usuario una lista de los astros más utilizados en cuanto a navegación astronómica. Para facilitar la programación, esta lista incluye el Sol y las estrellas más importantes. De este modo, es el usuario el que elige el astro en cuestión, ya sea para realizar una observación de día (con el Sol) o por la noche (con una o tres estrellas). La elección del astro se considera mejor llevarla a cabo antes de realizar la toma de datos. De este modo, el usuario sabe de antemano qué estrella se va a observar y no da lugar a confusión.

De manera conjunta con el apartado anterior 3.8.2, se transmiten los datos al módulo de adquisición según el esquema representado en la Figura 3-23.

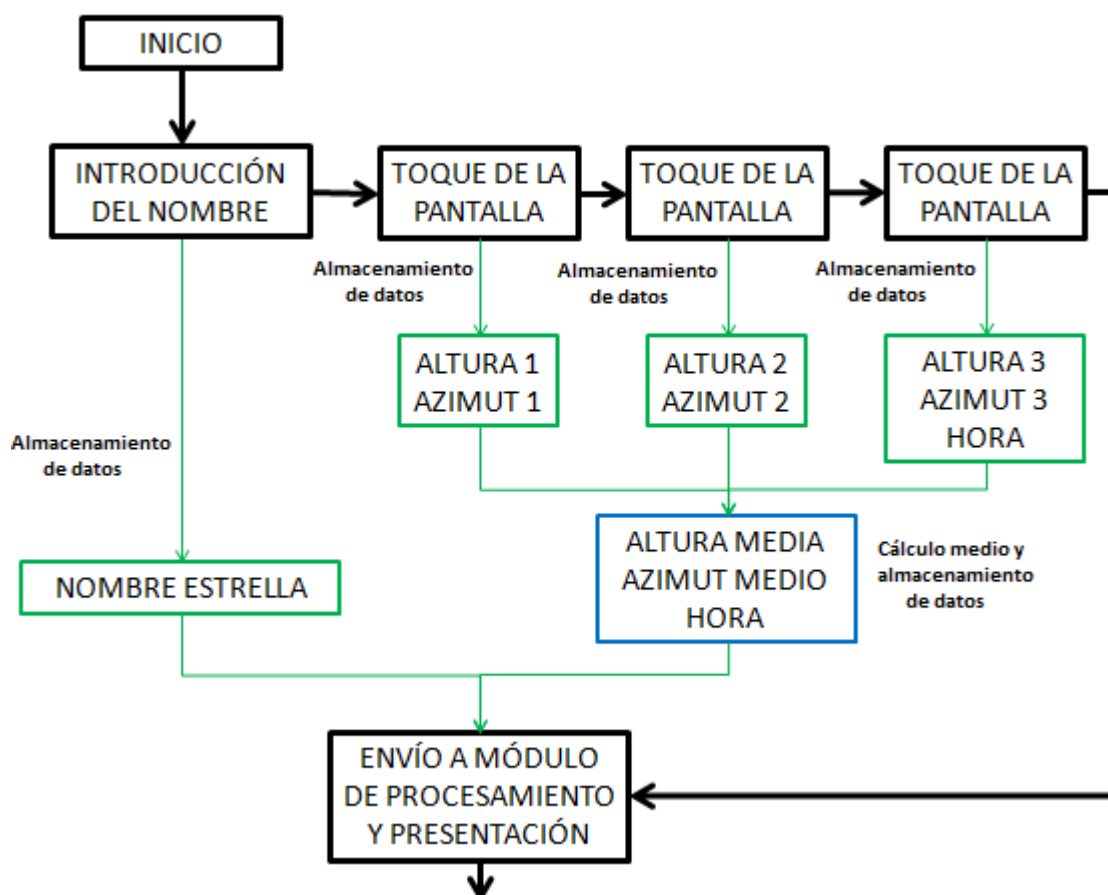


Figura 3-23 Esquema de funcionamiento de adquisición de datos.

Respecto a la hora de observación, debido a que la realización de la media de observaciones trae consigo muchos inconvenientes, se transmite sólo la última hora tomada. Algunos de los inconvenientes son, por ejemplo, que no se puede realizar una media de los datos que, a lo largo del tiempo, oscilan entre 0 y 60, como el caso de los segundos y minutos. Por ejemplo, dos observaciones seguidas a las 22:34:59 y a las 22:35:01, plantearían un problema a la hora de calcular la media. Lo mismo ocurriría al coincidir dos horas diferentes e incluso (poco probable) dos días diferentes. El código para solucionarlo es largo, y las ventajas que se obtienen son mínimas. Suponiendo que el usuario tome cada una de las observaciones con unos pocos segundos de diferencia, esto afectaría de manera inapreciable en la observación, puesto que la variación en altura de un astro en unos segundos es mínima, y coincide, aproximadamente, con la precisión de la obtención de la misma.

3.8.4 Menú

A la hora de la fusión de los dos módulos, por parte del módulo de procesamiento y presentación de datos, se ha desarrollado un menú que facilita al usuario la elección del modo de observación. De manera general, se puede resolver el problema de situación de dos formas.

El primero, llamado Modo Manual, facilita la inscripción de los datos de observación de manera manual. Es decir, el usuario escribe de forma manual los datos de altura, azimuth, hora y nombre del astro en cuestión, datos que haya podido obtener por otros medios (por ejemplo, mediante el uso de un sextante). En este modo, que puede usarse tanto para un astro como para tres, no se utiliza el módulo de adquisición presente en este documento.

El segundo es el Modo Cámara, que obtiene la altura, el azimuth y la hora de observación a través de los datos proporcionados por el presente módulo de adquisición, mediante el uso de los propios

sensores del dispositivo. De la misma manera que el anterior modo, dispone de la opción de la observación de un solo astro o de tres.

Por parte del módulo de adquisición de datos, el código programado viene incluido en las partes señaladas como “Toma de datos” en la Figura 3-24, ya sea para un astro o para tres.

Por último, el menú presenta la opción del calibrado, tras el cual se vuelve al inicio del menú. Este también ha sido programado por el módulo de adquisición de datos, habiendo sido explicado anteriormente. De este modo, y al igual que muchas aplicaciones existentes, se permite el calibrado del acelerómetro siempre que el usuario lo desee.

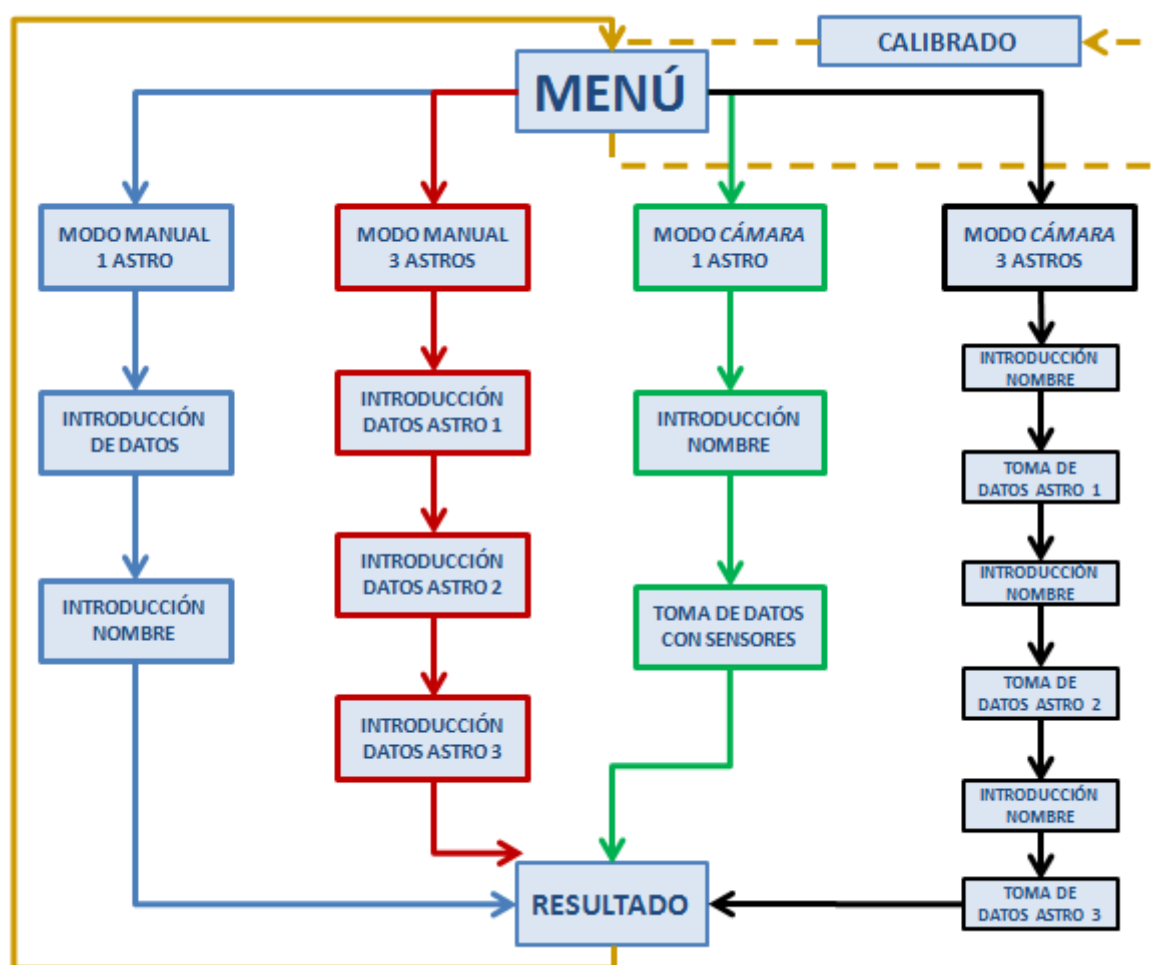


Figura 3-24 Esquema del funcionamiento del menú del SAGA

3.9 Montaje del soporte

Con el objeto de facilitar una mejor estabilidad de los datos proporcionados por los sensores, se ha realizado un montaje de un soporte al que puede acoplarse el dispositivo móvil de modo que pueda adoptar posiciones estáticas.

Este montaje está formado por las siguientes piezas:

- Trípode para cámaras

Este trípode permite trabajar a una altura cómoda con el móvil, de modo que pueda orientarse con facilidad para localizar astros. Además, permite libertad en los movimientos vertical y horizontal (alrededor de todo el horizonte) para orientar el móvil a cualquier estrella del cielo, pudiéndose también fijar una determinada posición para que permanezca estático. El trípode utilizado es el que aparece en la Figura 3-25.



Figura 3-25 Trípode.

- Plataforma de acople de trípode al tornillo

Esta pequeña plataforma se acopla de manera fija al trípode explicado por su parte superior. Cuenta con un roscado al que puede acoplarse un tornillo sin cabeza, tal y como se puede ver en la Figura 3-26.

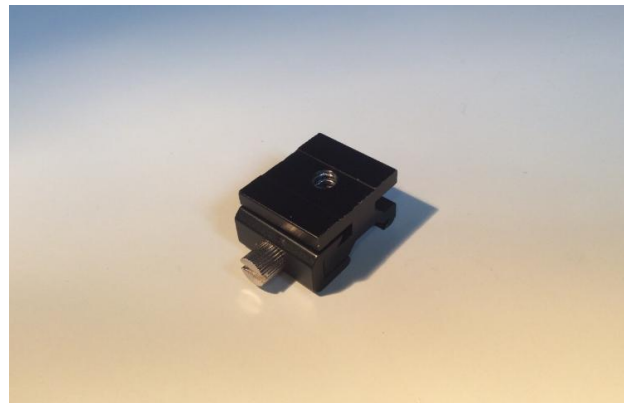


Figura 3-26 Plataforma para trípode.

- Tornillo

Para poder realizar el acople, se pidió al personal del taller de reparaciones de la Escuela Naval Militar un tornillo sin cabeza que pudiese roscarse a la plataforma de acople al trípode.

- Accesorio de trípode para móviles

Para poder sostener el móvil, se hizo uso de una pieza que forma parte de un trípode preparado para uso con móviles. Con la intención de facilitar las pruebas, no se quería hacer uso del trípode para móviles debido a su poca altura. Por ello, se hizo uso del accesorio superior de un trípode para móviles, que cuenta con un roscado que se acopla al tornillo sin cabeza explicado anteriormente. La combinación este accesorio con el tornillo puede verse en la Figura 3-27.



Figura 3-27 Conjunto de tornillo y sujeción para móviles.

De este modo, queda unido el accesorio de trípode para móviles a un trípode de mayores proporciones que facilita una mayor comodidad a la hora de hacer las medidas.

Tras realizar una serie de pruebas, se aprecia una mayor estabilidad de los datos obtenidos del acelerómetro y, por tanto, una mayor estabilidad en la obtención de los ángulos de *Pitch* y *Roll*.

Sin embargo, los resultados no son los mejores en cuanto a la obtención del azimut, puesto que algunas piezas férreas que forman parte del trípode y del accesorio, provocan pequeños campos magnéticos que desvían a la brújula lo suficiente como para proporcionar valores no adecuados para las mediciones. Curiosamente, la brújula se ve afectada notablemente cuando el accesorio de sujeción para móviles se acerca a la parte superior del móvil (a la izquierda según la Figura 3-28) y muy ligeramente y casi inapreciable cuando se encuentra en la parte baja del móvil (derecha según la Figura 3-28).

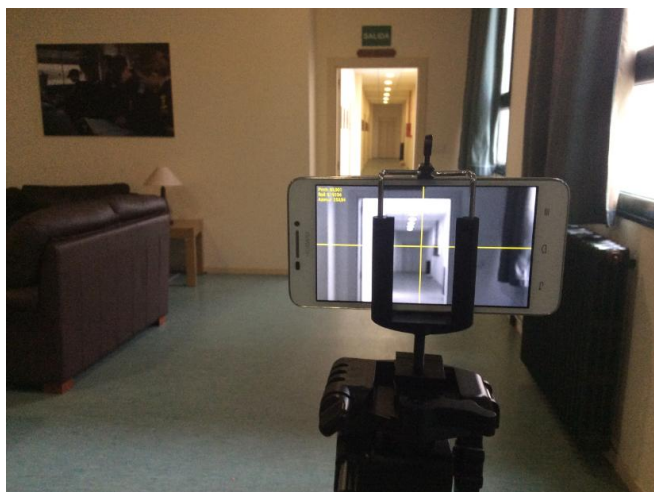


Figura 3-28 Montaje completo del soporte.

Aún así, el uso del trípode no afecta a las medidas realizadas para cálculos de la altura de un astro, sino que proporcionan una mayor precisión y estabilidad a la hora de medirla.

En este sentido, ha permitido un mejor ajuste en las pruebas realizadas para determinar la estabilidad de los sensores con determinados filtros, y comparar diferentes medidas en diferentes posiciones.

4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

4.1 Primeras comparaciones con otras aplicaciones existentes

Con la intención de hacer una primera comprobación de los ángulos de *Pitch*, *Roll* y azimut, se realizaron una serie de pruebas de medición de ángulos respecto a otras aplicaciones existentes, nombradas en el apartado 2.5.1, de modo que se pudiese comprobar el acercamiento a unos valores válidos.

4.1.1 Comparación del *Pitch* y el *Roll*

Respecto a la aplicación *Clinometer*, el módulo de adquisición calcula unos resultados de *Pitch* y *Roll* muy parecidos. En una posición totalmente horizontal, el *Pitch* y el *Roll* proporcionan valores de menos de 1° , y coincidiendo entre ellos en su valor. Además, con la ayuda de una tabla lisa, donde se colocaron dos móviles de forma paralela, se fue cambiando la inclinación de los móviles de forma que se comprobasen sus similitudes. El *Clinometer*, suele variar puntualmente el valor en 0.1° (ya que no proporciona el valor de la centésima), confirmando su precisión de 0.1° . El valor proporcionado por el módulo de adquisición, por otro lado, oscila lentamente en unos valores de aproximadamente $\pm 0.05^\circ$, probando, ligeramente, su mejor precisión. Cabe destacar que ambos tienen la posibilidad de calibrado.

Por otro lado, el *Transportador* presenta unos valores erróneos en una posición casi totalmente horizontal, proporcionando continuamente valores de más de un grado en el *Pitch*. Esto puede deberse al código de programación utilizado, así como a una falta de posibilidad de calibrado. En este sentido, no ha servido de utilidad para una comprobación de los valores correctos.

Por último, respecto a la aplicación *Phone Tester*, también presenta, al igual que el *Transportador*, valores poco coherentes ante una posición estática en una superficie horizontal, tanto en valores del acelerómetro como del *Pitch* y el *Roll*. Todo apunta a que el uso de *TYPE_ACCELEROMETER* y la falta de filtrado y de calibrado son, probablemente, las causas de estos valores erróneos.

En resumen, en cierto sentido se han conseguido igualar e, incluso, superar las características de aplicaciones existentes en cuanto al cálculo del *Pitch* y el *Roll*, siendo lo mejor posible para su utilización en las pruebas.

4.1.2 Comparación del azimut

De manera general, tanto el presente módulo como el resto de aplicaciones explicadas que proporcionan el azimut, obtienen resultados muy parecidos en cuanto al uso de la brújula. Las aplicaciones *Compass*, *Compass Pro*, *MagnetMeter* y *Phone Tester* suelen oscilar, en una posición estacionaria y horizontal, $\pm 1^\circ$ como mínimo. Son todas inestables y poco precisas. Aunque la

aplicación *Phone Tester* proporcione información de la décima de grado, es inútil ante la continua variación del azimut.

Del mismo modo, y debido a la sensibilidad de la brújula del móvil, el módulo de adquisición no consigue una gran precisión a la hora de obtener los datos de azimut. Aunque proporciona muchos decimales, varía algún grado arriba y abajo respecto a un valor.

Sin embargo, como se ha podido comentar anteriormente, lo más perjudicial del cálculo de azimut no es tanto su precisión, como su exactitud. Basta probar, con cualquiera de las aplicaciones anteriormente mencionadas, a girar 180° la orientación del móvil, para observar que el valor del azimut no varía 180° exactamente, sino que puede variar hasta varios grados. Curiosamente, la mayoría de ellos poseen mayor exactitud en direcciones cercanas al norte, y muy mala en direcciones cercanas al sur, siendo la explicación de este fenómeno todavía desconocida.

4.2 Comparación de la altura con sextante

Una vez que se tiene cierta certeza de una buena exactitud y precisión de la altura proporcionada, se dispuso a compararla con la medición de un sextante.

Cuando la posición del Sol, y la meteorología, permitieron la utilización del horizonte en dirección de la boca de la Ría de Pontevedra, se realizaron una serie de medidas de la altura del Sol por parte del sextante y del SAGA. Paralelamente, cada una de estas mediciones tuvo que ser realizada exactamente en el mismo momento, de modo que la altura precisa en ese momento fuese la misma. El sextante fue proporcionado por la Escuela Naval Militar, y puede verse en la Figura 4-1.



Figura 4-1 Sextante utilizado para la realización de pruebas

En el cálculo de la altura con el sextante, tuvo que tenerse en cuenta la corrección de índice (error inherente al sextante y que puede ser fácilmente calculado), la corrección por depresión del horizonte (dependiente de la altura de observación) y la corrección por semidiámetro del Sol (ya que el sextante toma la altura del limbo inferior del Sol). Para ninguna de las dos medidas se tuvo en cuenta la corrección por paralaje ni la corrección por refracción, ya que afectan de la misma manera al ojo humano que a la cámara.

Los resultados ofrecieron una tendencia similar de descenso de la altura del Sol respecto al tiempo. Sin embargo, se encontró un desvío de varios minutos entre las dos medidas. Este desvío permanece más o menos constante en el tiempo, lo que hace pensar que pueda ser fruto de errores sistemáticos.

Estos errores pueden ser provocados por pequeños errores de calibración, pequeños errores en la corrección de índice del sextante (u otras imperfecciones que pueda tener), y de manera general de los datos ofrecidos por el sensor del móvil que, al fin y al cabo, no están diseñados para esta exactitud.

En cuanto a los errores accidentales, se comprueba que, incluso con la realización de más pruebas y la consiguiente corrección de errores sistemáticos, el sistema todavía puede contener hasta 12 millas de errores accidentales.

El resumen de los resultados se encuentra en la Tabla 4-1, mientras que la Figura 4-2 representa una gráfica que compara la evolución de las alturas tomadas (en grados) respecto a los minutos referentes a la hora de la observación. Como se puede comprobar, el sextante tiene una mayor linealidad, debido a su mayor estabilidad frente a errores accidentales. Los errores accidentales en el uso del móvil (alrededor de 0.2°), pueden proceder del ruido remanente en el sensor, que puede provocar en ocasiones casi 0.1° de desvío. Además, factores como el viento o pequeñas vibraciones pueden afectar también al acelerómetro, desviándose más de lo habitual.

Esta comparación con las medidas del sextante no puede tomarse como referencia principal, ya que depende del observador que lo utilice. Se parte de la base de que las mediciones con sextante están sujetas también a errores accidentales y sistemáticos. Una mala estimación de la altura de observación o una mala alineación del limbo del Sol con el horizonte son determinantes a la hora de tomar medidas exactas.

Hora (UTC)	17:33:30	17:34:20	17:36:05	17:36:55	17:38:06	17:39:50	17:41:28	17:42:11
Altura instrumental sextante	9°0,6'	8°53'	8°34'	8°26,3'	8°15,3'	7°54'	7°39'	7°30,3'
Corrección de índice (-)	15'	15'	15'	15'	15'	15'	15'	15'
Corrección por depresión del horizonte (-) *	3,1'	3,1'	3,1'	3,1'	3,1'	3,1'	3,1'	3,1'
Corrección por semidiámetro del Sol (16,1')	16,1'	16,1'	16,1'	16,1'	16,1'	16,1'	16,1'	16,1'
Altura final sextante	8°59,6'	8°51'	8°32'	8°24,3'	8°13,3'	7°49'	7°37'	7°28,3'
Altura módulo adquisición	8°23,4'	8°18'	8°12'	8°9'	8°0'	7°33'	7°15'	7°01'
Diferencia de alturas (minutos)	36,2	33	20	15,3	13,3	16	22	27,3
Media de errores sistemáticos (minutos)	22,8875	22,8875	22,8875	22,8875	22,8875	22,8875	22,8875	22,8875
Media de errores sistemáticos (grados)	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Errores accidentales puntuales (minutos)	13,3125	10,1125	-2,8875	-7,5875	-9,5875	-6,8875	-0,8875	4,4125
Errores accidentales puntuales (grados)	0,2218	0,1685	-0,048	-0,1264	-0,1598	-0,1147	-0,0148	0,0735
Precisión aproximada (minutos)	12							
Precisión aproximada (grados)	0,2							
Desvío aproximado (millas náuticas)	12							
*Altura sobre el nivel del mar: 3m.								

Tabla 4-1 Comparación de las pruebas de cálculo de alturas entre el sextante y el módulo de adquisición.

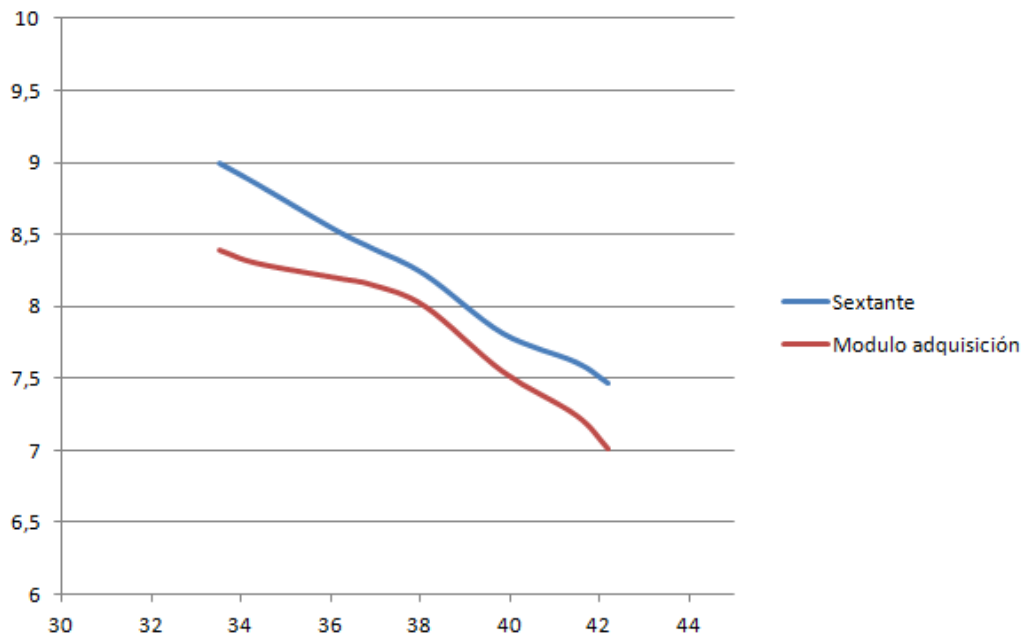


Figura 4-2 Gráfica de evolución de las alturas tomadas en grados (eje vertical) respecto al tiempo en minutos (eje horizontal).

4.3 Comparación de la altura con programa *Navigator*

Posteriormente a las pruebas realizadas con el sextante, se propuso comparar con un sistema que permitiese una mayor exactitud de los datos de las alturas. El programa utilizado se llama *Navigator* y permite una visualización en pantalla del cielo aparente en cualquier posición del mundo; es decir, muestra un mapa de los astros tal y como los ve el observador.

Se diseñó una aplicación que permitiese realizar la media de muchas medidas en un corto periodo de tiempo, cercano al comienzo de cada minuto. Con ello, se pretendían minimizar al máximo los errores accidentales, y poder así comprobar la exactitud de las medidas. Además, las pruebas se realizaron en una zona refugiada de vientos, y se realizó un minucioso calibrado de los sensores.

Los resultados fueron notablemente mejores, como puede comprobarse en la Tabla 4-2 y en la Figura 4-3. No se requirió de ninguna corrección, puesto que las medidas fueron tomadas al centro del Sol y, además, el *Navigator* ofrece una perspectiva del cielo tal y como la ve el observador. Aunque todavía se localizan ciertos desvíos provocados por los errores accidentales, principalmente el ruido del acelerómetro, se puede observar una mayor linealidad en la gráfica, además de una buena exactitud.

Altura Nav. (°)	Altura módulo	Hora	Minuto	Errores accidentales (°)	Errores accidentales (')
13,36666667	13,32	17	9	0,046666667	2,8
13,20833333	13,16	17	10	0,048333333	2,9
13,03333333	13,03	17	11	0,003333333	0,2
12,86666667	12,91	17	12	-0,043333333	-2,6
12,68333333	12,67	17	13	0,013333333	0,8
12,53333333	12,41	17	14	0,123333333	7,4
12,35	12,25	17	15	0,1	6
12,18333333	12,18	17	16	0,003333333	0,2
12,01666667	12	17	17	0,016666667	1
11,83333333	11,87	17	18	-0,036666667	-2,2
11,65833333	11,81	17	19	-0,151666667	-9,1
11,48333333	11,5	17	20	-0,016666667	-1
11,13333333	11,3	17	22	-0,166666667	-10

Tabla 4-2 Comparación de las pruebas de cálculo de altura entre el *Navigator* y el módulo de adquisición.

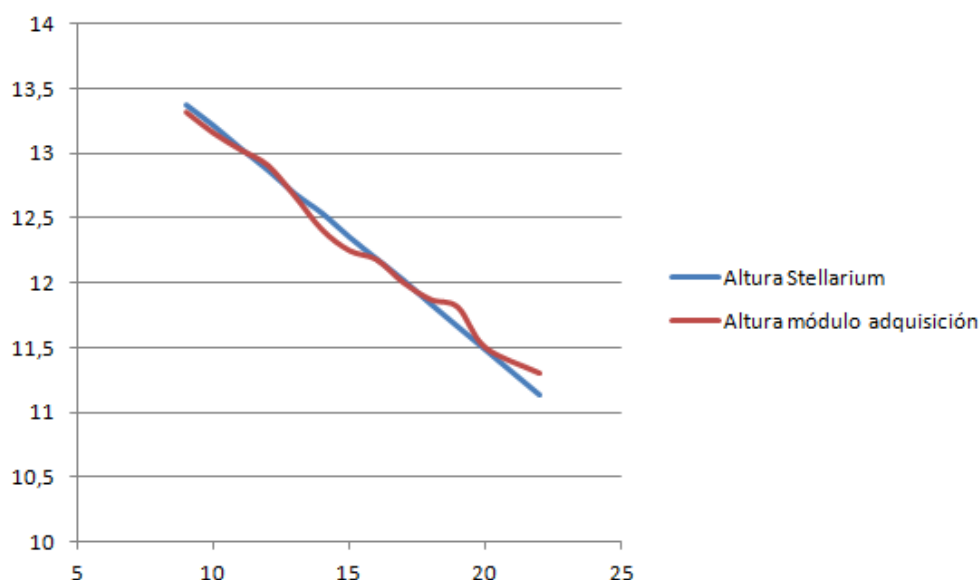


Figura 4-3 Gráfica de evolución de las alturas tomadas en grados (eje vertical) respecto al tiempo en minutos (eje horizontal).

Como se puede comprobar, tomando las medidas correctas de calibración, posición y utilización, el sistema de adquisición de altura proporciona una medida muy exacta y con una precisión cercana a 0.1° , con algunas desviaciones de hasta 0.15° aproximadamente.

Cabe destacar que las pruebas realizadas en los apartados 4.2 y 4.3 fueron realizadas haciendo uso del trípode preparado para este proyecto. Las diferencias entre los valores obtenidos con su utilización y sin él son notables. Los errores accidentales, producidos por el pulso del usuario, disminuyen inmediatamente.

En la Figura 4-4, se puede apreciar una captura de pantalla del *Navigator*, utilizado para la comprobación de las alturas proporcionadas por el módulo de adquisición.

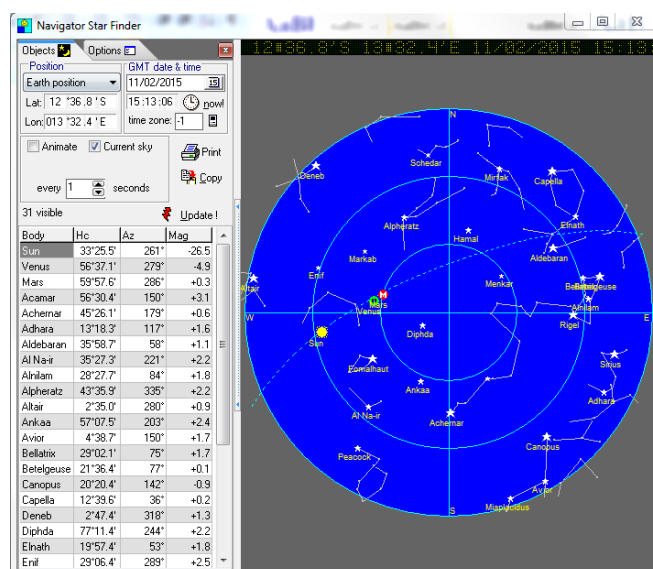


Figura 4-4 Captura de pantalla del programa *Navigator*.

4.4 Pruebas del azimut

A la hora de realizar pruebas con el azimut, todo intento de obtener una buena precisión o exactitud en los datos ha resultado inútil. Como se ha mencionado en el apartado 4.1.2, no existen a día de hoy aplicaciones con la capacidad de obtener un azimut suficientemente bueno para obtener una situación notablemente cercana a la real.

Además, la brújula del móvil es muy vulnerable a campos magnéticos externos. Incluso la situación dentro de unas instalaciones puede provocar variaciones en su azimut. El funcionamiento de los campos magnéticos es complejo y sus efectos difíciles de estudiar.

Aún así, el azimut obtenido por el módulo de adquisición ha sido utilizado para el funcionamiento del SAGA y en la realización de sus pruebas.

4.5 Pruebas realizadas con integración de módulos

Estas pruebas se limitaron, en un primer momento, únicamente a la observación del Sol, debido a que para cuando se pudo realizar la integración de módulos, el clima y la Luna llena no permitieron muchas observaciones nocturnas. La Luna llena influyó porque la cámara del teléfono móvil utilizado en las pruebas (Huawei Abrend 6630) no tiene la suficiente sensibilidad como para poder visualizar muchas de las estrellas.

En cuanto a las observaciones solares, las pruebas empezaron siendo muy inexactas. El error medio se situaba cerca de las 100 millas náuticas (180 Km), lo que, aún siendo grande, se consideró suficiente para obtener una posición estimada con vistas al problema de los tres astros. Un extracto de las primeras pruebas se puede apreciar en la Tabla 4-3.

LAT		Lon						DISTANCIA (M)	DISTANCIA (MN)
42	23,7	8	42,4	48	9,4	2	50	<u>788160,1876</u>	<u>425,5724555</u>
42	23,7	8	42,4	42	20,08	8	58,7	<u>23312,73268</u>	<u>12,58786862</u>
42	23,7	8	42,4	42	20,14	9	51,94	<u>95475,40366</u>	<u>51,55259377</u>
42	23,7	8	42,4	41	19,73	10	13,17	<u>172525,7731</u>	<u>93,15646498</u>
42	23,7	8	42,4	47	23,12	2	47,84	<u>724070,8364</u>	<u>390,9669743</u>
42	23,7	8	42,4	44	21,88	7	25	<u>242624,6109</u>	<u>131,0068094</u>
42	23,7	8	42,4	43	30	8	47,01	<u>123064,129</u>	<u>66,44931374</u>
42	23,7	8	42,4	43	30,7	8	35,35	<u>124570,4509</u>	<u>67,26266246</u>
42	23,7	8	42,4	43	30,7	8	35,35	<u>124570,4509</u>	<u>67,26266246</u>
42	23,7	8	42,4	42	25,4	9	1,43	<u>26236,82196</u>	<u>14,16675052</u>
42	23,7	8	42,4	43	26	7	37	<u>145673,7056</u>	<u>78,65750843</u>
42	23,7	8	42,4	44	28,22	5	35,6	<u>341299,695</u>	<u>184,2870924</u>
42	23,7	8	42,4	43	57,54	7	27,36	<u>201369,0676</u>	<u>108,730598</u>
42	23,7	8	42,4	44	50,78	5	53,47	<u>354540,8415</u>	<u>191,4367395</u>
42	23,7	8	42,4	44	47,18	5	43,6	<u>358245,5356</u>	<u>193,4371143</u>
42	23,7	8	42,4	43	54,41	7	47,55	<u>183787,5734</u>	<u>99,23735065</u>
42	23,7	8	42,4	43	7,88	8	8,3	<u>94134,26941</u>	<u>50,82843921</u>
42	23,7	8	42,4	43	30	8	9	<u>130993,985</u>	<u>70,7310934</u>
42	23,7	8	42,4	43	46	8	10	<u>158746,158</u>	<u>85,71606806</u>
42	23,7	8	42,4	43	47	8	9	<u>160902,0307</u>	<u>86,88014617</u>
42	23,7	8	42,4	43	46	8	10	<u>158746,158</u>	<u>85,71606806</u>
42	23,7	8	42,4	43	47	8	9	<u>160902,0307</u>	<u>86,88014617</u>
42	23,7	8	42,4	43	47	8	1	<u>164274,1021</u>	<u>88,70091905</u>
42	23,7	8	42,4	43	42	6	2	<u>261294,5827</u>	<u>141,0877876</u>
42	23,7	8	42,4	44	27	5	35	<u>340404,1722</u>	<u>183,8035487</u>
42	23,7	8	42,4	43	39	6	52	<u>204615,5439</u>	<u>110,483555</u>
42	23,7	8	42,4	43	58	7	12	<u>213278,4706</u>	<u>115,1611612</u>
42	23,7	8	42,4	44	2	6	37	<u>248797,8057</u>	<u>134,3400679</u>
42	23,7	8	42,4	44	28	6	49	<u>276387,7453</u>	<u>149,2374435</u>

Tabla 4-3 Resultados de las primeras observaciones del Sol con el SAGA

Tras muchas pruebas, se dedujo que los principales problemas fueron los siguientes. En primer lugar, el azimut magnético variaba mucho en función de en qué sitio se situaba el trípode, y se veía muy influido por causas accidentales. Además, el móvil utilizado no utilizaba la red de telefónica o de datos, y la hora del terminal estaba retrasada dos minutos. En cuanto al trípode, se veía realmente afectado por el viento. El filtro del acelerómetro está diseñado para cambiar rápidamente el valor de altura si detecta grandes cambios en el acelerómetro. Esto se traduce en grandes saltos de altura debido a los golpes de viento. Por último, las alturas se han de tomar exactamente al centro del Sol. El sol varía muy rápidamente su altura (del orden de 0.1° por minuto), sobretodo en ciertos momentos del día. Ello implica que hay que ser muy escrupulosos al apuntar al centro del Sol.

Tras estas pruebas, se buscó un sitio en el que el azimut fuese coherente y que estuviese a resguardo del viento. Se corrigió la hora del dispositivo y se fue más escrupuloso con la toma de alturas. El sitio desde el que se tomaron dichas medidas fue en la cara Oeste del cuartel Almirante Francisco Moreno, en la Escuela Naval Militar. En la Tabla 4-4 podemos ver los resultados.

LAT								DISTANCIA (M)	DISTANCIA (MN)
42	23,7	8	42,4	42	45	8	1,7	<u>68162,80961</u>	<u>36,80497279</u>
42	23,7	8	42,4	43	10	8	12	<u>95275,57193</u>	<u>51,44469327</u>
42	23,7	8	42,4	42	4	7	35	<u>99460,0764</u>	<u>53,70414492</u>
42	23,7	8	42,4	42	47	8	3,5	<u>68440,99069</u>	<u>36,95517856</u>
42	23,7	8	42,4	42	24,7	7	49,7	<u>72162,14385</u>	<u>38,96444052</u>
42	23,7	8	42,4	42	55	8	8,64	<u>74060,90354</u>	<u>39,98968874</u>
42	23,7	8	42,4	42	43,24	8	13,64	<u>53425,55923</u>	<u>28,84749419</u>
42	23,7	8	42,4	42	43,4	8	11,6	<u>55698,58003</u>	<u>30,07482723</u>

Tabla 4-4 Posteriores observaciones del Sol con el SAGA

Estas últimas pruebas dan un error de menos de la mitad que en las pruebas anteriores, lo que nos indica que hay que ser muy cuidadosos a la hora de tomar alturas y, sobre todo, que el azimut magnético que dan los terminales móviles es de muy mala calidad.

En última instancia, y a la par que la finalización de este trabajo de fin de grado, se consiguió realizar unas pocas pruebas de cálculo de posición respecto a las alturas de tres estrellas conocidas. La mayor dificultad fue la localización de tres estrellas suficientemente luminosas para poder ser captadas de forma continua por la cámara del móvil. Debido a la calidad de la misma, alguna de las estrellas escogidas aparecían y desaparecían de la pantalla del móvil, siendo difícil el centrado. Por otro lado, la mayor ventaja de esta prueba es que el azimut influye de manera poco relevante en el resultado final del cálculo.

Los resultados, por lo general, fueron mucho más variables que el resto de pruebas. Sin embargo, en muchas ocasiones, se llegaron a obtener posiciones con un error de 15 a 25 millas, siendo los mejores resultados de entre las pruebas anteriores.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

5.1.1 Precisión y exactitud del sistema

De manera general, se ha conseguido procesar los datos de los sensores mediante filtros. Posteriormente, fue corregido un error constante en los datos en crudo del acelerómetro (“decalaje”), mediante la creación de un proceso de calibración. Mediante el uso de la *Preview* de la cámara se ha conseguido visualizar el Sol y algunas de las estrellas más brillantes durante la noche, dejando mucho margen de mejora. Por último, la utilización del trípode ha permitido unos mejores resultados en las pruebas realizadas tanto en el módulo de adquisición como en la integración del SAGA.

Los principales errores accidentales que se encuentran son aquellos en forma de errores personales (el uso del pulso y de la vista humanos no son exactos), errores instrumentales (parte del ruido que no se elimina de los sensores del móvil) e incluso teóricos (el hecho de que funciones como *get.Orientation()* utilizan fórmulas para hallar el azimut de una forma casi exacta, pero que pierde parte de precisión). Además, en última instancia, se apreció que el viento influye también en parte en los resultados de la altura de los astros.

Por último, se encuentra el problema de los errores residuales. Es decir, para los cálculos de la altura y azimut de los astros, no podemos nunca conocer la altura y azimut verdaderos para un astro en un momento determinado y para una posición concreta. Los programas en los que nos apoyamos siempre tienen algo de error, y el uso del sextante también es susceptible de fallo. En este sentido, para calcular los errores, nos basamos en unos datos de altura y azimut que suponemos como ciertos, pero que pueden diferir en una pequeña medida con la realidad. Esto nos afecta de forma desconocida a los cálculos de los errores. De todas maneras, este error residual, en comparación con los objetivos propuestos para este proyecto, se pueden considerar despreciable.

5.1.2 Cumplimiento de objetivos

En cuando al cumplimiento de objetivos, por parte del módulo de adquisición de datos, se ha conseguido desarrollar parcialmente un sistema preciso y exacto para la aplicación SAGA. El método desarrollado para obtener la altura de los astros ha resultado ser bastante preciso y exacto, aunque siempre estará sujeto a errores accidentales, principalmente debidos al pulso del usuario y al movimiento del móvil al presionar la pantalla. Podemos asumir, en las mejores condiciones, que permite una precisión media en estacionario de 0.1° (6 minutos de arco).

Por otro lado, no se ha conseguido desarrollar un método de obtención de azimut suficientemente preciso para el correcto posicionamiento del SAGA mediante el método de situación mediante el Sol o una estrella o planeta. Sin embargo, y en coordinación con el módulo de procesamiento y presentación,

para el método de situación mediante tres estrellas o planetas, el azimut puede ser suficientemente preciso para una primera posición inicial que permita la posterior resolución del problema con mucha mayor precisión.

5.2 Líneas futuras

5.2.1 Introducción

En un primer paso para mejorar y automatizar la navegación astronómica tradicional, debemos abordar las limitaciones del uso de un sextante. Estas limitaciones se pueden resumir principalmente en cuatro.

1) En primer lugar, la mala precisión de la resolución mediante el uso del sextante y de los cálculos manuales, que suelen dar una situación estimada con error de aproximadamente una milla náutica (1852 metros).

2) En segundo lugar, la estrecha ventana de tiempo limitada para las observaciones, que se reduce a dos espacios de tiempo de unos 15 minutos durante los crepúsculos de orto y ocaso y al momento del paso del Sol por el meridiano del lugar. Esto se resume en tres posiciones estimadas al día. Esta limitación en el tiempo viene dada, por un lado, por el uso del horizonte en el mar para hallar las alturas de las estrellas y planetas; y, por otro lado, a la imposibilidad de obtener una situación instantánea utilizando el Sol conociendo solo su altura. Esto implica que el resto del tiempo debe navegarse por estima o con sensores inerciales, si suponemos una falta de GPS.

3) Además, existe una limitación importante debido a la baja velocidad de resolución del problema de posición. Para resolver el problema de posición, realizando las mediciones con sextante y los cálculos manualmente, el problema puede retrasarse unos 45-60 minutos. Aún en el caso de que se contase con software de cálculo, la resolución podría retrasarse al menos 20 minutos. Todo ello para obtener una única posición no actualizada, es decir, retrasada en el tiempo.

4) Por último, existe una limitación dependiente de las condiciones meteorológicas, en las que cierta nubosidad puede provocar una dificultad de detección de los astros celestes y retrasar temporalmente la resolución de su situación.

Sin embargo, tal y como asegura el artículo del Observatorio de la Marina de los Estados Unidos [19], podemos darnos cuenta de que estas limitaciones son mayoritariamente una consecuencia del método que se utiliza hoy día en navegación astronómica (que lleva siendo el mismo durante décadas) y no consecuencia de una falta de tecnología y, por lo tanto, constan de una solución técnica.

Como prueba de ello, varias de estas limitaciones ya han podido ser, en parte, resueltas en este proyecto, como la rapidez en la obtención de la situación y la falta de dependencia de la visibilidad del horizonte para ello. Esto implica, primero, una mayor frecuencia en la obtención de la posición, pudiendo ser prácticamente instantánea e ilimitada, tal y como se ha resuelto en el presente trabajo. Además, amplía enormemente la ventana de tiempo, pudiendo utilizarse la aplicación siempre que algún astro (Sol o estrellas) sean visibles por la cámara. Sin embargo, el SAGA sigue siendo todavía un sistema parcialmente manual, además de estar limitado enormemente por las condiciones meteorológicas.

En cuanto a la exactitud de la aplicación, queda un amplio margen de mejora, sobretodo en el cálculo del azimut. Sin embargo, esta poca precisión va muy ligada a las posibilidades tecnológicas de las brújulas de los móviles, que no han alcanzado, todavía, su máximo desarrollo.

Lo más destacable de la aplicación es la facilidad de uso. Comparado con el método tradicional del sextante, esta aplicación puede ser utilizada por cualquier usuario sin apenas conocimientos astronómicos, siendo prácticamente necesario sólo saber el nombre de los astros que se están observando.

5.2.2 Mejoras a la aplicación existente

A la hora de mejorar la aplicación en cuanto a la adquisición de datos, se pueden realizar una serie de avances que proporcionen una mayor exactitud y precisión, a la vez que permitiesen construir una interfaz más intuitiva y atractiva para el usuario. Se explicarán en este apartado las posibles mejoras a realizar en cuanto a la utilización del lenguaje de programación *Java* y el sistema operativo *Android*.

- Uso de sensores

En primer lugar, se podría seguir investigando sobre el uso de los sensores del dispositivo. Frecuentemente, *Android* actualiza o crea nuevos métodos de obtención de los valores proporcionados por los sensores. De hecho, son los propios sensores de los móviles (giróscopos, acelerómetros y brújulas) los que evolucionan rápidamente, proporcionando cada año mejor precisión en las medidas. También se podría probar el uso de diferentes filtros que no se han tenido en cuenta para este proyecto como, por ejemplo, los filtros *Kalman*.

- Cámara y procesado de imagen

Por otro lado, existe también una línea de mejora en la utilización de las cámaras del móvil y su vista previa. Las cámaras también han sufrido un notable avance en los últimos años, pudiendo mejorarse, con mucha probabilidad, la imagen que se obtiene de los astros.

Además, y en esta misma línea, se puede trabajar el procesado de imágenes para una mejor localización de las estrellas durante la noche. El manual de programación de *Android* utilizado para este trabajo [31], contempla en su capítulo 13 (*Image-Processing Techniques*), diferentes formas de procesado de imagen que pueden facilitar la localización de los astros. Respecto a este tema, que no se ha abordado en el presente trabajo, puede existir un amplio abanico de posibilidades a investigar.

- Montaje

Dado que la utilización del trípode resultó en una mejora notable a la hora de calcular las alturas pero no tan efectivo para el azimut, podría ser de utilidad la búsqueda de un soporte no metálico para poder realizar futuras mediciones. Aunque finalmente un usuario cualquiera de la aplicación no utilice ningún soporte para su utilización, éste sirve de mucha utilidad a la hora de realizar pruebas y mediciones mientras se desarrolla el código y se trabaja con los sensores.

5.2.3 Mejoras del sistema SAGA

De manera general, en cuanto a la mejora de la adquisición de datos mediante aparatos móviles, el apartado 5.2.2 desarrolla las líneas generales de actuación. Sin embargo, pueden establecerse líneas de mejora del proyecto SAGA que aspiren a la construcción de un sistema más sofisticado y de mejor tecnología para poder seguir mejorando la calidad de la situación obtenida.

- Cámaras infrarrojas

Para proporcionar una mejor visibilidad de los astros, es recomendable el uso de cámaras infrarrojas que puedan detectar la radiación emitida por las estrellas, incluso cuando la radiación sea muy débil o haya sido atenuada. Como se explicó en el apartado 2.4.1, existen a día de hoy seguidores de estrellas capaces de detectarlas incluso de día. La adquisición de una cámara con estas altas prestaciones es tarea más complicada, pero podría ser viable la utilización de cámaras infrarrojas.

- Telescopios

Por otro lado, también sería posible la utilización de un telescopio capaz de detectar la mayoría de las estrellas del cielo. A este telescopio, al igual que cualquier otra cámara, se le podría acoplar un sensor que pueda medir la inclinación que tiene, aunque la mayoría de telescopios en el mercado cuentan con la capacidad de detectar la altura y el azimut del astro al que se está apuntando.

Es más, muchos telescopios permiten la oportunidad de localizar las estrellas y planetas al conocer su posición concreta y la hora exacta. En este sentido, funcionan de manera inversa a lo que se pretende del sistema SAGA. Simplemente con situar el telescopio en un lugar estable y transmitir los datos de latitud, longitud, hora y fecha del momento, el telescopio puede conocer, mediante una base de datos, la posición de las estrellas y demás objetos celestes. Además, algunos permiten incluso apuntar al astro automáticamente con el simple hecho de insertar su nombre, siempre que esté en la base de datos.

Por ejemplo, el sistema CPC Deluxe HD tiene la capacidad de situarse automáticamente con un receptor GPS para, posteriormente, crear un mapa virtual del cielo, teniendo acceso a los datos astronómicos de más de 40.000 objetos del cielo. De esta manera, al orientarlo hacia alguna estrella, planeta o la Luna, el sistema es capaz de reconocer de qué astro se trata.

Por otro lado, muchos telescopios también cuentan con una característica muy importante a la hora de las líneas futuras del SAGA, y es la posibilidad de seguimiento de un astro. Este seguimiento puede realizarse de dos maneras. La primera de ellas, incluida en la mayoría de telescopios con base de datos, es el seguimiento de un astro en base a su movimiento astronómico teórico. Esto requiere que el telescopio se mantenga en una posición fija, y que posea una base de datos extensa y exacta, de un modo similar al proyecto referido anteriormente en el apartado 2.4.2 para el Sol [28]. Por otro lado, también puede realizarse el seguimiento mediante el análisis de la imagen recibida, tratada con un procesamiento de imágenes, que resulta ciertamente más complejo. La ventaja de ello es que el sistema podría, hasta cierto punto, sufrir pequeños desplazamientos o movimientos provocados por fuerzas externas. Pensando en la posibilidad de una plataforma móvil, este aspecto resulta muy importante.

- Construcción de plataforma robótica

Otra posibilidad de desarrollo del proyecto, alternativa a la compra de un telescopio, es la creación de una plataforma, a modo de brazo robótico, que cumpla las características de alguno de los telescopios nombrados anteriormente. Se podría desarrollar un sistema robótico, con un visor o cámara integrados, capaz de ser dirigido a los astros de manera automática o manual. Esto permitiría apuntar a ciertos astros y obtener su altura y azimut, para poder calcular así la posición del punto de observación.

El siguiente paso a la construcción de este brazo robótico, es la posibilidad de seguimiento de los astros. En el caso de una posición fija, el sistema podría ordenar repetidamente una corrección en altura y azimut para mantener el astro dentro de la mira y, por tanto, obtener su altura y azimut exactos. Por otro lado, se podría procesar la imagen recibida de modo que se perciba una cierta separación del astro respecto al centro de la mira, y conocer el desvío de la misma. Este desvío, traducido en una altura y azimut, se utilizaría para ordenar al brazo corregir el desplazamiento del astro y, poder así, volver a ajustarlo al centro de la mira. De este modo, independientemente de los desplazamientos, se actualizaría constantemente la corrección del astro respecto a la mira o cámara, y se actualizaría, por tanto, la situación.

- Plataforma móvil

Una vez los resultados sean buenos para una posición fija, el último paso sería la instalación del sistema en una plataforma móvil. Esta instalación podría realizarse básicamente de dos formas diferentes. La primera de ellas es mediante un sistema de suspensión, que consiga mantener la plataforma siempre en una posición horizontal. La segunda, algo más complicada, sería mediante el uso de acelerómetros, giróscopos y brújulas que corrijan el movimiento de balance, cabeceo y alabeo de la plataforma mediante las órdenes de movimiento contrarias al receptor, de modo que corrija el movimiento externo para mantener el astro en imagen.

Todas estas vías futuras anteriores son posibilidades de mejora del sistema SAGA, desde un punto de vista más avanzado tecnológicamente. Estas implicarían un sistema a mayor escala y más complejo, que podría, con muchas probabilidades, mejorar enormemente las características del actual trabajo.

5.3 Modernización de la navegación astronómica en la Armada

Si queremos dar a la navegación astronómica un papel más importante en el ambiente de alta tecnología de la Armada moderna, ésta debe venir de la mano de los últimos avances en tecnología.

Realizando un acercamiento realista a la Armada actual, el uso de cámaras infrarrojas (conocidas comúnmente como FLIR), que están a bordo de la mayoría de buques de la Armada, es una vía de investigación factible para un comienzo en la modernización de la navegación astronómica. En este sentido, la empresa *TECNOBIT* proporciona cámaras IR (infrarrojos) a la mayoría de buques de la Armada modernos [35].

A día de hoy, es posible que la cámara FLIR instalada a bordo de los buques de la Armada no esté ajustada para detectar los astros del cielo. Sin embargo, se ha comprobado que son capaces de realizar un seguimiento del Sol detrás de la nubosidad, y todo parece apuntar a que podría localizar estrellas en días que faciliten su avistamiento.

Como mejora en la cámara FLIR, se podría plantear hacer uso de diferentes filtros según la recepción de mayor o menor intensidad. Por ello, en días despejados, debería hacerse uso de un filtro que permita reducir la intensidad de la radiación recibida del Sol. Sin embargo, cuando el Sol se esconda entre las nubes, o cuando de noche no sea posible visualizar las estrellas, se podría ajustar el filtro para aumentar la radiación recibida y aumentar el contraste. De hecho, este cambio de filtrado podría hacerse de forma automática ajustándose según la intensidad.

A modo de ejemplo de las diferencias que se pueden encontrar en la aplicación de diferentes filtros, podemos observar la Figura 5-1, donde en la parte superior se puede apreciar más el contraste de la imagen recibida.

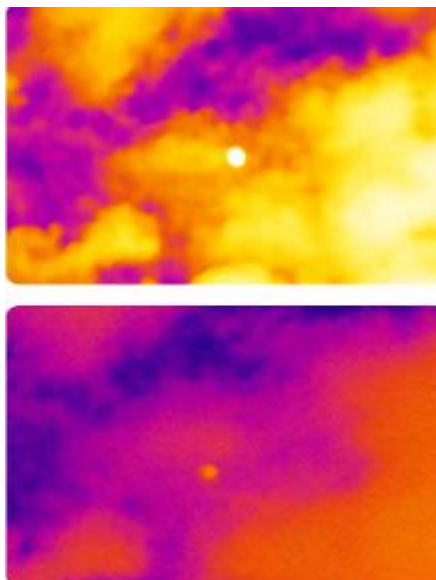


Figura 5-1 Comparación del uso de filtros infrarrojos para localización del Sol [28]

Además de la necesidad de filtrado, la cámara FLIR presentó otro problema: la poca precisión a la altura y el azimut que proporciona por pantalla. Para el uso que se da hoy día a las cámaras infrarrojas (búsqueda y rescate, patrulla, reconocimiento, etc.) no se requiere una gran precisión a la hora de transmitir la altura o el azimut hacia donde apunta la cámara. Sin embargo, después de realizar varias pruebas con la cámara, todo parece apuntar que internamente el sistema debe tener una mayor precisión a la hora de transmitir estos datos, pero que no interesa al operario, que únicamente necesita números enteros para los propósitos explicados. En la Figura 5-2 se puede comprobar la gran precisión que puede llegar a tener esta cámara en cuanto a la altura del astro. Seguramente, estos parámetros puedan configurarse de modo que la FLIR proporcione una altura y un azimut suficientes para poder realizar cálculos astronómicos.

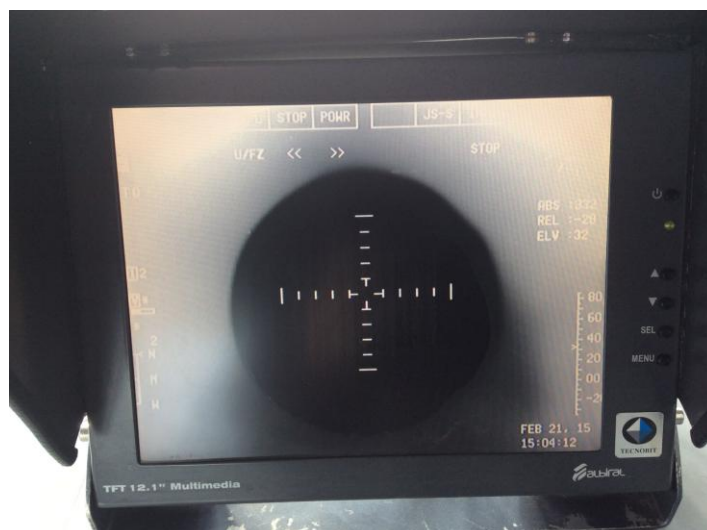


Figura 5-2 Seguimiento del Sol con cámara FLIR modo infrarrojo y ajustado al máximo zoom.

Por ello, sería factible integrar un programa similar al módulo de procesamiento y presentación de datos al sistema FLIR, de modo que tuviese la opción de elegir cuántos astros y cuáles se utilizarían para realizar las observaciones.

Sin embargo, el uso de las cámaras infrarrojas a bordo de los buques de la Armada podría ser simplemente el primer paso hacia una modernización de la navegación astronómica, ya que podrían diseñarse cámaras infrarrojas únicamente para tal fin, sin que su coste sea excesivo.

Al fin y al cabo, todo depende de la fiabilidad y la dependencia del sistema GPS. Siendo las Fuerzas Armadas un instrumento de afianzar la seguridad nacional, no es descabellado pensar en un sistema de navegación secundario al GPS que pueda suplir, nunca se sabe, una falta de posicionamiento por GPS.

Definitivamente, la posibilidad de desarrollo existe. Y, al igual que ocurrió con el GPS y con otros inventos innovadores, cuanto más se invierta en esta tecnología, mucho más exacta y mucho antes se podrá desarrollar.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Smithsonian Institution, «*The First Satellite Navigation System*» *Time and Navigation*, [En línea]. Available: <http://timeandnavigation.si.edu/satellite-navigation/reliable-global-navigation/first-satellite-navigation-system>.
- [2] R. Novosti, «*Rusia Beyond the Headlines*» Dos Sistemas de Navegación frente a frente: GLONASS vs. GPS, [En línea]. Available: http://es.rbth.com/cultura/tecnologias/2014/01/09/dos_sistemas_de_navegacion_frente_a_frente_glonass_vs_gp_36203.html.
- [3] The Raspberry Pi Foundation, «Raspberrypi.org» [En línea]. Available: <http://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/>.
- [4] Android, «*Developers*» *Installing the Android SDK*, [En línea]. Available: <http://developer.android.com/sdk/installing/index.html>.
- [5] StatCounter, «*Stat Counter GlobalStats*» [En línea]. Available: http://gs.statcounter.com/#mobile_os-ww-monthly-200812-201502.
- [6] Java, «*Descarga gratuita de Java*» [En línea]. Available: <https://www.java.com/es/download/>.
- [7] IALA-AISM, «*Instituto Oceanográfico de la Armada*» [En línea]. Available: http://www.inocar.mil.ec/ESDEHI/docs/MANUAL_IALA.pdf.
- [8] Armada Española, «*Sistemas electrónicos de navegación [pdf]*» [En línea]. Available: http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/mardigital_biblioteca/prefLang_es/11_ingenieria_electronica.
- [9] ALAVA INGENIEROS, «*SISTEMAS INERCIALES, ALAVA INGENIEROS,*» [En línea]. Available: <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/oceanografia/posicionamiento-rumbo-y-actitud/sistemas-inerciales/>.
- [10] F. J. Pereda Garcimartín, «*Universidad Complutense de Madrid. Guiado, navegación y control de una flota de barcos autónomos*» [En línea]. Available: <http://eprints.ucm.es/13058/1/tfm-fernandojpereda.pdf>.

- [11] «Ejercicios de Perturbación GPS. Jefe de Comunicaciones. Fragata F-101» 2014.
- [12] R. Morelle, «BBC» Tecnología de la Segunda Guerra Mundial por si falla la del siglo XXI, [En línea]. Available: http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2014/11/141106_tecnologia_barcos_gps_eloran_finde_az.
- [13] A. R. Dr. Jiménez Ruiz, Tema 4: Sistemas de Posicionamiento de exteriores, Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá. CSIC., 2007/2008.
- [14] The University of Texas in Austin, «*Aerospace Engineering and Engineering Mechanics*» [En línea]. Available: <http://www.ae.utexas.edu/news/features/todd-humphreys-research-team-demonstrates-first-successful-gps-spoofing-of-uav>.
- [15] Blog MIGUI, «Ciencia y cultura» [En línea]. Available: <http://www.migui.com/ciencias/tecnologia/algunas-cosas-que-quiza-no-sepas-sobre-el-gps.html>.
- [16] El Mundo, «La ONU alerta del peligro de la basura espacial para las comunicaciones terrestres» [En línea]. Available: <http://www.elmundo.es/elmundo/2013/06/29/ciencia/1372519746.html>.
- [17] European Space Agency, «*Galileo Navigation*» [En línea]. Available: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo.
- [18] T. L. Moratalla, «Nuevos métodos y nuevos instrumentos: la navegación astronómica en la edad moderna. Universidad de Cádiz» 7 Julio 2011. [En línea]. Available: actividades.uca.es/compromisoambiental/2011/B10/2_navegacionastronomica.pdf.
- [19] G. H. Kaplan, «*New Technology for Celestial Navigation, U.S. Naval Observatory*» [En línea]. Available: <http://gkaplan.us/content/NewTech.html>.
- [20] B. Steigerwald, «NASA» *NASA Goddard Space Flight Center*, [En línea]. Available: www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2009/icrf2.html.
- [21] Smithsonian Institution, «*Nortronics NAS-14V2 Astroinertial Navigation System*» *Time and Navigation*, [En línea]. Available: timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/nortronics-nas-14v2-astroinertial-navigation-system.
- [22] Smithsonian Institution, «*Meet the Navigator: Peter Boyne*» *Time and Navigation*, [En línea]. Available: <https://timeandnavigation.si.edu/navigation-for-everyone/meet-the-navigator/submarine-navigator-us-navy-ret>.
- [23] K. J. Cowley, «*ION Intitute of Navigation*» [En línea]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=4806>.
- [24] Optical Physics Company, «*High-accuracy SWIR Band Star Tracker*» [En línea]. Available: <http://www.opci.com/products/star-tracker>.
- [25] U.S. Navy, «*Optical Physics Company*» *Profiles in Success*.
- [26] L. Aragón, «De Oriente a Occidente» [En línea]. Available: <https://deorienteaoccidente.wordpress.com/2011/page/4/>.
- [27] ABC.es, «Ciencia: ¿Hallada la legendaria "piedra solar" de los vikingos?,» [En línea]. Available: <http://www.abc.es/ciencia/20130306/abci-hallan-legendaria-piedra-solar>

201303061325.html.

- [28] G. Prinsloo y R. Dobson, *Solar Tracking: Automatic Solar-Tracking, Sun-Tracking Systems, Solar Trackers and Automatic Sun Tracker Systems*.
- [29] Eclipse Luna, «*Eclipse Downloads*» [En línea]. Available: <https://www.eclipse.org/downloads/>.
- [30] «*Navigator*,» [En línea]. Available: <http://www.tecepe.com.br/nav/>. [Último acceso: 15 2 2015].
- [31] G. Milette y A. Stroud, *Professional Android Sensor Programming*, John Wiley & Sons, Inc..
- [32] NOAA, «*National Geophysical Data Center*» *National Oceanic and Atmospheric Administration*, [En línea]. Available: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>.
- [33] Android, «*Developers. Reference. Calendar.*» [En línea]. Available: <http://developer.android.com/reference/java/util/Calendar.html>.
- [34] Armada Española, «Ciencia y Cultura. Hora. Real Observatorio de la Armada» [En línea]. Available: http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/ciencia_observatorio/prefLang_es/06_Hora.
- [35] TECNOBIT, «Áreas Tecnológicas. Optrónica. Aplicaciones de Defensa» [En línea]. Available: <http://www.tecnobit.es/es/web/guest/aplicaciones-defensa>.
- [36] J. Meeus, *Astronomical Algorithms*, Richmond, Virginia: Willmann-Bell, Inc., 1991.
- [37] M. J. Sevilla, «Teoría de errores de observación» [En línea]. Available: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/6635/1/errores.pdf>.

ANEXO I: TEORÍA DE LA NAVEGACIÓN ASTRONÓMICA

Para desarrollar el software necesario en el módulo de procesamiento y presentación de datos, se ha utilizado el libro escrito por el astrónomo Jean Meeus, y publicado en 1991, *Astronomical Algorithms* [36] en el que se detalla cómo calcular las variables astronómicas más importantes, por recomendación del profesor emérito de astronomía de la ENM.

Como módulo de adquisición de datos, la misión de este proyecto es la de proporcionar los valores, con la mayor exactitud y precisión posibles, de la hora de la observación y la altura y el azimut de un astro, explicados en el apartado 2.3.2. Como ampliación, y en relación con estos conceptos, se explican a continuación algunos detalles referentes a este ámbito, dejándose, a discreción del lector, ampliar o afianzar conocimientos en el ámbito de la navegación astronómica para poder comprender mejor el proyecto. Para ello, explicaremos una serie de definiciones de interés, acompañadas de varias ilustraciones explicativas.

1) *Coordenadas Terrestres*

Son aquellas coordenadas que toman como referencia la Tierra. Es posible que el público, en general, esté más acostumbrado a escucharlas que las posteriores.

- Eje y polos de la Tierra

La línea alrededor de la cual gira la Tierra se llama Eje de la Tierra, y los extremos de esta línea son los polos, Polo norte y Polo sur.

- Ecuador terrestre

Círculo máximo perpendicular al eje de la Tierra. Los polos están separados 90° del Ecuador.

- Paralelos

Son todos los círculos menores paralelos al Ecuador.

- Meridianos

Son los círculos máximos que pasan por los polos. Son, por lo tanto, perpendiculares al Ecuador.

- Meridiano de Greenwich

Meridiano de referencia a partir del cual se miden las longitudes.

- Latitud

Arco de meridiano contado desde el Ecuador hasta el punto terrestre que se quiere medir. Por ello, no podrá ser mayor de 90° , y se llama latitud norte, si el punto está en el hemisferio norte y latitud sur, si el punto está en el hemisferio sur.

- Longitud

Arco de Ecuador recorrido desde el meridiano superior de Greenwich hasta el meridiano superior del lugar. Es siempre menor de 180° , y es oeste (W) si, cuando vista desde fuera de la tierra, y con el polo norte arriba, el punto queda a la izquierda del meridiano superior de Greenwich; y es este (E) si, en las mismas condiciones, queda a la derecha.

2) Coordenadas celestes

- Esfera celeste

Para la resolución de los problemas de astronomía, se supone que todos los astros se encuentran en una gran superficie esférica de un radio arbitrario. Esta esfera es la llamada esfera celeste.

- Esfera Celeste Geocéntrica

Esfera celeste que tiene por centro el centro de la Tierra. Ésta es realmente la esfera celeste que usaremos para los cálculos astronómicos.

- Polos celestes

Puntos de la esfera celeste que resultan del corte de la misma con la prolongación del eje de la Tierra. Reciben los mismos nombre de los polos de los que proceden (Norte y Sur).

- Ecuador celeste

Círculo máximo de la esfera celeste perpendicular a sus polos. También es el resultante del corte entre el plano que contiene al Ecuador con la esfera celeste. Divide a la esfera celeste en Hemisferio Norte y Hemisferio Sur.

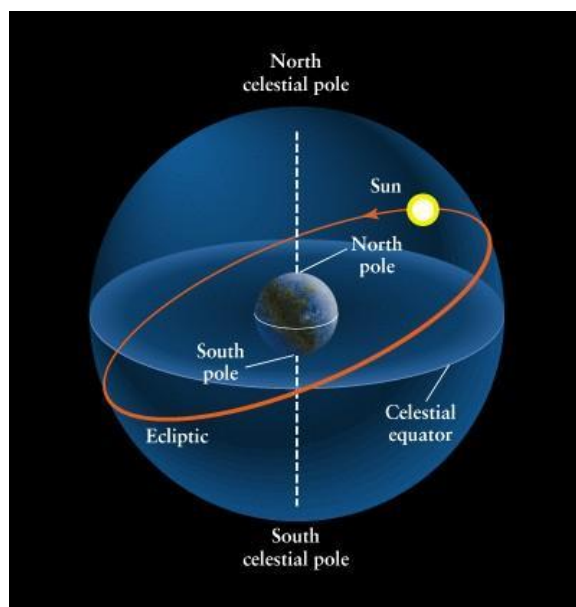


Figura AI-0-1 Representación de la esfera celeste geocéntrica y sus polos y ecuador celeste.

- Esfera Celeste Local

Esfera celeste que tiene por centro al punto en estudio u observador, en un determinado instante.

- Línea Zenit-Nadir

Es la línea que une el punto más alto (Zenit) con el punto más bajo (Nadir) de la esfera celeste local, atravesando el punto de observación sobre el que se representa la esfera local.

Para cada punto de la Tierra existe una esfera celeste local, que se corresponde con la parte de la esfera celeste que se puede observar desde ese punto. En la Figura AI-0-2, se refleja la semiesfera local visible por un observador.

- Horizonte:

Cualquier círculo perpendicular a la línea Zenit-Nadir.

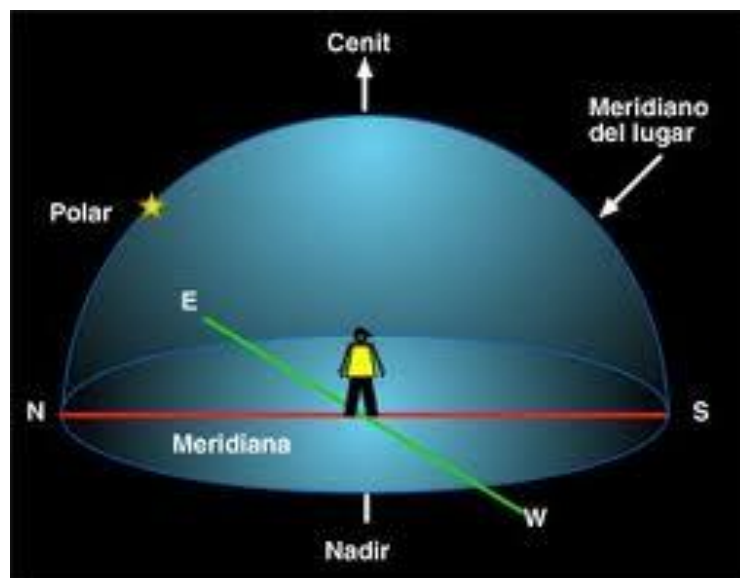


Figura AI-0-2 Representación de la esfera celeste local respecto a un observador, además de su Zenit y Nadir.

- Horizonte verdadero (H_v)

Es el horizonte que tiene por centro el centro de la Tierra. Es paralelo al plano tangente a la Tierra por el punto de observación.

- Horizonte aparente (H_a)

Es el horizonte que tiene por centro el punto en estudio, el punto de observación, siendo paralelo al horizonte verdadero. Suele considerarse tangente a la Tierra, debido a que la altura de observación suele ser muy pequeña en comparación con el radio de la Tierra, aunque realmente está a una altura igual a la de observación. Además, debido a la pequeñez del radio de la Tierra en comparación con la distancia entre la Tierra y los astros, el horizonte aparente y el verdadero se considerarán iguales para los cálculos de ángulos de las estrellas, aunque sufren cierta variación con el Sol o la Luna.

- Horizonte visible (H_m)

Es el formado por las visuales a la superficie de la Tierra. Este horizonte depende de la altura del observador y se ve también afectado por la refracción. Es el horizonte que observamos visualmente.

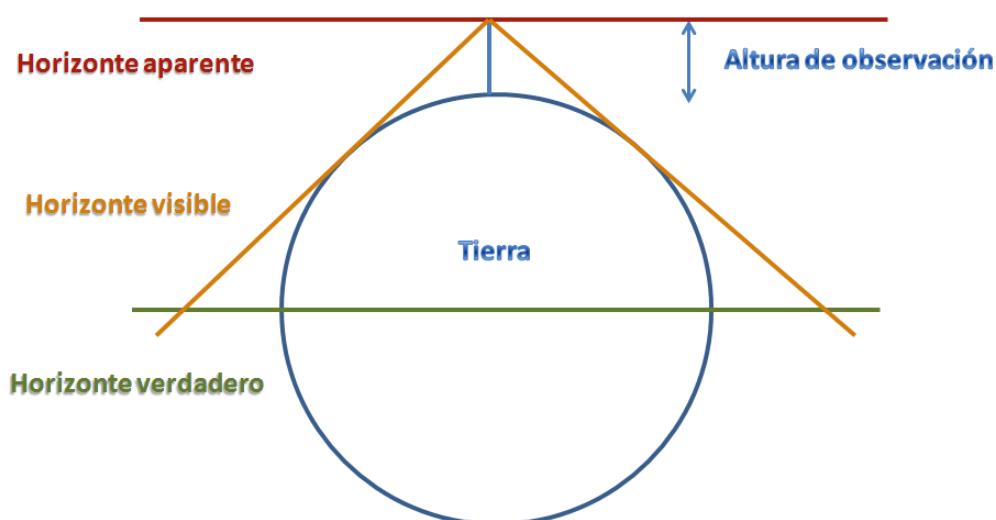


Figura AI-0-3 Representación del horizonte aparente, verdadero y visible desde el punto de vista del observador.

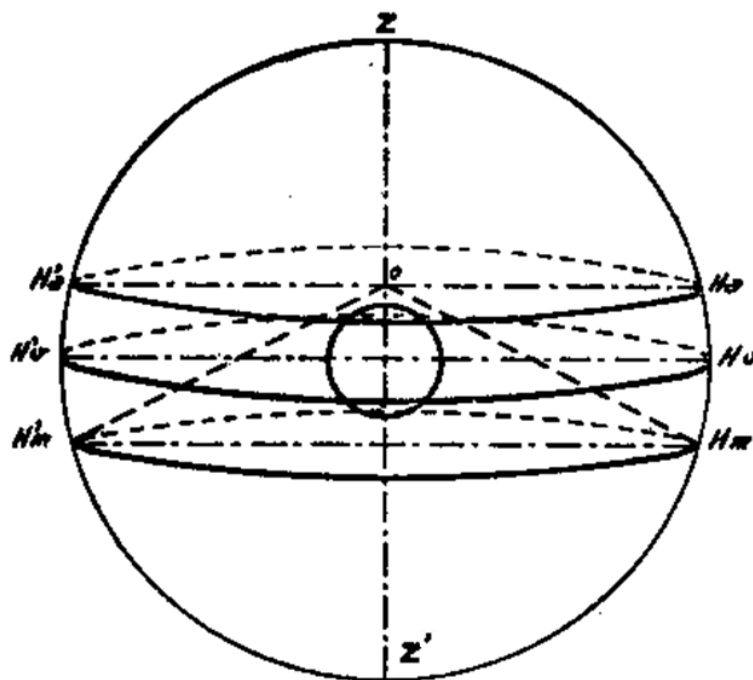


Figura AI-0-4 Representación del horizonte verdadero (Hv), el horizonte aparente (Ha) y el horizonte visible (Hm), así como el Zenit (Z) y el Nadir (Z') sobre la esfera celeste geocéntrica.

- Vertical

Son los círculos máximos que pasan por el Zenit y el Nadir, y son perpendiculares al horizonte.

3) *Coordinadas horizontales*

Son aquellas que se miden sobre los horizontes y las verticales, círculos máximos perpendiculares entre sí. Son principalmente el azimut y la altura.

- Azimut

Arco de horizonte medido desde uno de los puntos cardinales N o S, hasta la vertical del astro en estudio.

- Azimut náutico

Es aquel que se mide siempre desde el punto cardinal N hacia el E (sentido de las agujas del reloj si miramos desde el Polo Norte y hacia abajo). Por ello, puede comprender valores desde 0° a 360°.

- Azimut cuadrantal

Aquel que se cuenta desde cualquiera de los puntos cardinales N o S, hacia cualquiera de los puntos cardinales E u W. Por ello, comprenderá valores entre 0° y 90°, e irá acompañado de dos letras, N o S, y E u W, que serán los puntos cardinales de referencia.

- Azimut astronómico

Es aquel que se cuenta desde cualquiera de los dos puntos cardinales N o S. La medición se hará desde el punto cardinal con el mismo nombre que la latitud del punto en estudio. Por ello, este azimut comprenderá valores entre 0° y 180°.

- Altura

Arco de vertical contado desde el horizonte, hasta el astro en estudio. Por ello, no podrá ser mayor de 90°, si es visible, ni menor de -90°, si no es visible.

En la Figura AI-0-5 se intenta explicar gráficamente los conceptos de altura y azimut de un astro. En ella también se observan detalles como el horizonte, el Zenit y el Nadir, o los puntos cardinales norte y sur.

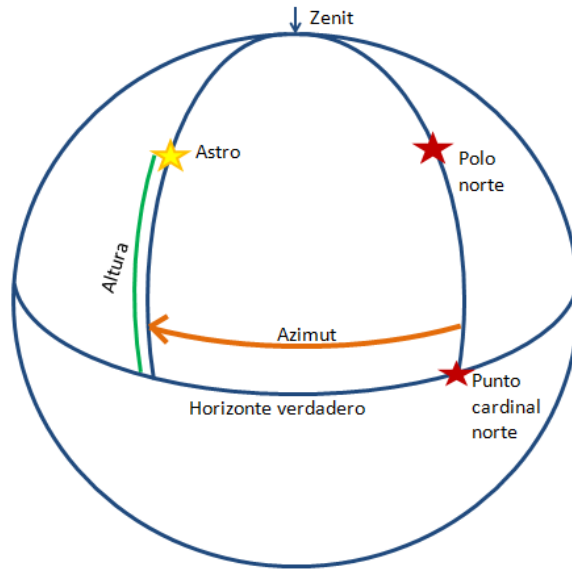


Figura AI-0-5 Gráfico ilustrativo de la altura y el azimut de un astro sobre la esfera celeste.

ANEXO II: ERRORES EN LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

Antes de embarcarse en las bases de la navegación astronómica, debemos comprender los diferentes tipos de error que existen en las medidas de las observaciones astronómicas [37].

- Exactitud

Aproximación al valor real o a un patrón o modelo existente.

- Precisión

Grado de perfección o afinamiento con que se realiza una observación o se establece un resultado. Ésta depende de los aparatos, de las fórmulas empleadas y de los errores por parte de los observadores.

- Error verdadero

Diferencia existente entre el valor real o ideal de una magnitud y el valor observado de la misma.

- Errores personales

Debidos a las imperfecciones en los sentidos del observador (vista, oído, etc.) u otros errores introducidos durante el proceso llevado a cabo por los observadores.

- Errores instrumentales

Aquellos que son provocados por los aparatos usados para la observación.

- Errores teóricos

Son aquellos producidos por deficiencias en la teoría utilizada en las observaciones. De este modo, en muchas ocasiones, las fórmulas son aproximaciones casi exactas del funcionamiento de un sistema, pero que son causa de error de precisión.

- Errores constantes

Son aquellos que producen el mismo efecto en todas las observaciones realizadas sobre una misma serie de medidas. Estos errores son constantes independientemente de las condiciones de observación.

- Errores sistemáticos

Aquellos cuyas causas son conocidas y tienen corrección, sea por medio de una operación adecuada del instrumento de medida, sea aplicando un modelo matemático del error. El motivo y el valor de estas medidas no se conocen con precisión, pero presentan el mismo valor y sentido en todas las observaciones para unas condiciones dadas. Por ello, los errores varían para cada condición de observación.

- Errores accidentales

Proviene de causas variables, desconocidas y que influyen de una manera irregular, variando su sentido y magnitud para cada una de las observaciones. También se incluyen como errores accidentales las pequeñas imprecisiones a la hora de corregir un error sistemático conocido.

- Errores residuales

De manera general, no puede conocerse el valor exacto de una magnitud, sino que se aproxima al valor más probable para poder compararlo con las mediciones. A esta diferencia entre el valor real y el valor más probable calculado se le llama error residual.