



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Sistema automático de geolocalización basado en los astros:  
módulo de procesamiento y presentación de datos*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Gerardo González-Aller Rodríguez

**DIRECTORES:** Belén Barragáns Martínez  
Norberto Fernández García

**CURSO ACADÉMICO:** 2014-2015

Universida<sub>de</sub>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 procesamiento y presentación de datos*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>de</sub>Vigo



---

## **RESUMEN**

Con el objetivo de sentar las bases para el desarrollo de un sistema que obtenga su situación de forma automática a través de la observación de los astros, el presente trabajo de fin de grado pretende crear un programa que obtenga la posición en la esfera terrestre de un observador a partir de la altura y el azimut de una estrella (o tres) a una hora determinada, así como estudiar mediante diferentes pruebas si la precisión y exactitud obtenidas son suficientes, o qué cambios serían necesarios para que lo fueran.

El módulo de adquisición de datos se encargará de proporcionar al programa que se desarrolle en este TFG los datos necesarios para que pueda obtener su posición.

El programa se ha desarrollado en el lenguaje de programación Java, y, para realizar pruebas de forma conjunta con el módulo paralelo de adquisición de datos, en el sistema operativo Android, creándose así una aplicación móvil llamada SAGA (Sistema Automático de Geolocalización basado en los Astros), que obtiene la situación del observador a través de la altura y azimut obtenidos con los acelerómetros y brújula magnética del móvil.

Las pruebas realizadas indican la validez del enfoque y dejan abierta la puerta a futuros trabajos en esta línea, con el objetivo de que se llegue a desarrollar un sistema que obtenga, de forma totalmente automática, la situación de una plataforma móvil, como pudiera ser un barco.

## **PALABRAS CLAVE**

SAGA, geolocalización, astronómico, aplicación, estrellas, posicionamiento, Android, Java



---

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a los directores del proyecto, Doña Belén Barragáns Martínez y Don Norberto Fernández García por el esfuerzo, apoyo, conocimientos y experiencia con los que me han ayudado a llevar este TFG a buen término, pero sobretodo, por la confianza mostrada al aceptar la dirección del presente proyecto.

Un reconocimiento muy especial se merece el Capitán de Navío Rafael Ceñal Martínez-Hombre, profesor emérito de la asignatura de Navegación en la Escuela Naval Militar, por el todo el apoyo, información e ilusión mostrado durante todo el proyecto, con el que colaboró desde sus inicios. Agradecerle también el ejemplo que es como marino y profesor en la Escuela Naval Militar, por su compromiso con la enseñanza y su pasión por los conocimientos astronómicos.

Le debo también un cariñoso agradecimiento a todos mis compañeros de las promociones 415-145, por todo lo que me han ayudado a mejorar como persona y como militar a lo largo de estos cinco largos y a la vez cortos años. Y, dentro de mis compañeros, especialmente al original y único Grupo 4. Después de cinco años, estamos a punto de conseguirlo, pero aunque nos separemos, los recuerdos de nuestros seminarios, cenas y discusiones no se perderán.

También a mi hermano Santiago, por asumir conmigo los riesgos de embarcarnos en la aventura de desarrollar un TFG a partir de una idea propia, por su paciencia conmigo, por su trabajo y apoyo meses antes de que empezara el desarrollo de este TFG, así como el ejemplo que supone para mí en tantos ámbitos, tanto militares como humanos, siendo mi hermano “pequeño”.

Gracias a mi familia, a mis padres por la educación que me han brindado, por los valores que han inculcado en nuestra familia desde el principio, y por el apoyo que nos han dado.

Por último, pero más importante, gracias a Dios.



## 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 Organización de la memoria .....	10
2 Estado del arte .....	11
2.1 Introducción a las técnicas de navegación marítima.....	11
2.1.1 Métodos de navegación .....	11
2.1.2 Fases de navegación .....	12
2.1.3 Estándares de exactitud para la navegación.....	13
2.2 Navegación GPS .....	14
2.2.1 Estructura del GPS.....	14
2.2.2 Inconvenientes del uso del GPS .....	14
2.2.3 Conclusiones.....	17
2.3 Navegación astronómica .....	17
2.3.1 Introducción a la navegación astronómica .....	17
2.3.2 Explicación teórica básica .....	18
2.3.3 Comparativa con el sistema GPS.....	18
2.3.4 Navegación astronómica moderna.....	19
2.4 Aplicaciones/programas existentes .....	20
2.5 Software empleado.....	20
2.5.1 Java: .....	20

2.5.2 Android: .....	21
2.5.3 Eclipse Luna .....	21
3 Desarrollo del TFG.....	22
3.1 Obtención de las posiciones aparentes de los astros. ....	22
3.1.1 Catálogo de estrellas .....	23
3.1.2 Cálculo del Horario en Greenwich de Aries .....	24
3.1.3 Posición aparente del Sol.....	24
3.1.4 Posición aparente de las estrellas.....	25
3.2 Resolución de los problemas para obtener la situación .....	26
3.2.1 Resolución con datos de un único astro.....	26
3.2.2 Resolución con datos de tres astros (Método de las bisectrices) .....	27
3.3 Implementación en Java.....	31
3.3.1 Clase FechaHora .....	31
3.3.2 Clase Input .....	31
3.3.3 Clase Astro.....	32
3.3.4 Clase Situación .....	32
3.4 Implementación en Android.....	33
3.4.1 HashMap.....	33
3.4.2 Cámara y sensores. ....	33
3.4.3 Estructura de la aplicación.....	33
4 Resultados de las pruebas .....	35
4.1 Pruebas realizadas con Stellarium y Navigator.....	35
4.1.1 Pruebas con el problema de un astro .....	36
4.1.2 Pruebas con el problema de tres astros .....	38
4.2 Pruebas realizadas con problemas reales .....	39
4.3 Pruebas realizadas con integración de módulos.....	40
5 Conclusiones y líneas futuras .....	42
5.1 Funcionamiento del programa .....	42
5.1.1 Problema de un sólo astro.....	42
5.1.2 Problema de tres astros .....	42
5.2 Hacia un sistema automático.....	43
5.3 Líneas futuras .....	44
5.3.1 Mejoras al programa .....	44
5.3.2 Compatibilidades .....	46
6 Bibliografía.....	48

Anexo I: Conceptos previos .....	51
Anexo II: Movimiento de la Tierra .....	56
Anexo III: Explicación de órbitas elípticas .....	58
Anexo IV: Coordenadas .....	60
Anexo V: Correcciones al movimiento terrestre .....	62

## Índice de Figuras

Figura 1	Uso de los sistemas operativos en dispositivos móviles.....	8
Figura 2	Esquema general .....	9
Figura 3	Lóbulo de acción de la antena perturbadora .....	15
Figura 4	Fallo en el sistema AIS .....	15
Figura 5	Pérdida de señal en el sistema satélite militar.....	15
Figura 6	Primer perturbador portátil utilizado.....	16
Figura 7	Segundo perturbador portátil utilizado. ....	16
Figura 8	Altura y azimut .....	22
Figura 9	Horario del lugar en Greenwich (HG*) y declinación.....	23
Figura 10	Muestra del documento <i>almanaque.txt</i> .....	23
Figura 11	Elementos para situación mediante un astro.....	26
Figura 12	Triángulo de posición .....	26
Figura 13	Trazado de diferencia de alturas. ....	30
Figura 14	Trazado de rectas de altura.....	30
Figura 15	Trazado de bisectrices.....	31
Figura 16	Esquema del constructor de la clase Situación. ....	32
Figura 17	Pantalla de la Activity <i>Cámara</i> . ....	33
Figura 18	Esquema general de funcionamiento de la aplicación integrada. ....	34
Figura 19	Captura de pantalla del programa Navigator. ....	35
Figura 20	Captura de pantalla del programa Stellarium.....	36
Figura 21	Resultados del problema con un astro.....	36
Figura 22	Resultados para el Sol, problema de 1 astro. ....	36
Figura 23	Influencia de la altura en el error. ....	37
Figura 24	Influencia de la variación de la centésima de azimut en el error. ....	37

Figura 25 Influencia de la variación de la décima de azimut en el error.....	38
Figura 26 Resultados para el problema con 3 astros. ....	38
Figura 27 Cara frontal de un problema de situación al crepúsculo. ....	39
Figura 28 Primeras observaciones del Sol.....	40
Figura 29 Segundos resultados de la observación al Sol.....	41
Figura 30 Avance propuesto hacia un SAGA. ....	44
Figura 31 Funcionamiento propuesto de un sistema automático. ....	47
Figura 32 Representación de los elementos del Anexo 1 más relevantes. ....	54
Figura 33 Movimiento de la Tierra. ....	56
Figura 34 Órbita aparente del Sol.....	57
Figura 35 Elementos orbitales. ....	59
Figura 36 Anomalías ....	59
Figura 37 Coordenadas ecuatoriales.....	61
Figura 38 Movimientos de precesión y nutación. ....	64

## Índice de Tablas

Tabla 1 Estándares más importantes de navegación .....	13
Tabla 2 Indeterminaciones resultantes al calcular con un único astro. ....	27

# 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 a nivel mundial son el GPS (*Global Positioning System*) americano y el sistema ruso GLONASS (*Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema* o *Global Navigation Satellite System*). 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, en la Armada Española, aunque mantiene por adiestramiento otros procedimientos de navegación (por ejemplo, el procedimiento de navegación por aguas restringidas), el GPS americano es utilizado ampliamente, 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 en este aspecto, 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

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 TFG nos ocuparemos del diseño y desarrollo del módulo de procesamiento y presentación de los datos.

## 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.

En este módulo, el objetivo es resolver los problemas de obtención de la situación del usuario mediante el diseño y creación de un programa informático que parta de los datos obtenidos por el módulo complementario. Además se deberá probar el software, y obtener conclusiones en cuanto a la precisión y exactitud que se pueden obtener con los métodos de resolución del problema astronómico escogidos.

El programa se desarrollará utilizando el lenguaje de programación Java, para adaptarlo después al sistema operativo Android, y poder realizar pruebas con un terminal móvil, de acuerdo con el proyecto complementario. Se diseñará, por tanto, un programa que obtenga una situación de forma única y estacionaria, sin tener en cuenta la velocidad del usuario.

Se decidió usar el lenguaje de programación Java y el sistema operativo Android porque ambos están muy extendidos hoy en día, y la fase de aprendizaje sería más corta gracias a que existen muchos foros y páginas en Internet con ejemplos de programación para ambos casos. Además facilitaría la implementación en un terminal móvil ya que el sistema operativo Android es el más usado actualmente (ver Figura 1), y de esta manera posibilitaríamos el hacer pruebas conjuntas con el módulo paralelo.

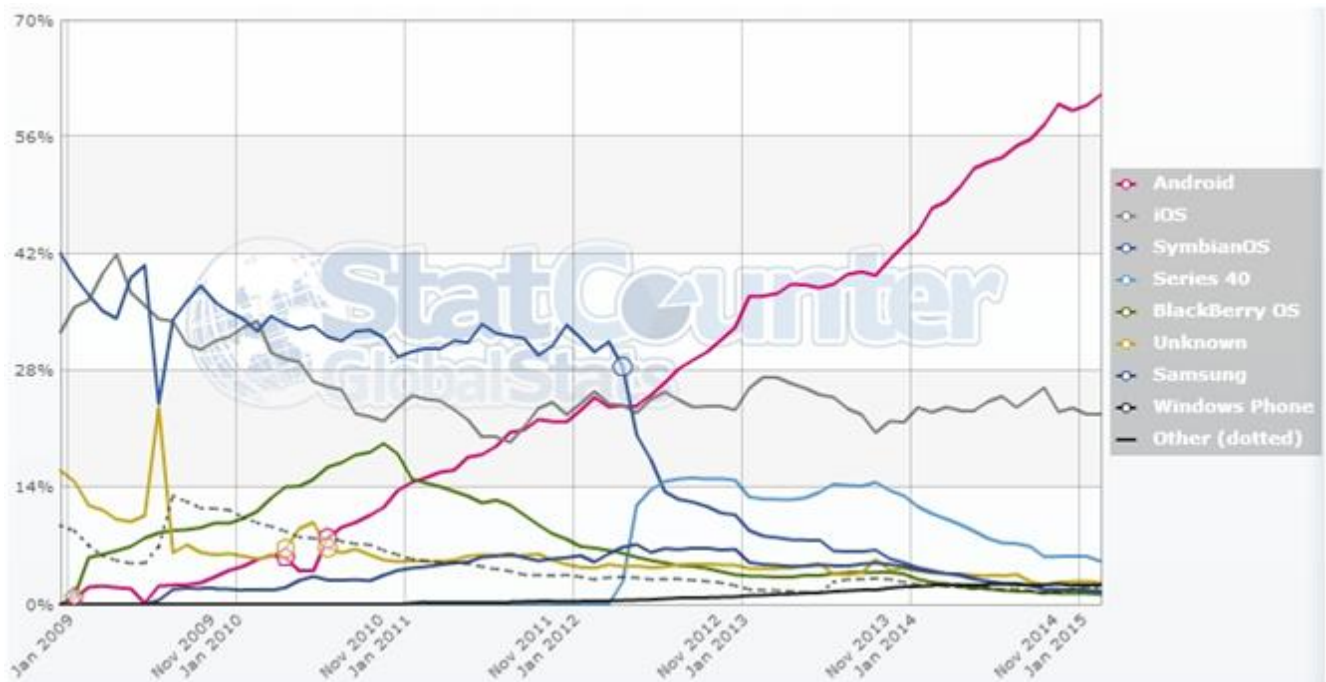


Figura 1 Uso de los sistemas operativos en dispositivos móviles.

De forma resumida, se puede decir que este módulo necesita una serie de datos de los astros del cielo que debe proporcionar el módulo de adquisición de datos. Estos datos son: hora de la

observación, altura del astro, azimut del astro y nombre del astro. En el Anexo I se explican de manera más extendida estas magnitudes.

Con la combinación de estos datos que el módulo de adquisición obtiene y envía, el módulo de procesamiento y presentación podrá hacer uso de tres formas diferentes de cálculo de posición. En este proyecto, se estudiarán los siguientes modos:

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

Para realizar este cálculo, se necesita la altura de tres estrellas o planetas para poder hacer los cálculos. Además, se 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 (salida y puesta de Sol, respectivamente).

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

Para realizar este cálculo, se 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 al mismo tiempo). Cuanto más alejadas en el tiempo estén estas mediciones, menos precisión tendrá el sistema. Por tanto, se 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, pero que requiere de cálculos muy distintos.

A modo de facilitar la comprensión del trabajo, en la Figura 1.1 se puede contemplar un esquema de la relación de los datos de salida y entrada de los diferentes módulos del SAGA para su correcto funcionamiento.

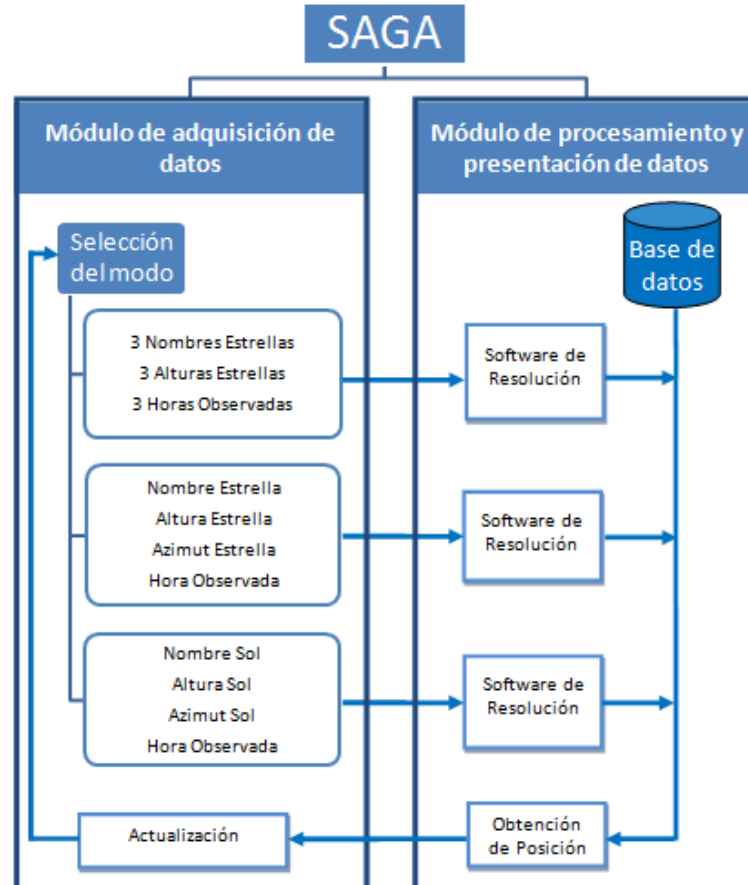


Figura 2 Esquema general

Con este trabajo se pretenden 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 los del 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 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 hablará de aplicaciones ya existentes que abordan problemas referentes a la astronomía y, en el apartado 2.5, se explicará el software que ha sido necesario emplear para llevar a cabo la implementación del proyecto.

En el capítulo 3, se describirá el desarrollo del proyecto. Se centrará en los cálculos necesarios, paso por paso, para poder obtener la geolocalización del usuario. Después de describir los cálculos necesarios, se explicará brevemente cómo se desarrolló el programa en Java, y posteriormente cómo se implementó en Android.

En el capítulo 4, se describen las diferentes pruebas realizadas y se analizan los resultados obtenidos, buscando posibles soluciones y mejoras a los problemas encontrados.

En el capítulo 5, se realiza una valoración global y se exponen las conclusiones del proyecto, así como las líneas de trabajo futuro.

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

Además, para facilitar la comprensión del proyecto a aquellos lectores que no posean conocimientos náuticos o astronómicos previos, se han desarrollado cinco anexos, que se describen a continuación:

En el Anexo I, el lector encontrará una serie de definiciones y explicaciones básicas sobre conceptos náuticos y astronómicos.

En el Anexo II se presenta una breve explicación del movimiento de traslación de la Tierra, así como de elementos importantes que lo componen.

En el Anexo III, se describen los elementos necesarios para describir una órbita elíptica.

En el Anexo IV, se explican los dos tipos de coordenadas que se utilizan en este proyecto.

Y, por último, en el Anexo V, se explicarán ciertas correcciones que hay que hacer debidas a pequeñas variaciones en el movimiento de la Tierra y a los efectos que el propio movimiento genera.

## 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” [3].

#### 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 [3].

- 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 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, normalmente, 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 es 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[4].

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 ya 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 usado en barcos[4] [5].

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 en 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[4].

El SINS se puede enlazar con cualquier otro sistema de navegación: costera, astronómica o electrónica, de modo que se refresque la situación inercial [6].

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 [7].

### 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, 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. A efectos prácticos, las enfocaremos desde un punto de vista útil para el 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 [8].

- Navegación costera.

La 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 [3].

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.

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

**Tabla 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 cumplierse los requisitos

<sup>1</sup> 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%*.

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.

## 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 [9].

- Segmento Espacial.

El segmento espacial está formado por 24 satélites (3 de ellos de reserva) que orbitan circularmente a una 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

Los 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 [7].

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 7 millas náuticas y un ancho de haz de 60° (ver figura 3).



Figura 3 Lóbulo de acción de la antena perturbadora

Durante el ejercicio, se produjeron pérdidas de señal en el GPS de uso civil, produciéndose también fallos en el sistema AIS (*Automatic Identification System* o Sistema de Identificación Automática) y en la señal de INMARSAT (*International Maritime Satellite Organization* o Organización Internacional de Telecomunicaciones Marítimas por Satélite). Además, también sufrieron pérdidas de señal todos los sistemas de ayuda a la navegación apoyados en el GPS.



Figura 4 Fallo en el sistema AIS

En cuanto al GPS de frecuencia militar, también se vio afectado posteriormente cuando el equipo de tierra cambió la frecuencia de perturbación. La recepción de los satélites se redujo de trece a sólo uno, perdiendo el Sistema de Combate la referencia de la posición de la señal de GPS.

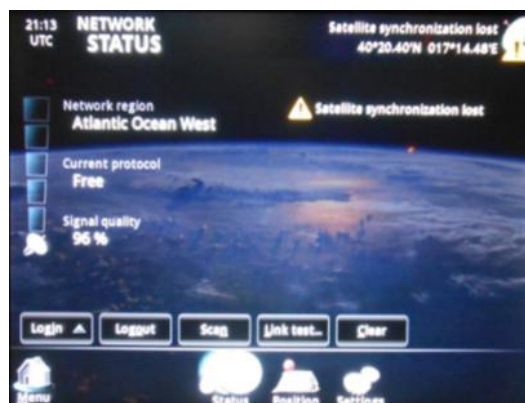


Figura 5 Pérdida de señal en el sistema satélite militar

En un segundo ejercicio, se probaron dos perturbadores portátiles alemanes que se trasladaron a bordo de la fragata. El primero de ellos, diseñado para perturbación de banda civil, tenía un alcance de pocos kilómetros con tan solo 20mW de potencia y una antena acoplada. Según informó su operador, 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 6 Primer perturbador portátil utilizado.**

El segundo perturbador puede actuar tanto en la banda civil como en la militar. 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 7 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[10].

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 de contramedidas electrónicas, no dejan de ser filtros que hacen que la recepción sea peor y no son siempre fiables [11].

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 [12].

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 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 [13].

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, 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 obtener nuestra situación, de cualquiera de las posibles maneras, necesitamos tener ciertos puntos de referencia respecto a los que tomar mediciones. Los sistemas de posicionamiento por satélite, usan el tiempo transcurrido desde la emisión de un pulso electromagnético y la posición calculada de cada satélite para obtener su posición. Los satélites son los puntos de referencia. En la navegación costera, se toman referencias de azimut o de distancia a puntos conocidos de la costa. Estos puntos son los puntos de referencia.

En la navegación astronómica, estos puntos de referencia son los astros, ya sean estrellas, planetas, la Luna o el Sol. El primer paso es obtener datos sobre la posición aparente de los astros en el cielo, ya sea con un sextante o con otro instrumento. Una vez obtenidos los datos, se procesan, para saber desde qué punto de la Tierra se ven los astros en esas posiciones en ese instante determinado. Ese punto será nuestra posición.

### 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 del GPS[14].

Como curiosidad, es interesante saber que para poner los satélites en órbita, las agencias espaciales se basan en la observación del mapa celeste[15]. 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, sobretodo 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 desarrollarse. 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 de 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*, [16] fue desarrollado a comienzos de los años sesenta, pocos años antes de que el sistema TRANSIT fuese declarado operativo. 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 utilizaba las imágenes de un determinado grupo de estrellas para analizarla y mediante un catálogo de estrellas 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 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) [17]. 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 [14].

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 [18].

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 precisión, que se aproxima en unos 17 metros [14].

## 2.4 Aplicaciones/programas existentes

Existen ya varios programas que afrontan el problema de saber la posición aparente de las estrellas a una hora dada en una situación concreta, como la conocida aplicación *Google Sky Maps* [19] o el programa gratuito de código abierto *Stellarium*[20].

El programa *Stellarium* será especialmente útil para realizar pruebas prescindiendo del módulo de adquisición de datos, ya que ofrece la posición aparente de los astros para una situación y un momento determinado con mucha precisión.

Existen también programas que resuelven los problemas de situación astronómica recibiendo los datos de las alturas de los astros, la hora y la situación estimada, 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 [21], 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”. También se sabe de la existencia del programa STELLA, explicado en el apartado anterior.

Y, por último, existe un proyecto de fin de carrera de la *Universitat Oberta de Catalunya*, titulado *Aplicación para la situación geográfica del observador mediante posicionamiento astronómico*[22], en el que se explica cómo se diseñó un programa que resuelve la situación del usuario mediante la observación de alturas de astros tomadas con un sextante. Aunque dicho proyecto no resuelve todos los problemas que se van a abordar aquí, sí que nos servirá de ayuda para plantear nuestros problemas.

## 2.5 Software empleado

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

### 2.5.1 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 se 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, nos ha sido necesario emplear (además de la máquina virtual más común para ejecutar programas escritos en Java) el denominado JDK, que quiere decir *Java Development Kit*, imprescindible para diseñar programas basados en Java. Esta herramienta contiene, entre otras cosas, el JRE (*Java Runtime Machine*) que hace de intermediario entre el sistema operativo

en concreto y Java, y el JVM (*Java Virtual Machine*) que es la aplicación dónde se ejecutan los programas que se diseñan. Estas herramientas han sido descargadas de la página de Internet oficial de Java[23].

### 2.5.2 *Android:*

Es el sistema operativo más utilizado actualmente 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 [24].

### 2.5.3 *Eclipse Luna*

Es un programa [25] 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.

### 3 DESARROLLO DEL TFG

El desarrollo de este TFG se centró en analizar las ecuaciones que serían necesarias para obtener la posición del observador y, una vez estudiadas, adaptarlas al lenguaje de programación Java. Para ello, primero se averiguó cómo obtener las posiciones aparentes de los astros y, después, el trabajo se centró en la resolución de los diferentes problemas. Ésa es la razón de la estructura de este capítulo.

Para la adecuada lectura de este capítulo, se recomienda leer de forma comprensiva todos los anexos de este TFG.

#### 3.1 Obtención de las posiciones aparentes de los astros.

Como se explicó en el apartado 2.3.2, para situarnos en un momento determinado, usaremos la posición aparente en el cielo en la que se observan los astros desde una localización determinada. Una vez obtenida esta posición aparente en el cielo, que se mide en azimut y altura (ver Figura 8), las compararemos con la posición de los astros respecto al meridiano de Greenwich y al ecuador (Horario del astro en Greenwich -HG- y declinación  $-\delta$ -, ver Figura 9) en ese momento determinado.

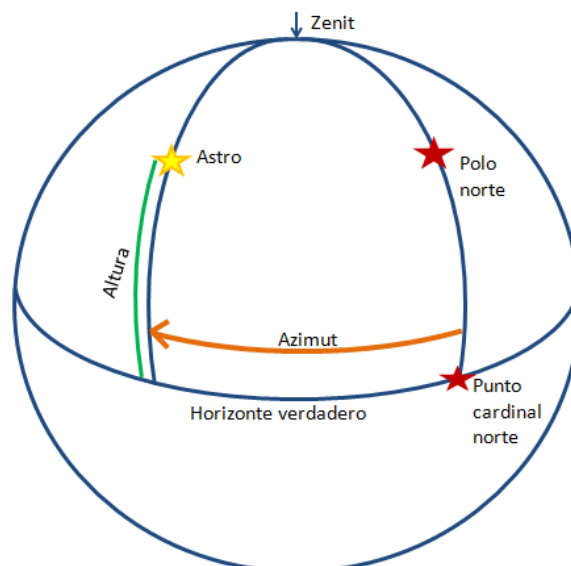
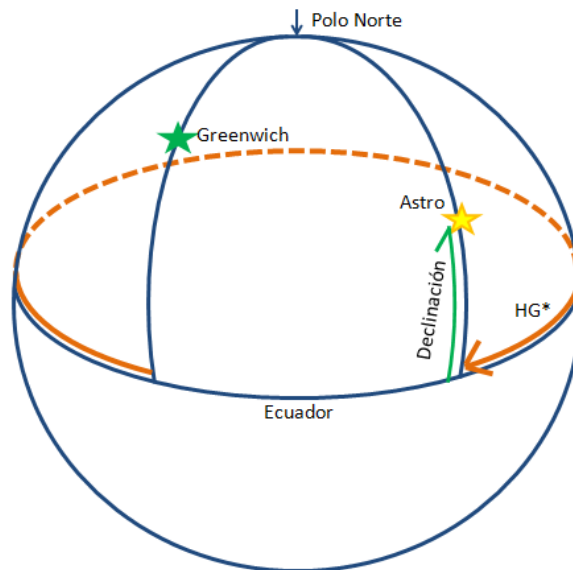


Figura 8 Altura y azimut



**Figura 9** Horario del lugar en Greenwich (HG\*) y declinación

Estos últimos datos, el Horario de Greenwich y la declinación, se pueden calcular, para un momento determinado, sin necesidad de ningún elemento externo (además de la hora) y suponen el primer paso para resolver nuestra situación, además de un paso común y necesario para cualquiera de los métodos utilizados posteriormente para resolver la posición.

### 3.1.1 Catálogo de estrellas

Para el presente proyecto, se empezó trabajando con los datos obtenidos del almanaque náutico del año 2000, ya que los datos de las estrellas del día 1 de enero a las 12 UTC corresponden con los datos de la época J2000. A medida que avanzó el proyecto, se decidió utilizar datos de mayor precisión y emplear también el movimiento propio de las estrellas debido a que para algunas de ellas este movimiento presenta una magnitud considerable. Para ello, se obtuvo un catálogo fundamental (FK5) en [26] y, comparando con los datos obtenidos en [27], se creó un documento con formato TXT llamado “almanaque.txt”, del que se obtendrán los datos en la aplicación.

Este documento contiene en cada línea, y en este orden, el nombre de la estrella, la ascensión recta, su movimiento propio en ascensión recta, su declinación y su movimiento propio en declinación. La ascensión recta figura en horas, minutos y segundos, y la declinación en grados, minutos de grado y segundos de grado. Los movimientos propios figuran en centésimas de segundo de arco.

En la Figura 10 podemos ver una muestra de este documento, que ilustra su formato.

```

Adhara 06:58:37.548 +0.031 -28:58:19.50 +0.28
Al Nair 22:08:14.000 +1.259 -46:57:39.59 -15.10
Alcyone 03:47:29.073 +0.136 +24:06:18.38 -4.60
Aldebaran 04:35:55.237 +0.439 +16:30:33.39 -18.97
Alderamin 21:18:34.769 +2.181 +62:35:08.08 +4.94
Algedi 21:47:02.448 +1.827 -16:07:38.27 -29.66
Algenib 00:13:14.154 +0.019 +15:11:00.8 -1.20
Algol 03:08:10.131 +0.031 +40:57:20.43 -0.09
Alhena 06:37:42.725 +0.293 +16:23:57.44 -4.16
Alioth 12:54:01.748 +1.328 +55:57:35.47 -0.58
Alkaid 13:47:32.434 -1.249 +49:18:47.95 -1.09
Almak 02:03:53.963 +0.404 +42:19:46.99 -5.17
Alnilam 05:36:12.809 +0.006 -01:12:07.02 -0.24
Alnitak 05:40:45.52 +0000 -01:56:33.2 +00000
Alphard 09:27:35.247 -0.093 -08:39:31.15 +3.28
Alpheratz 00:08:23.265 +1.039 +29:05:25.58 -16.33

```

**Figura 10** Muestra del documento *almanaque.txt*

### 3.1.2 Cálculo del Horario en Greenwich de Aries

Para el cálculo de las posiciones aparentes de los astros, será necesario utilizar coordenadas ecuatoriales, y para ello, será también necesario conocer el tiempo sidéreo, u horario de Aries en Greenwich, para la hora de la observación. Para ello, utilizaremos el día juliano (JD) y los siglos julianos (T) del momento de la observación, que se obtendrá de acuerdo a lo establecido en el Anexo I.

El tiempo sidéreo medio en Greenwich ( $\theta_0$ ), expresado en grados, lo obtendremos con la siguiente fórmula:

$$\theta_0 = 280.46061837 + 360.98564736629(JD - 2451545) + 0.000387933 T^2 - \frac{T^3}{38710000} \quad (1)$$

Sin embargo, éste será el tiempo sidéreo medio, y hace falta corregir el tiempo sidéreo por el efecto de la nutación con valor  $\Delta\theta$ .

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\Psi \cos(\varepsilon)}{15 * 3600} \quad (2)$$

Dónde  $\Delta\Psi$  y  $\varepsilon$  son la nutación en longitud y la oblicuidad de la eclíptica, y están explicados en los Anexos II y V, y la división entre 3600 es para transformar el resultado a grados.

El tiempo sidéreo en Greenwich (HGY) que utilizaremos en los apartados que siguen se calcula:

$$HGY = \theta_0 + \Delta\theta \quad (3)$$

### 3.1.3 Posición aparente del Sol

En [28], se plantean dos métodos para obtener las coordenadas del Sol. El primero es más sencillo, porque supone que la Tierra sigue un movimiento puramente elíptico e ignora los efectos de la Luna y los planetas sobre la trayectoria de la Tierra. El segundo es más complejo, ya que tiene estas influencias en cuenta. Debido a que el propósito de este proyecto no es obtener, de momento, una gran precisión, nos será suficiente la precisión de  $36''$  que ofrece el primer procedimiento, y se dejará para líneas futuras mejorar la precisión con el segundo método.

En primer lugar, usaremos los siglos julianos (T), desde la época J2000, según se indica en el Anexo I: Conceptos previos, para tener una referencia temporal. Sabiendo T, podremos calcular la longitud aparente del Sol ( $\lambda$ ), así como la oblicuidad de la eclíptica ( $\varepsilon$ ), según lo descrito en el Anexo II. Una vez hayamos calculado estos dos datos, seremos capaces de obtener la ascensión recta ( $\alpha$ ) y la declinación ( $\delta$ ) del Sol usando las siguientes ecuaciones características del Sol y teniendo en cuenta que, en caso del Sol, a la oblicuidad verdadera ( $\varepsilon$ ), hemos de corregirla.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon + 0^{\circ}.00256 \cos(\Omega) \quad (4)$$

$$\text{sen}(\delta) = \text{sen}(\varepsilon_1) \tan(\lambda) \quad (5)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\cos(\varepsilon_1) \text{sen}(\lambda)}{\cos(\lambda)} \quad (6)$$

Donde  $\Omega$  es la longitud del nodo ascendente de la Luna, y se calcula con la ecuación 8.

La longitud aparente ( $\lambda$ ) del Sol es la longitud referida al equinoccio estándar de la época J2000 si la calculamos con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \theta - 0^{\circ}.00569 - 0^{\circ}.00478 \operatorname{sen}(\Omega) \quad (7)$$

$$\Omega = 125^{\circ}.04 - 1934^{\circ}.136 T \quad (8)$$

Dónde  $\theta$  es la longitud verdadera del Sol, se calculará de acuerdo a las leyes de Kepler, teniendo en cuenta que la longitud media ( $L_0$ ) y la anomalía media del Sol ( $M$ ) son:

$$\theta = L_0 + C \quad (9)$$

$$L_0 = 280^{\circ}.46645 + 36000^{\circ}.76983 T + 0^{\circ}.0003032 T^2 \quad (10)$$

$$M = 357^{\circ}.52910 + 35999^{\circ}.05030 T - 0.0001559 T^2 - 0.00000048 T^3 \quad (11)$$

$$C = (1^{\circ}.914600 - 0^{\circ}.004817 T - 0^{\circ}.000014 T^2) \operatorname{sen}(M) \\ + (0^{\circ}.019993 - 0^{\circ}.000101 T) \operatorname{sen}(2M) \\ + 0^{\circ}.000290 \operatorname{sen}(3M) \quad (12)$$

Una vez obtenidos  $\alpha$  y  $\delta$ , sólo queda obtener el horario del Sol en Greenwich ( $HG_0$ ) para el momento de la observación. Éste se obtendrá de acuerdo al Anexo II, utilizando el  $HGY$  de acuerdo al apartado anterior, y el valor de  $\alpha$  que acabamos de obtener. Una vez obtenidos  $HG_0$  y la  $\delta$ , podremos utilizarlos para obtener nuestra posición, siguiendo los procedimientos explicados en el apartado 3.2.2.3.

$$HG_0 = HGY - \alpha \quad (13)$$

### 3.1.4 Posición aparente de las estrellas

Lo primero que es necesario hacer es corregir la variación de posición de las estrellas respecto a la época debido a su movimiento propio. Este movimiento es pequeño y único para cada estrella. Se corregirá multiplicando la variación anual de la estrella en ascensión recta y declinación por los siglos julianos transcurridos ( $T$ ), y sumando esa corrección a la ascensión recta y la declinación de la época J2000.

$$\Delta\alpha = MP\alpha * T \quad (14)$$

$$\Delta\delta = MP\delta * T \quad (15)$$

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta\alpha \quad (16)$$

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta \quad (17)$$

Siendo, en las ecuaciones anteriores,  $\alpha_0$  y  $\delta_0$  la ascensión recta y declinación obtenidas de la época, y  $MP\alpha$  y  $MP\delta$  los movimientos propios de cada estrella obtenidos también de la época.

Corregiremos estos valores por el efecto de la precesión, de acuerdo al Anexo II, obteniendo  $\alpha_2$  y  $\delta_2$ .

A continuación, debemos corregir los efectos producidos por la nutación de la Tierra y por la aberración de la luz. Ignoraremos los efectos producidos por el paralaje anual, por ser estos en todo caso menores a 0.8" (ver Anexo V).

Añadiendo pues todas estas correcciones, obtendremos las posiciones aparentes de las estrellas a utilizar en sus coordenadas ecuatoriales,  $\alpha$  y  $\delta$ .

Necesitaremos el tiempo sidéreo (HGY) para obtener el valor de HG\* u horario en Greenwich del astro. Con esta coordenada y la declinación, podremos pasar al apartado 3.2 para obtener la situación del observador.

### 3.2 Resolución de los problemas para obtener la situación

Para obtener la situación de un observador, se han contemplado dos formas de cálculo partiendo de las posiciones aparentes de los astros. Una que necesita alturas, nombres y horas de tres astros, y otra que necesita azimut, altura nombre y hora de un único astro.

#### 3.2.1 Resolución con datos de un único astro

Para resolver la situación del observador utilizando la información de un único astro, necesitamos resolver un triángulo esférico oblicuángulo, del que conocemos dos lados (la codeclinación y la distancia cenital) y el ángulo opuesto a uno de ellos (el azimut a la estrella).

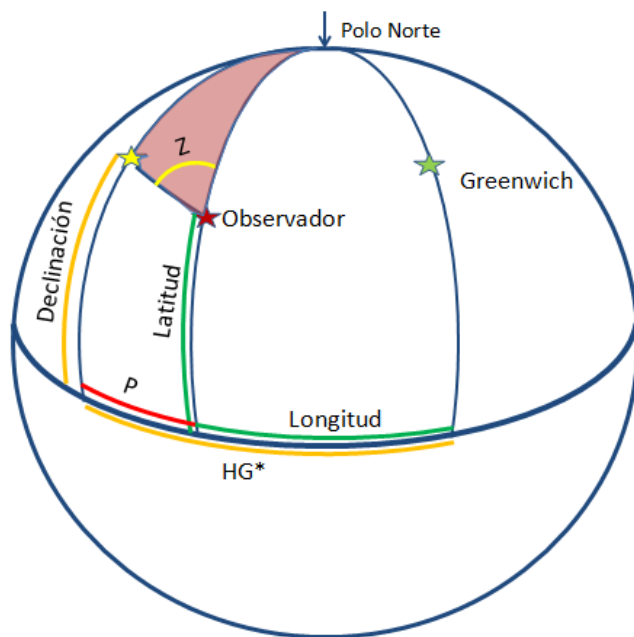


Figura 11 Elementos para situación mediante un astro.

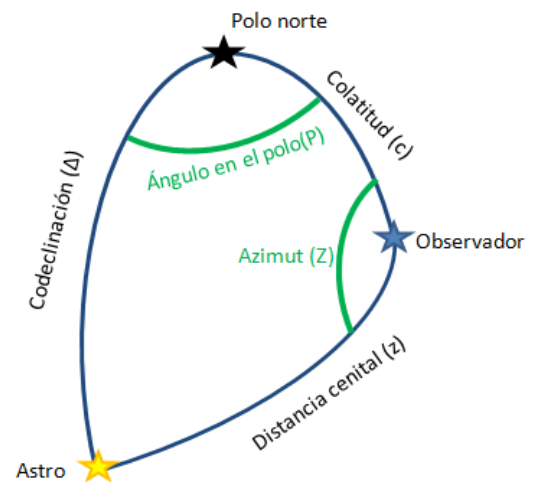


Figura 12 Triángulo de posición

Si nos fijamos en la Figura 12:

$z$  será la distancia cenital, complementario a  $90^\circ$  de la altura al astro.

$\Delta$  será la codeclinación, el complementario a  $90^\circ$  de la declinación del astro.

$c$  será la colatitud, el ángulo complementario a  $90^\circ$  de la latitud del observador.

$Z$  será el azimut al astro.

$P$  será el ángulo en el polo.

Utilizaremos las fórmulas recomendadas en [29] para resolver este problema:

$$\text{sen}(P) = \frac{\text{sen}(z)}{\text{sen}(\Delta)} \text{sen}(Z) \quad (18)$$

$$\tan\left(\frac{c}{2}\right) = \tan\left(\frac{\Delta + z}{2}\right) \frac{\cos\left(\frac{Z + P}{2}\right)}{\cos\left(\frac{Z - P}{2}\right)} \quad (19)$$

Una vez obtenidos la altura, azimut y declinación de cualquier astro, como se explica en el apartado 3.1, y utilizando estas fórmulas, habremos obtenido la colatitud y el ángulo en el polo. Esto significa que ya tenemos resuelta la latitud. Y ahora, con el horario en Greenwich de Aries y el ángulo sidéreo del astro, podremos obtener también la longitud:

$$L = (HG^\circ) - P \quad (20)$$

De acuerdo a [29], pueden existir indeterminaciones si se utiliza este método de cálculo, así que estudiaremos esta posibilidad con la tablas proporcionadas por [29]. Las indeterminaciones, debido a que en el caso astronómico que se quiere resolver todos los lados del triángulo son menores de  $90^\circ$ , se ven reducidos a las que se muestran en la Tabla 2.

$Z < 90^\circ$			Nº de soluciones
$z < 90^\circ$	$\Delta < z$	$\Delta < \rho$	0
		$\Delta = \rho$	1
		$\Delta > \rho$	2
	$\Delta = z$		1
	$\Delta > z$	$\Delta + z < 180^\circ$	1
		$\Delta + z \geq 180^\circ$	0

**Tabla 2 Indeterminaciones resultantes al calcular con un único astro.**

En la Tabla 2  $\rho$  es el perpendicular trazado desde el ángulo desconocido comprendido entre  $\Delta$  y  $z$ , llamado ángulo paraláctico. En [29], también se nos facilita la comprensión y resolución de estas indeterminaciones.

La primera se produciría si, en algún momento, la codeclinación fuese más pequeña que el perpendicular. Esta situación sólo sería posible si  $z$  fuese mayor de  $90^\circ$ , o si lo fuese  $c$ , pero al estar ambos casos descartados, esta indeterminación no se dará en este problema.

La segunda se produciría si la codeclinación fuese mayor que el perpendicular. Según [29], en este caso, se podrían producir dos soluciones del ángulo en el Polo.

Y, por último, si la suma de la codeclinación y la distancia cenital fuese mayor de  $180^\circ$ , lo que no se dará en ningún caso al ser ambos siempre menores de  $90^\circ$ .

### 3.2.2 Resolución con datos de tres astros (Método de las bisectrices)

Las características más importantes de este método se enumeran a continuación. Está basado en la resolución gráfica, manual y tradicional de resolución por bisectrices de rectas de alturas y, por lo tanto, necesita una situación estimada y ángulo en el polo estimado. Al usar tres alturas, eliminaremos errores sistemáticos lo que nos dará más precisión. Además nos permitirá hacer iteraciones y utilizar

situaciones estimadas que difieran mucho de la real. Puede también prescindir, como en el método tradicional, del dato del azimut, ya que se calcula un azimut estimado.

### 3.2.2.1 Ángulo en el polo

A partir del  $HG^*$ , calculado en el apartado 3.1, podemos obtener el ángulo en el polo (P), si partimos de una situación estimada (Se). Sobre qué situación estimada usar, hablaremos en el siguiente apartado.

De acuerdo con el Anexo II, la forma de calcular el ángulo el polo es la siguiente:

$$Hl = HG - Le \quad (21)$$

Donde  $Hl$  es el horario en el lugar del astro, y  $Le$  la longitud estimada. La única diferencia entre el horario en el lugar y el ángulo en el polo, es que el horario en el lugar se mide desde la situación hasta al astro, hacia el oeste exclusivamente, y el ángulo en el polo hacia el este o hacia el oeste, lo que resulte en un valor menor de  $180^\circ$ . Por ello, el ángulo en el polo siempre será este u oeste.

Lo que implementaremos en la aplicación será:

Si  $Hl > 180^\circ$  entonces  $P = 360^\circ - Hl$  y además tendrá signo E (Este).

Si  $Hl \leq 180^\circ$  entonces  $P = Hl$  y tendrá, en cambio, signo W (Oeste).

### 3.2.2.2 Situación estimada

Como hemos visto en el apartado anterior, uno de los problemas de usar métodos que utilicen alturas, es que necesitamos otro punto de referencia para los cálculos, la situación estimada. Esta situación afectará al azimut y a la altura estimada y, por lo tanto, a la situación final que obtengamos. Cuanto más se acerque la situación estimada a la situación real, con más exactitud obtendremos la situación real.

Esto es un inconveniente, ya que este sistema resulta efectivo cuando se lleva un registro de las situaciones y de los movimientos del usuario (como se hace en los barcos); pero nos hace plantearnos cómo obtener una situación estimada si no se dispone de una (como es el caso de un terminal móvil).

Se ha resuelto este problema teniendo en cuenta que desde un terminal móvil además de la altura obtendremos la demora magnética del astro, con lo que seremos capaces de resolver la situación de una forma aproximada, utilizando el procedimiento descrito en el apartado 3.2.1 lo que nos permitirá utilizar esa situación como situación estimada inicial, con la que llevar a cabo un proceso iterativo de mejora de los resultados.

### 3.2.2.3 Cálculo de azimut y altura verdadera

El azimut será necesario calcularlo exclusivamente en aquellos casos en los que no se disponga de él y sólo se disponga de la altura de diferentes astros. Evidentemente, si ya se dispone del azimut porque ya haya sido proporcionado por un sensor y su precisión es lo suficientemente buena, no hará falta utilizar las siguientes ecuaciones para obtención del mismo.

En el presente proyecto, el módulo paralelo de adquisición proporcionara datos de azimut pero éstos serán de mala precisión, por ser respecto al norte magnético. Por ello, será necesario calcular el azimut.

Para obtener la posición del observador, partiendo de los ángulos en el polo y las declinaciones de tres astros, seguiremos los siguientes pasos:

1. Obtener el Azimut(Z):

$$Z = \arctan\left(\frac{1}{p * \cos(\varphi e)}\right) \quad (22)$$

$$p = p' + p'' \quad (23)$$

$$p' = \frac{\tan(\delta)}{\tan(P)} \quad (24)$$

Así,  $p'$  será positivo si la latitud estimada ( $\varphi e$ ) y la declinación ( $\delta$ ) tienen el mismo signo y negativo, si no lo tienen.

$$p'' = -\frac{\tan(\varphi e)}{\tan(P)} \quad (25)$$

Así,  $p''$  será positivo si  $P > 90^\circ$  y negativo, si  $P < 90^\circ$ .

Además el azimut será cuadrantal, y norte, si  $p$  es positivo, y sur, si  $p$  es negativo. Será este u oeste, de igual forma que el ángulo en el polo.

2. Obtener la diferencia de alturas ( $\Delta a$ ):

$$\Delta a = av - ae \quad (26)$$

Donde  $av$  es la altura verdadera, la observada ya corregida, y la  $ae$  es la altura estimada para la hora de la observación en la situación estimada.

$$ae = \arccos(\sin(\varphi e)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(P)) \quad (27)$$

Como normal general, para la obtención de la altura verdadera se sigue la siguiente ecuación:

$$av = ao \pm SD - D - R + P + ci \quad (28)$$

Donde:

- $ao$ : Es la altura observada, en el cielo, sin correcciones.
- $SD$ : Corrección por semidiámetro. Producida al tomar alturas al limbo inferior o superior. Sólo afecta a las alturas del Sol y de la Luna, y suponiendo que se tomen a un limbo (con el sextante). Por ello, en este proyecto no se ha tenido en consideración, ya que se apuntará al centro de los astros.
- $P$ : Corrección por paralaje. Se debe a la distancia entre el punto terrestre del observador y el centro de la Tierra, que es el usado para los cálculos. Sólo afecta en el caso del Sol, Luna o planetas y para cada caso, existen unos cálculos particulares.
- $D$ : Corrección por depresión del horizonte. Afecta únicamente a las alturas tomadas respecto al horizonte visible. La ecuación para hallarla únicamente depende de la elevación ( $H$ ) del observador respecto al nivel del mar expresado en minutos:

$$D = 1.8 \sqrt{H} \quad (29)$$

- $R$ : Corrección por refracción de la luz. Es siempre negativa, y la podremos calcular:

$$R = \frac{1}{\tan\left(ao + \frac{7.31}{(ao + 4.4)}\right)} \quad (30)$$

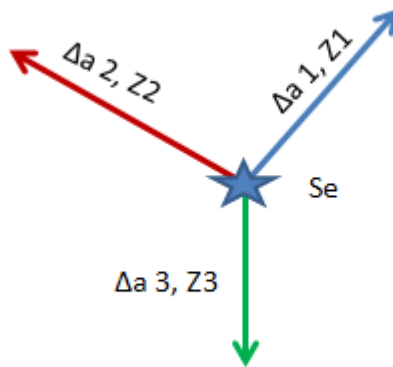
Esta fórmula nos da un error máximo de  $4''$ , si la altura es cercana a  $12^\circ$ , y tiene buena precisión para todas las alturas.

- *ci*: Corrección de índice. Se debe a un error sistemático y fijo, que depende de cada instrumento de medición. Debe ser introducido por el usuario si se utiliza un sextante. En el caso de la aplicación será necesario calibrar el móvil con la función “calibrar” para introducir ésta corrección de índice.

### 3.2.2.4 Resolución por bisectrices de tres rectas de altura.

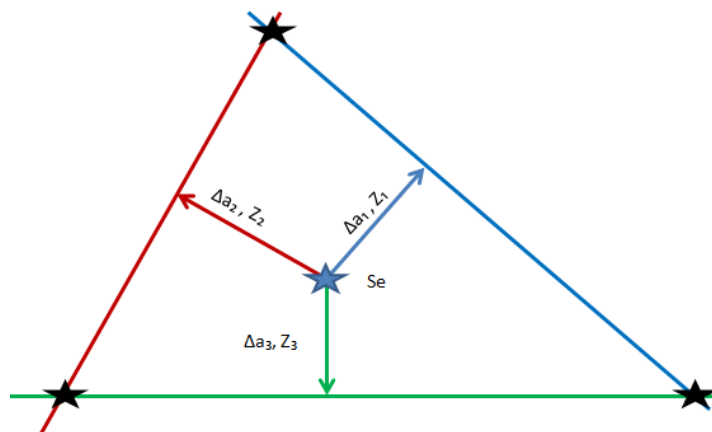
Llamamos recta de altura a la recta en la que el observador debería estar para observar a un astro con una determinada altura. En realidad, es una circunferencia esférica sobre la Tierra centrada en el punto que tiene a ese astro en el zenit, con un radio igual a la distancia cenital con la que se observaría el astro.

Para dibujarla, necesitamos la situación estimada, la altura con la que se verían los astros en esa situación estimada (altura estimada), la altura verdadera y el azimut. Todos estos datos se obtienen en los apartados anteriores.



**Figura 13 Trazado de diferencia de alturas.**

En el extremo opuesto a la situación estimada, se traza una perpendicular al segmento, y se prolongan las rectas hasta que corten con las otras dos rectas. Resultan así tres segmentos pertenecientes a las rectas de altura de cada astro.



**Figura 14 Trazado de rectas de altura.**

Una vez obtenidos los lados del triángulo, se deben trazar las bisectrices interiores de los ángulos, y el punto en el que se corten las tres será la situación del observador.

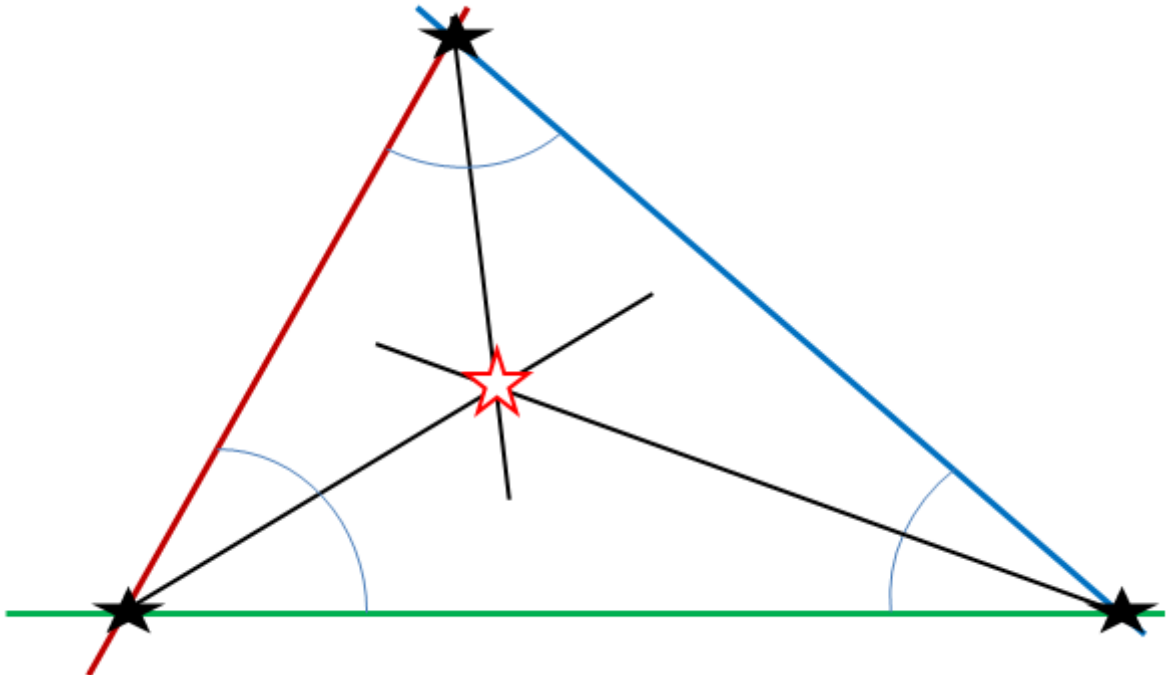


Figura 15 Trazado de bisectrices.

Éste es un método simplificado del método tradicional enseñado en la Escuela Naval Militar, ya que, según [30], en función del ángulo con el que se corten las rectas de alturas, las bisectrices pueden ser de ángulos interiores o exteriores. Se verá más adelante, en el capítulo 4, cómo influye esta simplificación y las líneas futuras en las que puede derivar.

Para utilizar este método ha sido necesario hacer cálculo analítico con coordenadas cartesianas, para lo que nos hemos basado tanto en [31] como en [32].

### 3.3 Implementación en Java

En las primeras semanas de trabajo, se desarrolló únicamente un programa en lenguaje Java, sin utilizar Android, para garantizar que el programa funcionara antes de pasar a la siguiente parte del proyecto, la implementación en Android. En este apartado, se describen brevemente las clases que se desarrollaron y la relación entre ellas.

#### 3.3.1 Clase FechaHora

Ésta es una clase muy sencilla, que únicamente contiene el año, el mes, el día, la hora, los minutos y los segundos, del momento que se quieren calcular. La fecha está en el común calendario Gregoriano y la hora será UTC. El propósito de esta clase es simplificar el desarrollo de la aplicación.

#### 3.3.2 Clase Input

Es la clase diseñada para poder relacionarse con cualquier tipo de dispositivo, ya que incluye todos los datos que se necesitarían por parte de un sistema externo para que el programa pueda desarrollar los cálculos. Entre ellos, se incluyen el nombre del astro, la altura, el azimut y un objeto del tipo FechaHora.

### 3.3.3 Clase Astro

Para empezar cualquier problema astronómico, se ha de comenzar, como se explica en el apartado 3.1, por obtener la posición aparente de las estrellas. Los objetos de la clase *Astro* contendrán todos los atributos necesarios para la resolución de los problemas, como el horario en Greenwich del astro, la declinación, la hora a la que está en esa posición aparente, etc. El constructor de esta clase ya contiene todas las operaciones y todas las correcciones necesarias para que, al crear un objeto de la clase *Astro*, se cree con todos atributos necesarios para usarlo en los problemas.

Para crear un objeto de la clase *Astro*, necesitaremos un objeto de la clase *Input* y una época (ver Anexo I).

### 3.3.4 Clase Situación

Esta clase únicamente tiene como atributos la latitud y la longitud obtenidas, junto con el nombre del método utilizado para la resolución del problema. Al crear un objeto del tipo *Situación*, se ejecutan los métodos internos de resolución de problemas astronómicos detallados en 3.2, para asignar a este objeto la latitud y la longitud obtenidas.

Hay que mencionar que la clase *Situación* contiene una clase llamada “Sol”, que es una subclase de la clase *Astro*, y que fue necesaria debido a las notables diferencias que existen en los métodos de cálculo para obtener las posiciones aparentes de los astros y del Sol.

Para crear una *Situación*, será necesario aportar un *Input*, (o una matriz de *Inputs*) y una época. En un inicio, la propia clase *Situación* creaba su propia época, pero para no malgastar recursos en el diseño de la aplicación en Android, se decidió usar el ya mencionado archivo *almanaque.txt*, y crear un *HashMap* (ver 3.4.1) nada más arrancar la aplicación. Es importante mencionar esto, para dejar claro que aunque en la aplicación final la clase *Situación* no es independiente totalmente por necesitar del móvil la época, lo puede ser fácilmente si se cambiara de sensor.

En la Figura 16 se muestra un esquema general de cómo se crean las situaciones.

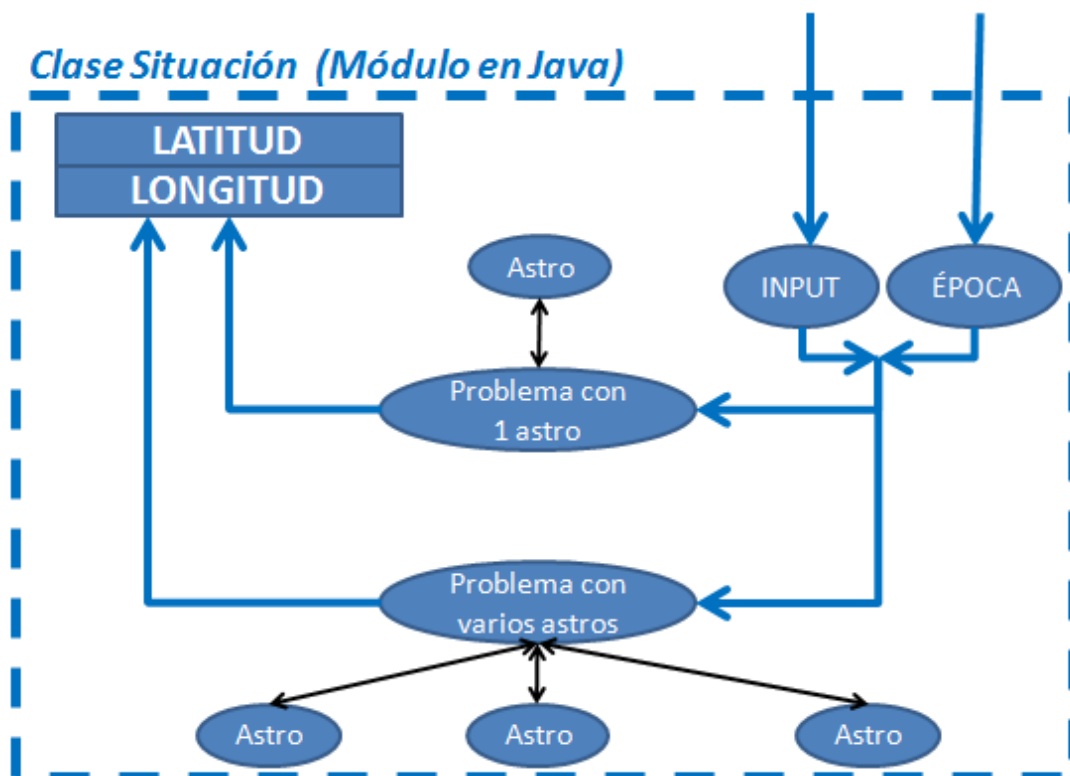


Figura 16 Esquema del constructor de la clase *Situación*.

### 3.4 Implementación en Android.

Como ya se explicó en 1.2, Para realizar pruebas con el módulo complementario fue necesario adaptar el programa desarrollado en Java para desarrollar una aplicación móvil en el sistema operativo Android. Gracias a que Android utiliza también el lenguaje Java, no fueron necesarios grandes cambios ni añadiduras para que esta aplicación fuera posible. Sin embargo fue necesario seguir una serie de pasos para llegar a la creación de esta aplicación.

#### 3.4.1 HashMap

Se utilizó esta herramienta de Android para no malgastar recursos. Al arrancar la aplicación, se crea un *HashMap* que contiene los datos almacenados en el archivo *almanaque.txt* del que se habló en el apartado 3.1.1. Este *HashMap*, sólo se crea una vez y se usa siempre el mismo mientras se ejecuta la aplicación. Es utilizado para crear los objetos *Astro* necesarios para obtener las posiciones aparentes.

#### 3.4.2 Cámara y sensores.

Debido a las conclusiones y desarrollo del módulo de adquisición de datos, será necesario integrar en esta aplicación código aportado por este módulo, que se resumirá en una *Activity* llamada *Cámara*. Esta *Activity* será la que obtenga a partir de los datos de los sensores del dispositivo, la altura y el azimut magnético del astro. Será necesaria la cámara para que el usuario pueda apuntar a los astros correctamente y obtener datos de mejor precisión.

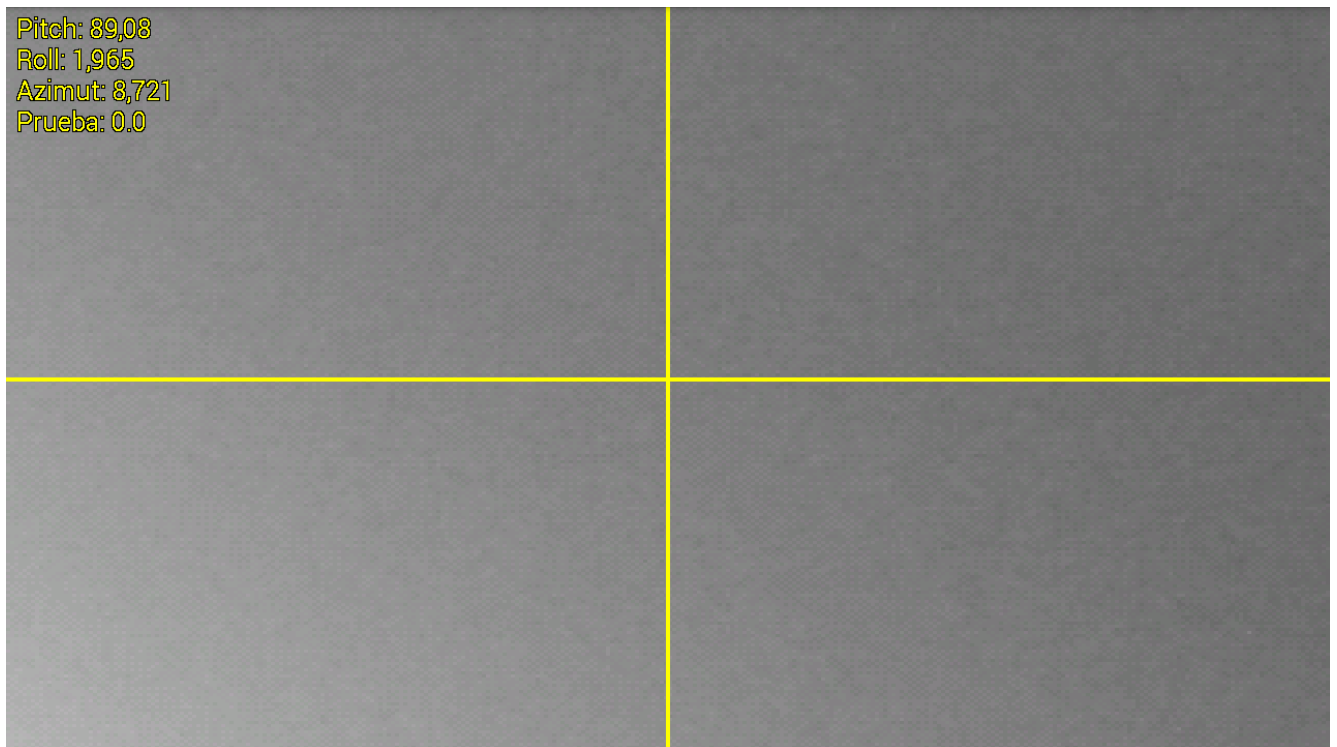


Figura 17 Pantalla de la Activity *Cámara*.

#### 3.4.3 Estructura de la aplicación

En líneas generales, la aplicación tiene cuatro modos de funcionamiento. En función de cuántos astros se quieran utilizar, y de si se quieren introducir los datos manualmente o se quieren utilizar los sensores del terminal para obtener la posición.

1. Modo manual para un astro: Calculará la situación que cumpla con los datos que el usuario introduzca (altura, azimut, nombre del astro y hora UTC).

2. Modo manual para tres astros: Calculará la situación que cumpla con los datos que el usuario introduzca, que han de ser los mismos que en el modo anterior, pero repetidos tres veces.
3. Modo *Cámara* para un astro: Utilizará la *Activity* desarrollada por el módulo paralelo para obtener los datos, y obtener la posición con ellos.
4. Modo *Cámara* para tres astros: Funciona de igual manera que el anterior, pero con tres astros.

Los cálculos de este proyecto se integrarán en una *Activity* llamada *Resultados*, que será la que calcule y presente al usuario la posición obtenida. El resto de la aplicación se utilizará para interactuar con el usuario y que éste elija entre las distintas opciones para obtener su situación. En la Figura 18, podemos ver un esquema general del funcionamiento de la aplicación.

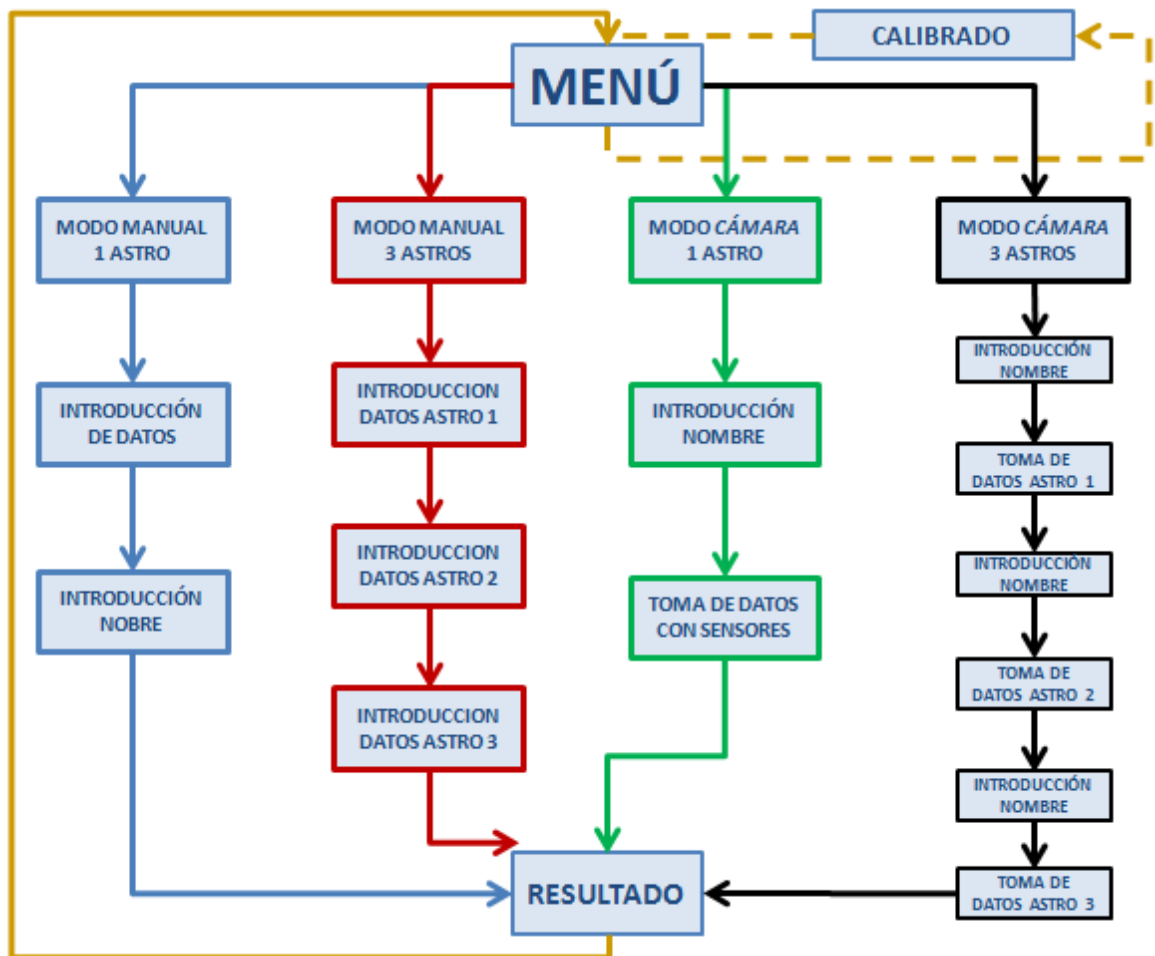


Figura 18 Esquema general de funcionamiento de la aplicación integrada.

## 4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

El objetivo de este capítulo es recoger las pruebas realizadas tanto con el programa Java como con la aplicación integrada en un teléfono móvil, con el objetivo de averiguar la fiabilidad, precisión y exactitud que se han conseguido en ambos casos. Encontraremos varios apartados, en función de si se pone a prueba el programa Java (usando datos manuales) o la aplicación móvil (con los datos de los sensores del mismo), así como de las herramientas y métodos utilizados para llevar a cabo las pruebas.

### 4.1 Pruebas realizadas con *Stellarium* y *Navigator*

Estos programas se utilizaron desde el comienzo del TFG para realizar comprobaciones a medida que se iba desarrollando el programa. Las pruebas que se iban realizando en dicha fase no se han recogido en la memoria porque no buscaban estudiar la precisión o exactitud del programa, sino que suponían una herramienta para el desarrollo del mismo.

Una vez completado el programa Java, hacían falta herramientas para probarlo, y hasta que consiguió su integración con el código escrito por el módulo de adquisición de datos, se recurrió a estas herramientas.

En la Figura 19 y la Figura 20 podemos ver capturas de pantalla de ambos programas.

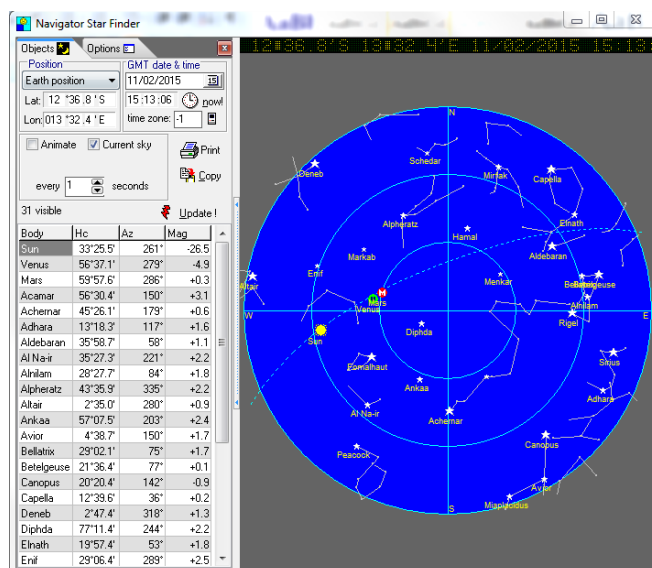


Figura 19 Captura de pantalla del programa *Navigator*.



Figura 20 Captura de pantalla del programa Stellarium.

#### 4.1.1 Pruebas con el problema de un astro

En este apartado se recogerán las pruebas realizadas con el Stellarium y el Navigator para evaluar el funcionamiento del programa al resolver el problema de obtener la situación con un sólo astro.

En primer lugar, se realizaron pruebas introduciendo en el programa los datos exactos de estrellas que ofrecían tanto el Stellarium como el Navigator. Durante esta fase de pruebas, se alcanzaron diferencias entre la posición teórica y la obtenida de hasta 4,5 millas náuticas, sin embargo, en la mayoría de los casos, los errores no superaban la milla náutica. La media geométrica de todas las mediciones fue de 0.97 millas náuticas de error (1791m). En la Figura 21 podemos apreciar una captura de pantalla de la tabla Excel que recoge estos datos.

lat	long		DISTANCIA (M)	DISTANCIA (MN)	
33	45,4786	108	53,588	<u>1091,048417</u>	<u>0,589119016</u>
29	59,3953	36	53,8068	<u>1163,098968</u>	<u>0,628023201</u>
30	0,0803	36	53,643	<u>592,1445539</u>	<u>0,319732481</u>
19	29,3129	6	17,3624	<u>1692,288331</u>	<u>0,913762598</u>
19	30,2954	6	18,1798	<u>631,3340725</u>	<u>0,340893128</u>

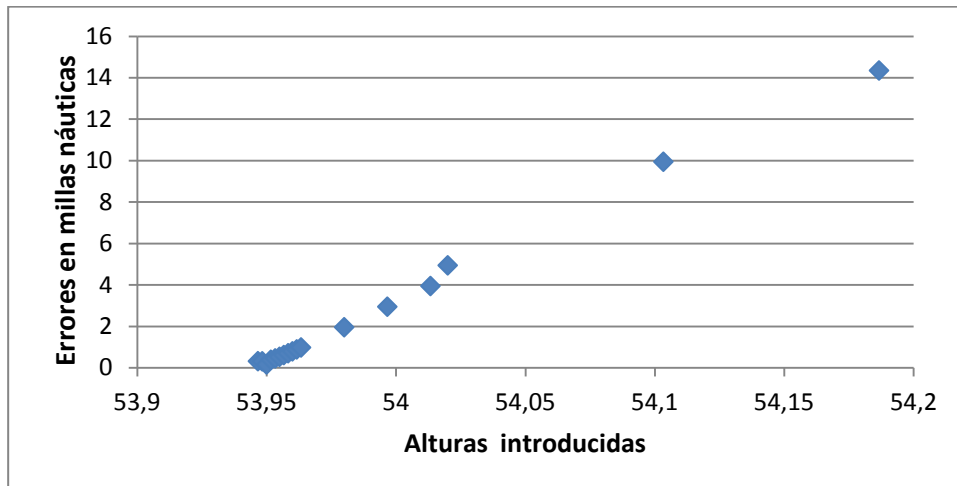
Figura 21 Resultados del problema con un astro.

Se realizaron las mismas pruebas con el Sol, ya que sus cálculos son distintos y el método de una estrella es especialmente interesante para este astro. La precisión obtenida fue buena y, en este punto, también el Navigator y el Stellarium presentaron entre sí diferencias de hasta más de un kilómetro al ejecutar el problema con sus datos. En la Figura 22 se ven los resultados obtenidos para el Sol, en la tabla Excel hecha para el caso.

lat	long		DISTANCIA (M)	DISTANCIA (MN)	
30	0,0803	36	53,643	<u>592,1445539</u>	<u>0,319732481</u>
29	59,9804	36	53,6396	<u>579,7316295</u>	<u>0,313030038</u>
29	59,8804	36	53,8804	<u>293,2974788</u>	<u>0,158367969</u>
29	59,7805	36	53,6327	<u>716,4436484</u>	<u>0,386848622</u>
29	59,6805	36	53,6292	<u>839,7509203</u>	<u>0,453429223</u>

Figura 22 Resultados para el Sol, problema de 1 astro.

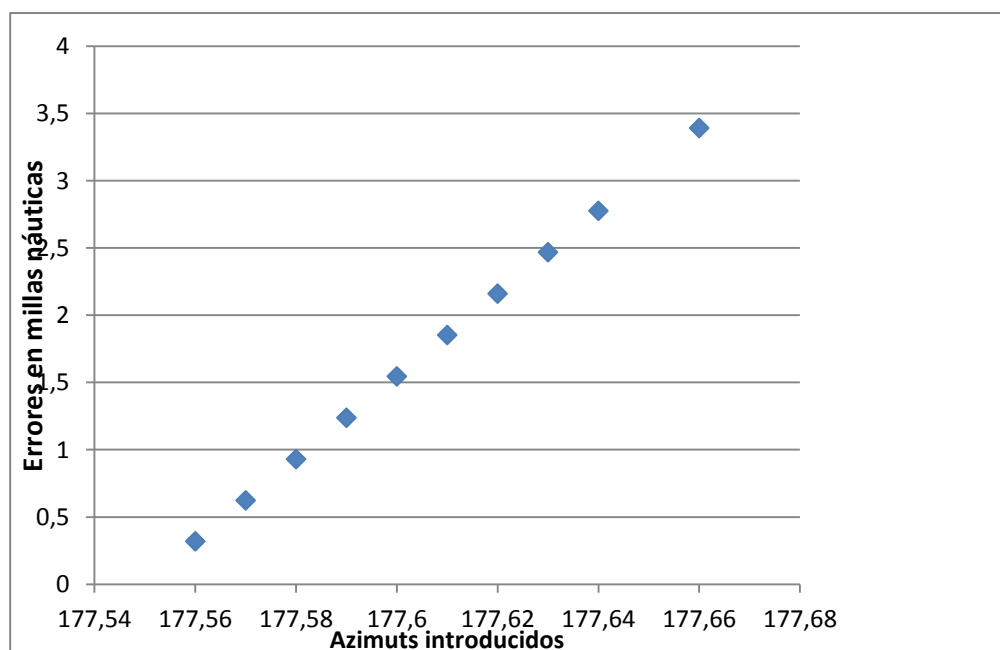
En el siguiente y último paso de este apartado, se introdujeron errores primero en la altura, y después en el azimut, gradualmente, para averiguar la forma en que estos datos afectan a la situación obtenida. Como se puede ver en la Figura 23, la altura tiene un efecto prácticamente lineal sobre el error que se comete, o diferencia entre la situación obtenida y la real. A efectos prácticos, un minuto de altura implicó una milla de error. Esto quiere decir que las especificaciones de un sensor que pretenda obtener situaciones con una exactitud de 100 metros, con este método, serán de una precisión y exactitud tales que permitan tomar datos de hasta 0.05 minutos, o de 3 segundos de arco. Lo cual se valorará en el capítulo 5.



**Figura 23 Influencia de la altura en el error.**

Posteriormente se realizó el mismo tipo de prueba con el azimut. Como se refleja en la Figura 24 y en la Figura 25, la variación de una centésima de azimut provoca un error en distancia de 0.3 millas náuticas o 600 metros aproximadamente, y la variación de una décima de grado implica un error de 3 millas náuticas (6 Km aprox.) Esto significa que, si se necesitara obtener la situación con un error máximo de 100 metros, utilizando éste método, se necesitaría un azimut que fuera exacto hasta la milésima de grado en azimut ( $0.00166^\circ$ ). Esto es complicado y se valorará en el capítulo 5.

Hay que destacar que estos datos no son exactos ya que el azimut y la altura no influyen de igual manera a lo largo del día en la situación obtenida. Pretenden servir únicamente como orientación.



**Figura 24 Influencia de la variación de la centésima de azimut en el error.**

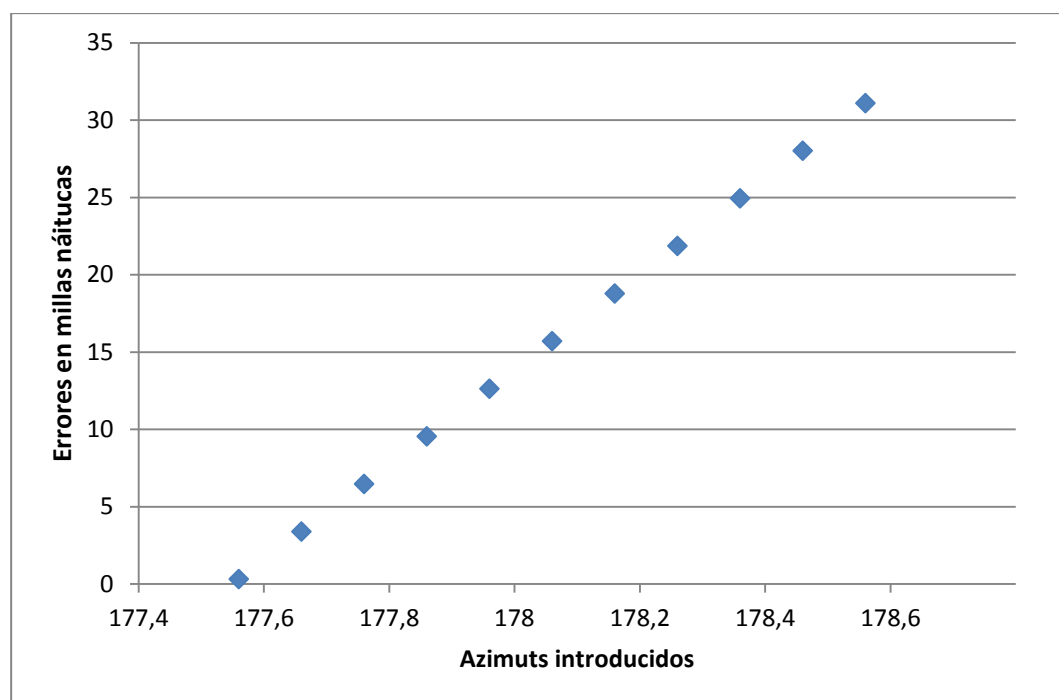


Figura 25 Influencia de la variación de la décima de azimut en el error.

#### 4.1.2 Pruebas con el problema de tres astros

Las pruebas con el problema de los tres astros se realizaron tomando tres alturas y el azimut del primer astro, debido a que el programa está diseñado para móvil, como se comentó en 3.2.2.2. Los datos se tomaron tanto del programa *Stellarium* como del *Navigator*, resultando que los proporcionados por el segundo resultaban en errores más pequeños y menos frecuentes, por lo que se optó por este programa únicamente al final de las pruebas. Los errores eran normalmente de entre 0.5 y dos millas náuticas. Hay que resaltar que, aunque parezca que este método es menos exacto que el de obtener datos de un único astro, los datos que se usan no han de tener la misma precisión que la que tenían los datos con los que se realizaron las pruebas en el apartado anterior. Podríamos concluir que éste método no puede llegar a dar tanta precisión como el anterior, pero requiere mucha menos calidad de los datos para obtener posiciones aceptables, de dos millas de error de media.

También se observó que la calidad de la situación observada dependía en gran medida de los ángulos que formasen las estrellas. Así los resultados de mayor calidad se obtenían cuando las estrellas estaban separadas  $120^\circ$  entre sí. Esto es resultado de usar únicamente el procedimiento de las bisectrices internas mencionado en el apartado 3.2.2.4. Es más, si se usan dos estrellas que estén separadas en azimut  $180^\circ$  aproximadamente, el programa dará error o una situación de muy mala calidad, ya que las rectas de altura no se cortan o se cortarán muy lejos de la posición real. Esto supone una limitación que se tratará en el capítulo 5.

En resumen, este método da muestras de ser más robusto ante los errores o falta de precisión en los datos, pero hay que escoger adecuadamente las estrellas de las que tomar datos. En la Figura 26 podemos observar una captura de pantalla de datos obtenidos por este procedimiento.

FECHA	HORA(Z)	LAT	lon	lat	long	DISTANCIA (M)	DISTANCIA (MN)				
05/03/2015	14:33:11	-6	0	64	48	-5	-57,46	64	49,22	<u>5218,244259</u>	<u>2,81762649</u>
05/03/2015	14:33:11	0	45	-163	-48	0	45,21	-163	-47,32	<u>1319,203631</u>	<u>0,712312976</u>
05/03/2015	14:33:11	19	30	-6	-18	19	30,2614	-6	-15,118	<u>5059,493744</u>	<u>2,731908069</u>
05/03/2015	14:33:11	-45	-31	152	18	-45	-29,3269	152	20	<u>4046,222814</u>	<u>2,184785537</u>
05/03/2015	14:33:11	30	12	50	37	30	4,54	50	34,248	<u>14515,66863</u>	<u>7,837834032</u>

Figura 26 Resultados para el problema con 3 astros.

## 4.2 Pruebas realizadas con problemas reales

Para la prueba del módulo de procesamiento y presentación, se planteaba la duda de si los programas que se utilizan para obtener los datos son de suficiente fiabilidad. Para obtener alturas y azimuts de fiabilidad perfecta, parece evidente que la única solución consiste en utilizar datos reales, obtenidos directamente del cielo.

El problema fue que la meteorología en la Comunidad Autónoma de Galicia no favorece especialmente las observaciones astronómicas, por lo que no se podían realizar muchas pruebas con datos reales. Por ellos se recurrió a otro recurso, se utilizaron los problemas de observaciones astronómicas que los alumnos de la 5ª brigada del curso 2014-2015 habían realizado durante el LXXXVII crucero de instrucción a bordo del “Juan Sebastián de Elcano”.

Antes de analizar los resultados, debemos decir que no todas las observaciones que se recogieron fueron útiles, ya que muchas de ellas no contenían datos correctos, y daban mucho error. Esto se debía principalmente a que el alumno que tomó las alturas no logró hacerlo con la suficiente precisión.

En aquellos casos en que los datos sí eran de buena calidad, se apreció de mejor manera el problema que supone que el programa sólo utilice el método tradicional de las bisectrices internas. Este método en las prácticas de observación astronómica difícilmente se daba, lo que se traduce en errores de varias millas respecto a las posiciones obtenidas en los problemas. Aún así, los errores no superaban las 5 millas náuticas.

En resumen, utilizando este método de prueba, se pudo analizar la resolución gráfica de los problemas y entender que contemplar únicamente el método de las bisectrices interiores no es suficiente. En el capítulo 5 se tratará esta limitación y sus posibles soluciones.

En la Figura 27 podemos ver uno de los problemas utilizados. En este caso, aportado por el AF Bellas Arribas.

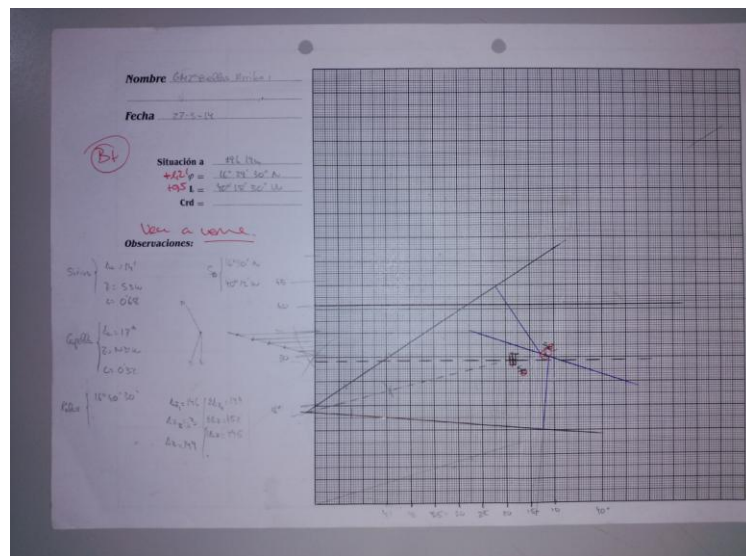


Figura 27 Cara frontal de un problema de situación al crepúsculo.

### 4.3 Pruebas realizadas con integración de módulos

Estas pruebas se limitaron 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 observaciones nocturnas. La Luna llena influyó porque la cámara del teléfono móvil utilizado en las pruebas (Huawei Ascend 6630) tiene la suficiente sensibilidad como para visualizar estrellas.

Así que, limitándose 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 Figura 28.

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>

Figura 28 Primeras observaciones del Sol.

Tras muchas pruebas, se dedujo que los principales problemas fueron los siguientes:

- El azimut magnético variaba mucho en función de en qué sitio se situaba el trípode, se veía muy influido por errores accidentales.
- El móvil utilizado no utilizaba la red de telefónica o de datos, y la hora del terminal estaba retrasada dos minutos.
- El trípode se veía 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.
- Las alturas se han de tomar exactamente al centro del Sol. El sol varía muy rápidamente su altura (del orden de 0.1 grados por minuto) 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, 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 Figura 29 podemos ver los resultados.

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

**Figura 29 Segundos resultados de la observación del Sol.**

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.

Antes de cerrar este capítulo, y para subrayar la importancia que ha tenido la brújula magnética, señalar que en las últimas pruebas hechas con el Sol, se apreció que, variando sucesivamente el azimut magnético (desviándolo del Sol), pero manteniendo estable la altura, de forma que los resultados se fuesen pareciendo más a la situación conocida, se apreció que si se añadía en ese caso 5 grados al azimut, la situación era muy buena, de menos de 10 millas náuticas de error. Esto nos hace pensar que el programa funciona correctamente, que el móvil toma alturas aceptables, pero que la brújula magnética no es útil para obtener situaciones precisas.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo hablaremos de las conclusiones que obtuvimos una vez finalizado el proyecto, valoraremos si se han cumplido los objetivos propuestos, si merece la pena seguir investigando en esta línea y de qué formas se podría hacer.

### 5.1 Funcionamiento del programa

En este apartado se explicarán las conclusiones obtenidas en cuanto al funcionamiento del programa. En el capítulo 4 se evaluaron la exactitud y precisión que ofrece y, en este apartado, se valorará si estas características alcanzan un valor suficiente, si cumplen con los objetivos marcados, y si merece la pena seguir avanzando hacia un sistema plenamente automático.

#### 5.1.1 Problema de un solo astro

En el caso del problema para un solo astro, el programa funciona correctamente. Las pruebas que se han realizado han sido satisfactorias en cuanto a precisión y a exactitud para los objetivos que se habían planteado. Sin embargo, es necesario seguir avanzando en esta línea y comprobar si los pequeños errores que existen se deben a imprecisiones o errores en el programa desarrollado, o se deben al software utilizado para obtener datos (*Stellarium* y *Navigator*). La mejor forma de probar esto es obteniendo alturas y azimuts de astros reales, pero las pruebas realizadas con el terminal móvil no son fiables por los problemas con el azimut detallados en el apartado 4.3.

Se llegó a la conclusión de que para obtener una situación de 100 metros de exactitud, se necesitaría un sensor con una sensibilidad de 3 segundos de arco para la altura, y hasta la milésima de grado en el caso del azimut. Estos parecen unos requerimientos técnicos complicados de conseguir, por lo que este método nos parece que será más útil como herramienta para obtener una situación estimada que como método de situación en sí, aunque no se ha investigado si existe o puede llegar a desarrollarse un sensor de estas características.

#### 5.1.2 Problema de tres astros

Para el otro problema, el de resolución con tres astros, los resultados han sido satisfactorios, pero en menor medida que en el caso del problema para un sólo astro. Es evidente que es mejor tomar medidas a más astros, para corregir errores sistemáticos, sin embargo, el método escogido (método tradicional de bisectrices interiores) no ha resultado adecuado, por no contemplar los otros métodos tradicionales de trazado de bisectrices.

Otro de los inconvenientes de haber usado únicamente el método de bisectrices interiores es que, para poder situarnos con el código desarrollado, es preciso que las diferencias de azimut entre estrellas sean del orden de aproximadamente  $120^\circ$ . Si están muy juntas o en localizaciones opuestas (separadas  $180^\circ$ ), el problema dará como resultado una situación de muy mala calidad o incluso no podrá calcular una situación.

En resumen, el procedimiento ha sido correcto, el código es correcto y, si se escogen bien los astros, las situaciones son buenas. Pero el procedimiento, en general, tiene más deficiencias de las esperadas. A pesar de ello, esto tiene solución, que se explicará en el apartado de líneas futuras.

## 5.2 Hacia un sistema automático

Como se decía en el apartado 1.2, el objetivo final de este proyecto es que se llegue a desarrollar un sistema que obtenga su situación automáticamente, con la única referencia de los astros. Este TFG pretendía desde sus comienzos sentar las bases sobre la que seguir trabajando con este objetivo. Es importante entender esto para comprender el porqué de muchas de las líneas futuras que se van a proponer en el apartado 5.3. En esta línea, también se van recomendar los problemas que deben abordar en los proyectos que pretendan continuar el trabajo aquí presentado.

- Mejora del programa y software de reconocimiento de astros:  
Una vez resueltos los problemas, y estudiada su precisión y exactitud, se recomienda que en un TFG que continúe a éste se sigan las recomendaciones que se darán en el apartado 5.3 para mejorar el programa desarrollado en este TFG. También sería positivo que se desarrollara o adaptara un programa que pueda reconocer los astros, ya sea por reconocimiento de imágenes fotográficas o por comparación entre posiciones aparentes de astros.
- Desarrollo de un sensor:  
Se ha comprobado que los sensores de un terminal móvil son una herramienta útil para obtener la situación del observador, pero no suficiente. Se recomienda seguir las recomendaciones del apartado de líneas futuras del módulo paralelo de adquisición de datos para desarrollar un sensor que obtenga la altura y el azimut de los astros con mejor calidad que un móvil, y que se pueda adaptar para ser manejado desde un ordenador, para hacerlo automático. Lo ideal sería trabajar para conseguir las especificaciones indicadas en el apartado 5.1.1.
- Automatización del sensor:  
Una vez completados los proyectos anteriores, se recomendaría abordar la automatización del sensor. Este tarea incluiría hacer el sensor desarrollado previamente manejable con un ordenador o Arduino, y diseñar después un programa que transmita órdenes al sensor y sea capaz de ordenar la búsqueda de astros y de reconocerlos, así como adaptar el programa de obtención de la solución para que envíe solicitudes a este nuevo programa.
- Por último, sería necesario adaptar el sistema desarrollado para que corrigiera los movimientos y efectos producidos por una plataforma móvil como un barco. Una posible solución sería integrar este sistema en el barco y obtener de la giroscópica de a bordo el *pitch* y el *roll* calculados por la misma para corregir estos efectos. Aunque es posible que esta integración no sea necesaria, dependerá de las características del sensor desarrollado.

Estos pasos están esquematizados en la Figura 30, en la que los cuadros enmarcados con un rectángulo verde son las tareas abordadas tanto por este TFG como por el módulo de adquisición de datos

Una vez concluidas estas tareas, sería posible llegar a completar la idea inicial del proyecto, un sistema plenamente integrable en barcos o cualquier tipo de plataforma móvil, con unas buenas prestaciones.

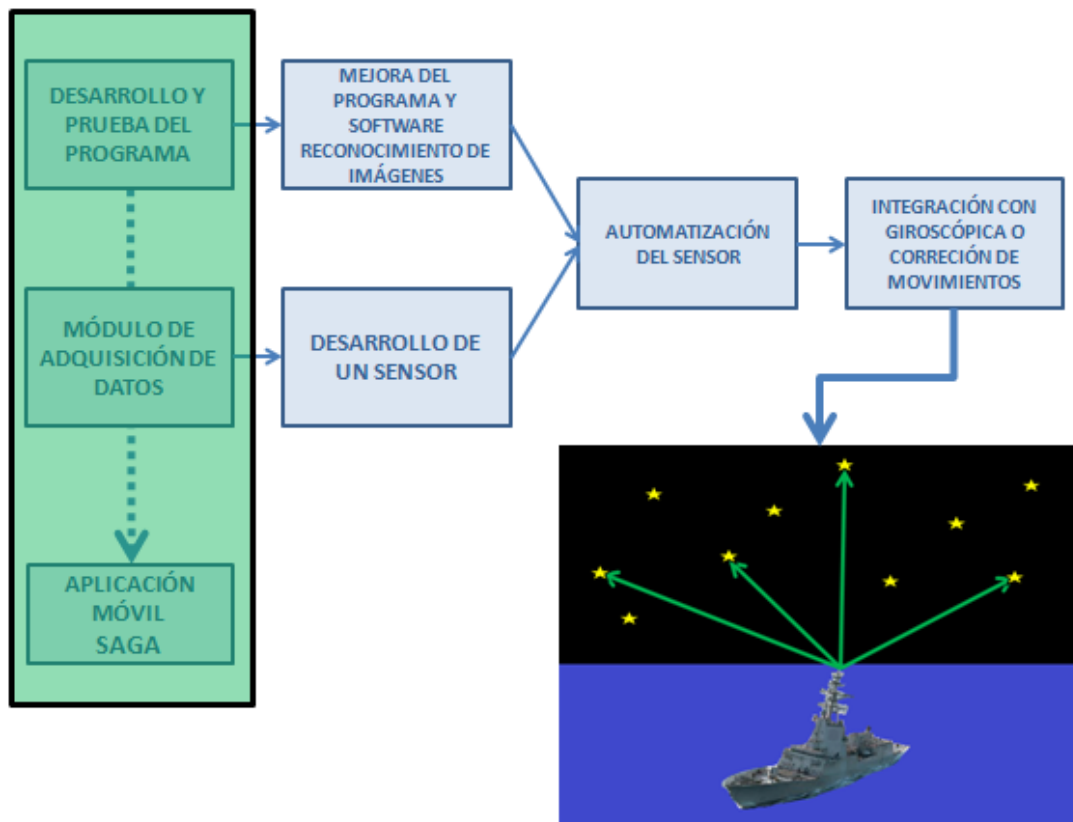


Figura 30 Avance propuesto hacia un SAGA.

## 5.3 Líneas futuras

### 5.3.1 Mejoras al programa

En este apartado se recogerán las líneas futuras orientadas a mejorar el programa que calcula la situación, en base a los astros, de forma que obtenga mejor precisión y exactitud, y aumente los astros con los que es capaz de trabajar actualmente.

1. La primera mejora es aumentar las posibilidades de obtención de datos añadiendo a los cálculos la posibilidad de obtener, en un momento determinado, la posición aparente de los planetas Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, así como la de la Luna. Introduciendo esta capacidad, mejoraremos las posibilidades de obtención de datos, ya que estos astros son relevantemente más visibles que las estrellas, especialmente durante noches de Luna llena, y durante los crepúsculos. Además, en el caso de que el cielo estuviera nublado, aumentaría las posibilidades de utilizar un astro para situarse. Para llevar a cabo la integración de los astros mencionados, se recomienda seguir el procedimiento descrito en [28]. En la misma línea, sería necesario cambiar el código para que el programa obtuviera la posición aparente del Sol de forma más precisa, como se indicó en el apartado 3.1.3.
2. Incorporar al mecanismo de resolución, el problema de las bisectrices teniendo los datos de cuatro astros. Como hemos visto en el apartado 4.2, la exactitud de este programa se ve

reducida por haberse limitado a usar el método de resolución con tres astros con bisectrices internas. Esto a priori tiene fácil solución, ya que es relativamente sencillo obtener datos de una estrella más, y no debería resultar muy complicado calcular la posición usando el método tradicional de las cuatro rectas de altura. En el código del presente proyecto ya está incluido el código para construir bisectrices, lo único que se debe cambiar es cuáles usar para obtener la resolución.

También se recomienda incorporar los métodos de resolución con tres astros que no usan bisectrices interiores. Debería resultar sencillo, ya que sólo habría que elegir en cuál de los cuatro ángulos formados por cada corte de rectas de alturas se va a trazar la bisectriz

Por lo tanto, este punto parece de fácil implementación, y se recomienda seguir los pasos estipulados en [30] para escribir el código.

3. Este año se ha desarrollado un TFG que intenta facilitar la toma de demoras a puntos de la costa, así como la resolución y presentación de datos, para agilizar los métodos de navegación por aguas restringidas. Sin entrar en detalles de este proyecto, el mismo nos hizo pensar que quizás en un futuro este sistema llegue a implantarse. Si así fuera, este sistema podría ser compatible en cierto modo con este proyecto, ya que usa acelerómetros, y en teoría, con tres azimuts de tres astros (o más de tres azimut a más de tres astros), sería posible situarse obteniendo con este sistema las demoras. Para ello, se recomienda como línea futura plantear matemáticamente este problema, e implantarlo en este programa. Para resolver este problema, se recomienda basarse en [29].
4. En el mismo sentido que el apartado anterior, sería interesante resolver las ecuaciones de trigonometría esférica de forma que directamente se obtuviera el triángulo de corte de las circunferencias de altura. De esta forma, se conseguiría prescindir totalmente del azimut de los astros, al prescindir de la misma forma de las situaciones estimadas.
5. Otra posible mejora sería introducir el código necesario para que, al recibir constantemente, o cada cierto período de tiempo, el rumbo y la velocidad del dispositivo, sea capaz el sistema de mantener una situación estimada. Sin embargo, si se pretende desarrollar un sistema plenamente integrado en barcos o unidades que dispongan de giroscópicas modernas, no será necesario, ya que estas giroscópicas son capaces de mantener esa situación estimada por sí mismas. El dispositivo usaría esa situación de no disponer de otra de mayor precisión, y la corregiría tras situarse por astros.
6. Con el objetivo explicado en el apartado 5.2, sería necesario desarrollar un programa (o añadir código al ya existente), que sea capaz de identificar (asignar nombres) a los astros, ya que sin eliminar la interpretación que hace el usuario de los astros, para asignarle nombres a los datos que introduce, no será posible llevar a cabo una completa automatización.

Este objetivo se puede cumplir de varias formas, entre las que se propone las siguientes:

- i. Que el programa calcule las posiciones aparentes de todos los astros de los que disponga (o de los más visibles), y a partir de ellas las distancias entre ellos. Las distancias entre los astros, para un momento determinado, deben ser las mismas para las posiciones aparentes calculadas como para los datos que se observen en el cielo, así que, comparando distancias, el programa debería ser capaz de componer los datos recibidos y asignarles nombres.
- ii. Que el programa consiga una imagen aportada por una cámara, y sea capaz de obtener, analizando dicha imagen, las distancias entre estrellas próximas. Así,

comparando con las diferencias entre estrellas que calcule para esa hora, deduciría qué estrellas son las que componen la fotografía. Si se consigue desarrollar esta capacidad, el sistema sería capaz de analizar y nombrar las estrellas que la cámara esté visualizando en tiempo real.

7. Otro de los pasos necesarios para la completa automatización del sistema, sería (después de haber desarrollado el sensor que obtenga datos de los astros) desarrollar el código necesario para orientar automáticamente el sensor para que apunte al centro de los astros que esté visualizando. Esto requiere reconocimiento de imágenes y reacción ante este reconocimiento en tiempo real.
8. En el caso de que se llegue a desarrollar un sistema automático como el que se pretende, sería necesario plantearse cómo afectaría el movimiento de un barco o plataforma móvil al funcionamiento del sensor. En función de la forma que se escoja para obtener los datos, es posible que éstos se vean afectados, o no. Por ello será necesario pensar qué ecuaciones utilizar para compensar este movimiento con los datos del *pitch* y *roll* dados por la giroscópica de a bordo. Será necesario asimismo pensar la situación idónea en el barco para que estos movimientos afecten lo mínimo posible al correcto funcionamiento del sensor.
9. Hemos visto cómo, en muchas de las mejoras, se habla de calcular distancias entre astros. Para facilitar estas mejoras, sería idóneo desarrollar el presente proyecto añadiendo métodos que calculen distancia entre astros, dadas la declinación y el horario en Greenwich de ambos o las alturas y los azimuts de ambos. Es posible que el programa no necesite más de tres astros para comparar las distancias reales entre ellos con su base de datos e identificarlos.
10. Durante el desarrollo de este proyecto, se ha sido lo más escrupuloso posible en el planteamiento de las ecuaciones, y los resultados han sido satisfactorios. Sin embargo, no se han podido hacer pruebas fiables con astros que puedan asegurar que no existe ningún error de cálculo. Si estas pruebas no pudiesen llevarse a cabo en posibles futuros trabajos de fin de grado, sería interesante establecer relaciones con el Real Instituto y Observatorio de la Armada para poder garantizar que los cálculos hechos son buenos y garantizan la máxima precisión.

### 5.3.2 Compatibilidades

Si se espera llegar a alcanzar la integración en buques, se debería investigar en los siguientes campos para saber hasta qué punto los sistemas de los que ya disponen los buques modernos nos pueden ser útiles o de qué forma podemos integrar el SAGA en barcos.

- Pensando en hacer el sistema compatible con barcos de la Armada, sería bueno establecer relaciones con la misma o con la empresa Navantia, para informarse de qué tipo de sistema operativo se utiliza en los barcos de la Armada y si el SCOMBA (Sistema de combate de la Armada) es o no compatible con el lenguaje de programación Java. En cualquier caso, habría que plantearse cómo establecer un relación entre ellos, y solucionar este problema. En el peor de los casos, sería bueno plantearse reescribir el código en un lenguaje de programación que facilite la integración.

- Como se ve en el módulo de adquisición, sería muy recomendable intentar usar la cámara FLIR como sensor para obtener la altura y el azimut. Además de las recomendaciones que se den para obtener datos de ella, se sugiere estudiar si es posible instalar dentro del propio sistema de la FLIR un módulo que realice los cálculos necesarios para que obtenga la posición de la unidad (al menos, utilizando el Sol).

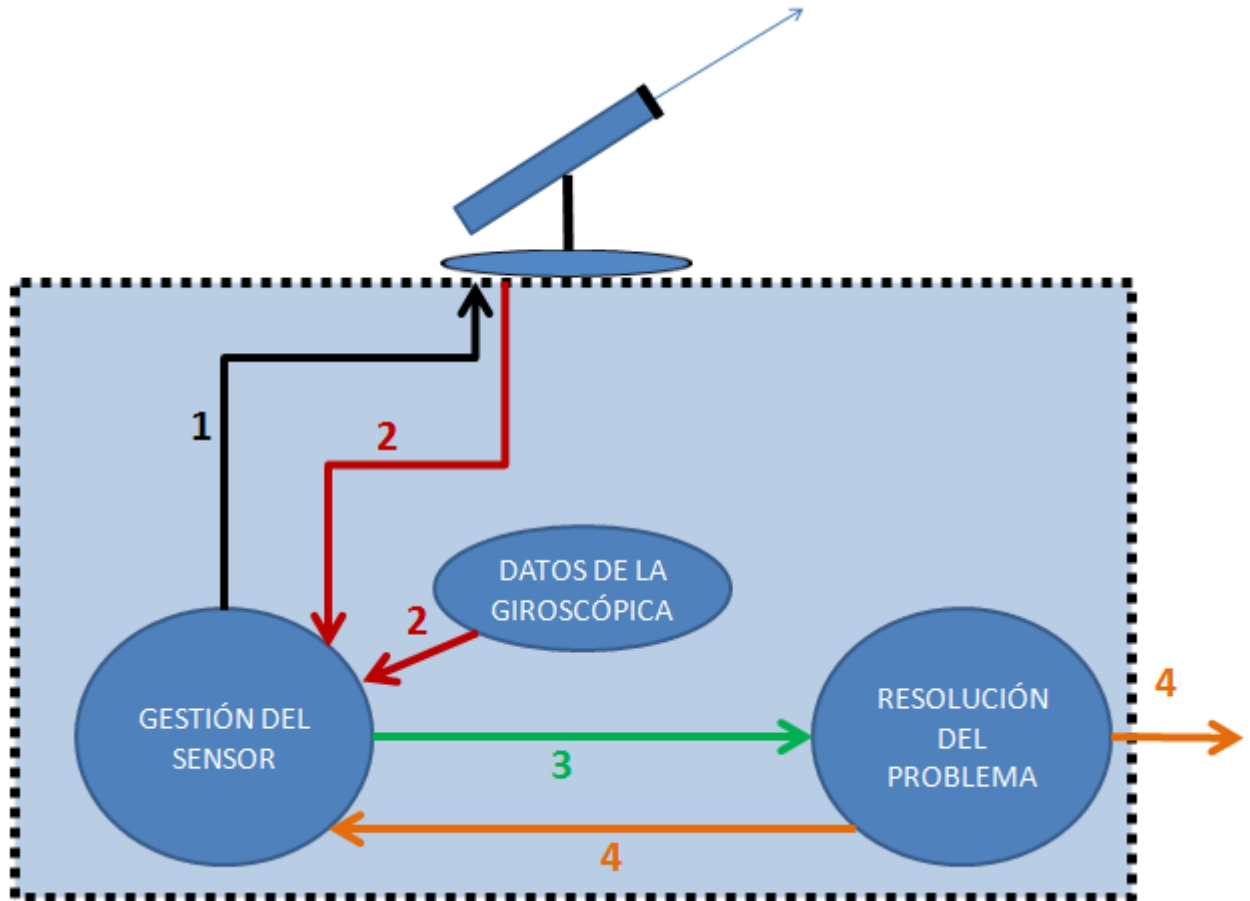


Figura 31 Funcionamiento propuesto de un sistema automático.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

En esta sección figurarán todas las referencias, sean recursos web, libros, artículos, etc., incluyendo la información de autores, título de la obra, nombre de la publicación, año, edición y enlace más fecha de último acceso en el caso de referencias a recursos online.

- [1] Smithsonian Institution, «*Time and Navigation, Satellite navigation*» [En línea]. Available: <http://timeandnavigation.si.edu/satellite-navigation/reliable-global-navigation/first-satellite-navigation-system>.
- [2] R. Novosti, «*Rusia Beyond the Headlines*» [En línea]. Available: [http://es.rbth.com/cultura/tecnologias/2014/01/09/dos\\_sistemas\\_de\\_navegacion\\_frente\\_a\\_frente\\_glonass\\_vs\\_gp\\_36203.html](http://es.rbth.com/cultura/tecnologias/2014/01/09/dos_sistemas_de_navegacion_frente_a_frente_glonass_vs_gp_36203.html).
- [3] IALA-AISM, «Instituto Oceanográfico de la Armada,» [En línea]. Available: [http://www.inocar.mil.ec/ESDEHI/docs/MANUAL\\_IALA.pdf](http://www.inocar.mil.ec/ESDEHI/docs/MANUAL_IALA.pdf).
- [4] Armada Española, «Armada Española,» [En línea]. Available: [http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/mardigital\\_biblioteca/refLang\\_es/11\\_ingenieria\\_electronica](http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/mardigital_biblioteca/refLang_es/11_ingenieria_electronica).
- [5] Álava Ingenieros, «Sistemas inerciales, Álava ingenieros,» [En línea]. Available: <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/oceanografia/posicionamiento-rumbo-y-actitud/sistemas-inerciales/>.
- [6] F. J. Pereda Garcimartín, «Universidad Complutense de Madrid,» [En línea]. Available: <http://eprints.ucm.es/13058/1/tfm-fernandojpereda.pdf>.
- [7] «Ejercicios de Perturbación GPS, Fragata F-101, Jefe de Comunicaciones,» 2014.
- [8] R. Morelle, «BBC,» [En línea]. Available: [http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2014/11/141106\\_tecnologia\\_barcos\\_gps\\_eloran\\_finde\\_az](http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2014/11/141106_tecnologia_barcos_gps_eloran_finde_az).
- [9] D. A. R. Jiménez, *Tema 4: Sistemas de Posicionamiento de exteriores*, Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá. CSIC., 2007/2008.
- [10] 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>.

- [11] Blog MIGUI, «MIGUI ciencia y cultura,» [En línea]. Available: <http://www.migui.com/ciencias/tecnologia/algunas-cosas-que-quiza-no-sepas-sobre-el-gps.html>.
- [12] El Mundo, [En línea]. Available: <http://www.elmundo.es/elmundo/2013/06/29/ciencia/1372519746.html>.
- [13] European Space Agency, [En línea]. Available: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/The\\_future\\_-\\_Galileo/What\\_is\\_Galileo](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo). [Último acceso: 2015 Febrero 2].
- [14] G. H. Kaplan, «*U.S. Naval Observatory*» [En línea]. Available: <http://gkaplan.us/content/NewTech.html>.
- [15] B. Steigerwald, «NASA,» NASA Goddard Space Flight Center, [En línea]. Available: [www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2009/icrf2.html](http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2009/icrf2.html).
- [16] Smithsonian Institution, «Nortronics NAS-14V2 Astrominertial Navigation System,» Time and Navigation, [En línea]. Available: [timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/nortronics-nas-14v2-astrominertial-navigation-system](http://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/nortronics-nas-14v2-astrominertial-navigation-system).
- [17] Smithsonian Institution, «Time and Navigation, submarine navigator,» [En línea]. Available: <https://timeandnavigation.si.edu/navigation-for-everyone/meet-the-navigator/submarine-navigator-us-navy-ret>.
- [18] K. J. Cowley, «*ION Intitute of Navigation*» [En línea]. Available: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=4806>.
- [19] Google.inc. [En línea]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.stardroid&hl=es>. [Último acceso: 21 1 2015].
- [20] *Stellarium*. [En línea]. Available: <http://www.stellarium.org/es/>) . [Último acceso: 24 2 2015].
- [21] *Navigator* [En línea]. Available: <http://www.tecepe.com.br/nav/>. [Último acceso: 15 2 2015].
- [22] G. N. Ordiz, «Aplicación para la situación geográfica del observador mediante posicionamiento astronómico,» Barcelona, 2011/2012.
- [23] Oracle, «Java Download,» [En línea]. Available: <https://www.java.com/es/download/>. [Último acceso: 18 12 2014].
- [24] Android, «*Android Developers Website*» [En línea]. Available: <http://developer.android.com/sdk/installing/index.html>. [Último acceso: 9 1 2015].
- [25] Eclipse. [En línea]. Available: <https://www.eclipse.org/downloads/>. [Último acceso: 18 12 2014].
- [26] F. W, S. H and L. T, "digilander," [Online]. Available: <http://digilander.libero.it/occultazioni/calcolo/fk5.pdf>. [Accessed 24 2 2015].
- [27] Atacama Large Millimeter/submillimeter Array - ALMA, "*ALMA Calibrator Source Catalogue*" [Online]. Available: <http://almascience.eso.org/sc/>. [Accessed 24 Enero 2015].
- [28] J. Meeus, *Astronomical Algorithms*, Richmond, Virginia: Willmann-Bell, Inc., 1991.

- [29] Laboratorio de Astronomía y Geodesia. Universidad de Cádiz, «Notas y apuntes de trigonometría esférica y astronomía de posición,» 2003. [En línea]. Available: [www.biblioises.com.ar/Contenido/500/520/Astrometria.pdf](http://www.biblioises.com.ar/Contenido/500/520/Astrometria.pdf). [Último acceso: 15 Enero 2015].
- [30] C. d. N. Moreu Curbera y C. d. N. Martínez Jiménez, *Astronomía y navegación Tomo I*, Vigo: "Librería San José", 1968.
- [31] *Apuntes de la asignatura de Navegación, Martínez-Hombres, C.N. Ceñal*, 2015.
- [32] J.B.Febres.[Enlínea].Available: [www.sectormatematica.cl%2Fmedia%2FNM2%2FECUACIONES%2520DE%2520LA%2520RECTA%2520EN%2520EL%2520PLANO%2520CARTESIANO.pdf&ei=roXvVJHcCMyrU4a2hLAI&usg=A](http://www.sectormatematica.cl%2Fmedia%2FNM2%2FECUACIONES%2520DE%2520LA%2520RECTA%2520EN%2520EL%2520PLANO%2520CARTESIANO.pdf&ei=roXvVJHcCMyrU4a2hLAI&usg=A). [Último acceso: 4 Febrero 2015].

## ANEXO I: CONCEPTOS PREVIOS

Para desarrollar este programa, se ha utilizado el libro escrito por el astrónomo Jean Meeus, y publicado en 1991, *Astronomical Algorithms* [28] en el que se detalla cómo calcular las variables astronómicas más importantes, por recomendación del profesor emérito de astronomía de la ENM. Este libro está especialmente escrito para facilitar la programación de cálculos y resolución de problemas astronómicos.

También nos harán falta otros libros de referencia, para explicar conceptos referentes a astronomía, y para resolver problemas que no están detallados en el *Astronomical Algorithms*. Estos libros serán los libros de astronomía con los que los alumnos de la ENM aprenden dicha asignatura, los tres tomos de "Astronomía y Navegación", de los ex profesores de la Escuela Naval Militar, el CN Moreu Curbera y el CN Martínez Jiménez [30].

### ELEMENTOS TERRESTRES

- Eje y polos: La línea alrededor de la cual gira la Tierra, se llama Eje de la Tierra, y los extremos de ésta línea son los polos, Polo Norte y Polo Sur.
- Polos magnéticos: Son los puntos de la Tierra que se corresponden con los polos del campo magnético generado por la Tierra. La diferencia entre los polos magnéticos y los polos geográficos se llama declinación magnética.
- Ecuador: Círculo máximo normal al eje de la Tierra. Los polos están separados  $90^\circ$  del Ecuador.
- Paralelos: Son los círculos menores paralelos al Ecuador.
- Meridianos: Son los círculos máximos que pasan por los polos. Son, por lo tanto, normales al Ecuador.
- Meridiano del lugar: Meridiano que pasa por un punto en concreto.
- Primer meridiano: O Meridiano de Greenwich. Es el meridiano que pasa por el Observatorio de Greenwich. Es utilizado como origen para medir las longitudes.
- Meridiano superior: Sección del meridiano del lugar de un punto que, al dividir éste por los polos, contiene al punto terrestre en concreto.
- Meridiano inferior: Sección del meridiano del lugar de un punto, que, al dividir éste por los polos, no contiene al punto terrestre en concreto.
- Latitud: (1) Arco de meridiano contado desde el Ecuador hasta el punto terrestre que se quiere medir. Por ello no podrá ser mayor de  $90^\circ$ , y se llama latitud norte si el

punto está en el hemisferio norte y latitud sur, si el punto está en el hemisferio sur.

- Colatitud: (c) Se llama colatitud al complementario de la latitud. ( $90^\circ - l$ ). Es, por tanto, el arco de meridiano entre el punto en concreto y el polo de su hemisferio.
- Longitud: (L) Arco de Ecuador desde el meridiano superior de Greenwich hasta el meridiano superior del lugar. Es menos de  $180^\circ$ , 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.

## ELEMENTOS 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 Local: Esfera celeste que tiene por centro al punto en estudio u observador, en un determinado instante.
- 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.
- Cenit / Zenit: (Z) Punto de la Esfera Celeste Geocéntrica que resulta del corte que se produce al trazar una semirrecta desde el centro de la Tierra que pase por el punto de la Tierra en estudio, con la Esfera Celeste Geocéntrica.
- Nadir (N): Punto de la Esfera Celeste Geocéntrica que resulta del corte que se produce al trazar una semirrecta en la misma dirección que la anterior pero en sentido opuesto, con la Esfera Celeste Geocéntrica.
- Horizonte: Cualquier círculo perpendicular a la línea Zenit-Nadir.
- Horizonte verdadero: Es el horizonte que tiene por centro el centro de la Tierra.
- Horizonte aparente: Es el horizonte que tiene por centro el punto terrestre en estudio. Debido a la pequeñez del radio de la Tierra, el horizonte aparente y el verdadero se considerarán iguales para los cálculos con estrellas.
- Horizonte visible: Es el formado por las visuales a la superficie de la Tierra. Este horizonte depende de la altura del observador. Este horizonte se ve afectado por la refracción.
- Vertical: Son los círculos máximos que pasan por el Cenit y el Nadir, y son perpendiculares al horizonte.
- 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 los polos celestes. 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.

- Meridiano del lugar (HI):** Círculo máximo de la esfera celeste que resulta del corte entre el plano que contiene al Meridiano del lugar terrestre y la esfera celeste. Se puede definir también como un vertical que pasa por el Zenit y el Nadir. De la misma forma que el terrestre, se divide en superior e inferior. En su corte con el horizonte, determina los puntos cardinales Norte (N) y Sur (S).
- Meridiano de Greenwich:** Meridiano del lugar del Observatorio de Greenwich.
- Vertical primario:** Es el vertical perpendicular al meridiano del lugar. En su corte con el horizonte, determina los puntos cardinales Este (E) y Oeste (W).
- Almicantarat:** Son los círculos menores paralelos al horizonte.
- Coordenadas horizontales:** Son aquellas que se miden sobre los círculos máximos perpendiculares horizonte y vertical. Son principalmente azimut y altura.
- Azimut (Z):** Arco de horizonte medido desde uno de los puntos cardinales N o S, hasta la vertical del astro en estudio.
- Azimut Náutico (Z):** Es aquel que se mide siempre desde el punto cardinal N hacia el E (sentido de las agujas del reloj). Por ellos, puede comprender valores desde  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .
- Azimut cuadrantal (Z):** 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  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , e irá acompañado de dos letras, N o S, y E u W, que serán los puntos cardinales de referencia.
- Azimut astronómico (Z):** 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  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .
- Ángulo paraláctico (A):** Es el ángulo definido por el horario del lugar de un astro y el círculo que resulta de la unión de la posición de ese astro con la posición del observador.
- Altura (a):** Arco de vertical contado desde el horizonte, hasta el astro en estudio. Por ello, no podrá ser mayor de  $90^\circ$ , si es visible, ni menor de  $-90^\circ$ , si no es visible.
- Altura verdadera (av):** Altura de un astro respecto al horizonte verdadero.
- Altura observada (ao):** Altura de un astro respecto al horizonte visible.
- Distancia cenital (z):** Es el arco comprendido desde el zenit hasta el astro. Es el complementario de la altura.
- Círculo horario:** Círculo máximo de la esfera celeste que pasa por los polos y por el astro en estudio. Es similar al meridiano del lugar.
- Coordenadas horarias:** Son aquellas que se miden sobre los círculos máximos perpendiculares Ecuador y círculo horario del astro. Estas coordenadas son horario y declinación.
- Horario del lugar (HI):** Arco de ecuador medido desde el meridiano superior del lugar hasta el círculo horario del astro, hacia el W.

- Horario de Greenwich (HG) : Arco de ecuador medido desde el meridiano superior de Greenwich hasta el círculo horario del astro, hacia el W.
- Declinación ( $\delta$ ): Arco de círculo horario contado desde el Ecuador hasta el astro. Es siempre menor de  $90^\circ$  y se llama Norte o positiva y Sur o negativa según el astro esté en el hemisferio Norte o Sur.
- Codeclinación ( $\Delta$ ): También llamada distancia polar, se mide desde el polo elevado del observador, hasta el astro y puede tener valores desde  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .
- Triángulo esférico o de posición: Es el triángulo esférico definido por el meridiano del lugar, el horario del lugar de un astro y el círculo que contiene al Zenit y al astro en estudio. Sus lados son la codeclinación, la colatitud y la distancia cenital. Sus ángulos son el ángulo en el Polo, el azimut astronómico y el ángulo paraláctico.

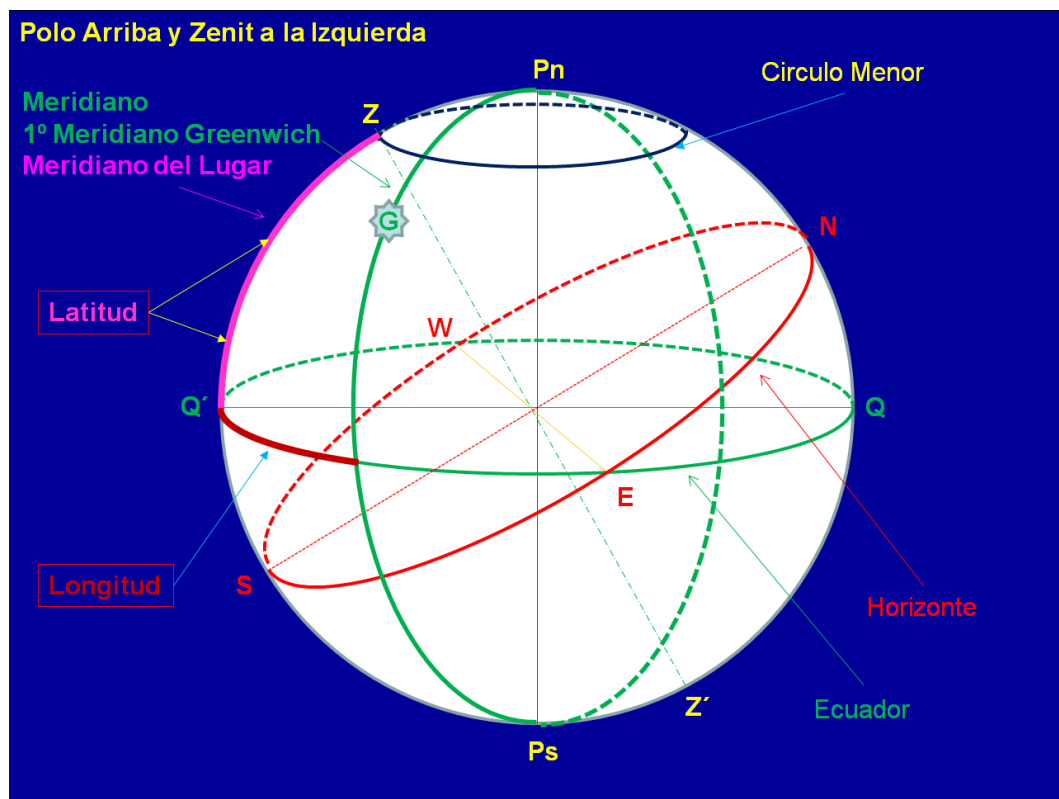


Figura 32 Representación de los elementos del Anexo 1 más relevantes.

## DÍAS JULIANOS

Para los cálculos astronómicos, se utiliza la cuenta de los días pasados desde el 1 de enero del año -4712, o 4172 a.C. (contando el año 0). Por tradición, el día Juliano comienza a las 12 UTC. También se ha de tener en cuenta, para pasar fechas actuales a días Julianos, que en el año 1582 d.C. se hizo un cambio de calendario, para adoptar el Gregoriano, lo que supuso que el 4 de octubre pasó a ser el 15 de octubre. Para los cálculos, se utilizarán los días Julianos (JD) con decimales, para tener en cuenta la hora a la que se haga el cálculo.

En las siguientes fórmulas, ENT significará la parte entera del número a continuación

$$JD = ENT(365.25(Y + 4716)) + ENT(30.6001(M + 1)) + D + B - 1524.5 \quad (31)$$

Donde:

$Y$  es el año.

$M$  es el mes. (1 será enero, 2 febrero...)

$D$  es el día, con decimales si incluimos las horas, minutos y segundos.

Si  $M > 2$ ,  $Y$  quedará igual.

Pero si  $M \leq 2$ ;  $Y = Y - 1$  y  $M = M + 12$

$$A = ENT\left(\frac{Y}{100}\right) \quad (32)$$

$$B = 2 - A + ENT\left(\frac{A}{4}\right) \quad (33)$$

Aunque si calculamos con una fecha siguiendo el calendario juliano,  $B$  será 0.

También se utilizarán para los cálculos los siglos julianos, que resultarán de dividir los días julianos entre 36525 (365,25 días cada año, según el calendario Juliano). En este proyecto se utilizarán los siglos julianos transcurridos desde el 1 de enero del año 2000, para utilizar la época J2000. Por ser pocos los años transcurridos desde esta fecha, el número de siglos transcurridos será menor que uno, y habrá que tener especial cuidado para que la variable que almacene este dato tenga al menos 5 decimales para obtener datos precisos.

Sabiendo ya  $JD$ , podremos calcular  $T$ , que serán los siglos julianos transcurridos desde la época J2000.

$$T = \frac{JD - 2451545.0}{36525} \quad (34)$$

## ÉPOCA

Se entiende por época una serie de datos astronómicos entre los que se incluyen las posiciones de las estrellas en la esfera celeste y sus movimientos propios, para una fecha y hora concretas. Las épocas sirven así como referencia para los cálculos astronómicos.

### J2000

Época establecida por la Unión Astronómica Internacional, aplicable a partir de 1984. Los cálculos se realizarán en este proyecto usando esta época, que corresponde en tiempo a la situación astronómica de los astros el 1 de enero del año 2000 a las 12 UTC (calendario gregoriano).

En esta aplicación, todos los datos se encuentran en un archivo de texto que se implementará dentro de la aplicación.

La época J2000 utilizada en este proyecto se ha obtenido del catálogo fundamental FK5, un catálogo que contiene las estrellas más importantes con buena precisión exactitud, de la página web de ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*)[27] y de los datos del almanaque náutico del año 2000.

## ANEXO II: MOVIMIENTO DE LA TIERRA

Para explicar el movimiento aparente del Sol y las estrellas en el cielo, y deducir o explicar así sus cálculos, es necesario entender cómo se mueve la Tierra alrededor del Sol y qué otros fenómenos afectan a la posición aparente del Sol y los astros en el cielo.

Lo primero que es necesario entender es que la Tierra se mueve alrededor del Sol siguiendo una órbita elíptica, no circular, según las leyes de Kepler. En esta órbita, el Sol se sitúa en uno de los focos de la elipse y dicha elipse es de poca excentricidad. Esta órbita se conoce como eclíptica y define un plano que, en astronomía, se conoce como plano de la eclíptica.

El ángulo que forma el plano de eclíptica con el plano del ecuador define la oblicuidad de la eclíptica ( $\epsilon$ ). La oblicuidad media de la eclíptica la podemos averiguar con la siguiente fórmula:

$$\epsilon_0 = 23^\circ 26' 448'' - 46.8150'' T - 0.00059'' T^2 + 0.001813'' T^3 \quad (35)$$

Donde T son los siglos Julianos pasados desde la época J2000.0

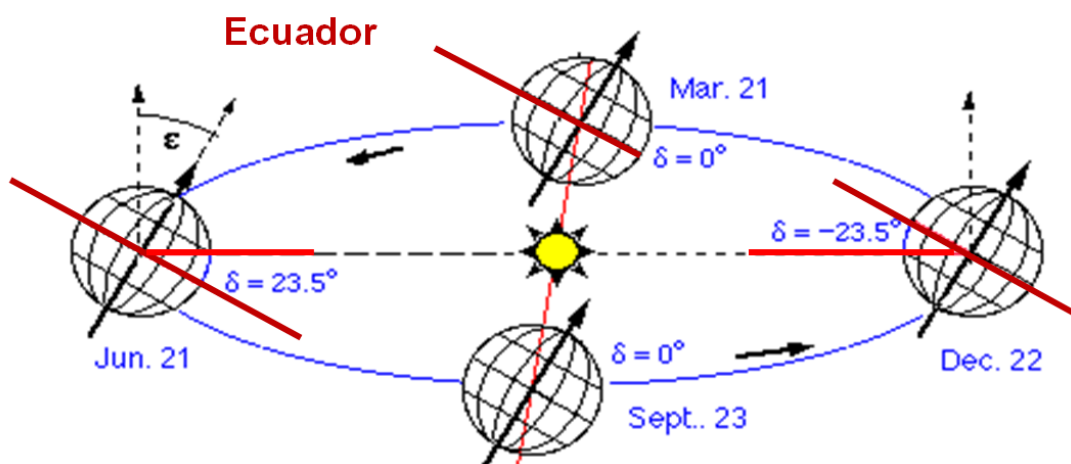


Figura 33 Movimiento de la Tierra.

Los puntos de corte de la eclíptica con el ecuador celeste se llaman puntos equinocciales Aries y Libra y la línea que estos definen se llama línea de los Equinoccios.

Separados  $90^\circ$  de los anteriores, están los Solsticios de Invierno y Verano, y la línea que los une se llama Línea de los Solsticios. Separado de la línea de los Solsticios  $16^\circ$  se encuentra la línea de los Ápsides. Dicha línea, la de los Ápsides, define los puntos Perihelio y Afelio de la elíptica.

El Equinoccio de primavera, en el que la declinación del Sol pasa de negativa a positiva, se llama Punto vernal o primer punto de Aries.

Este movimiento de la Tierra, resulta en un movimiento aparente del Sol visto desde el centro de la Tierra. Este movimiento está representado en la Figura 34.

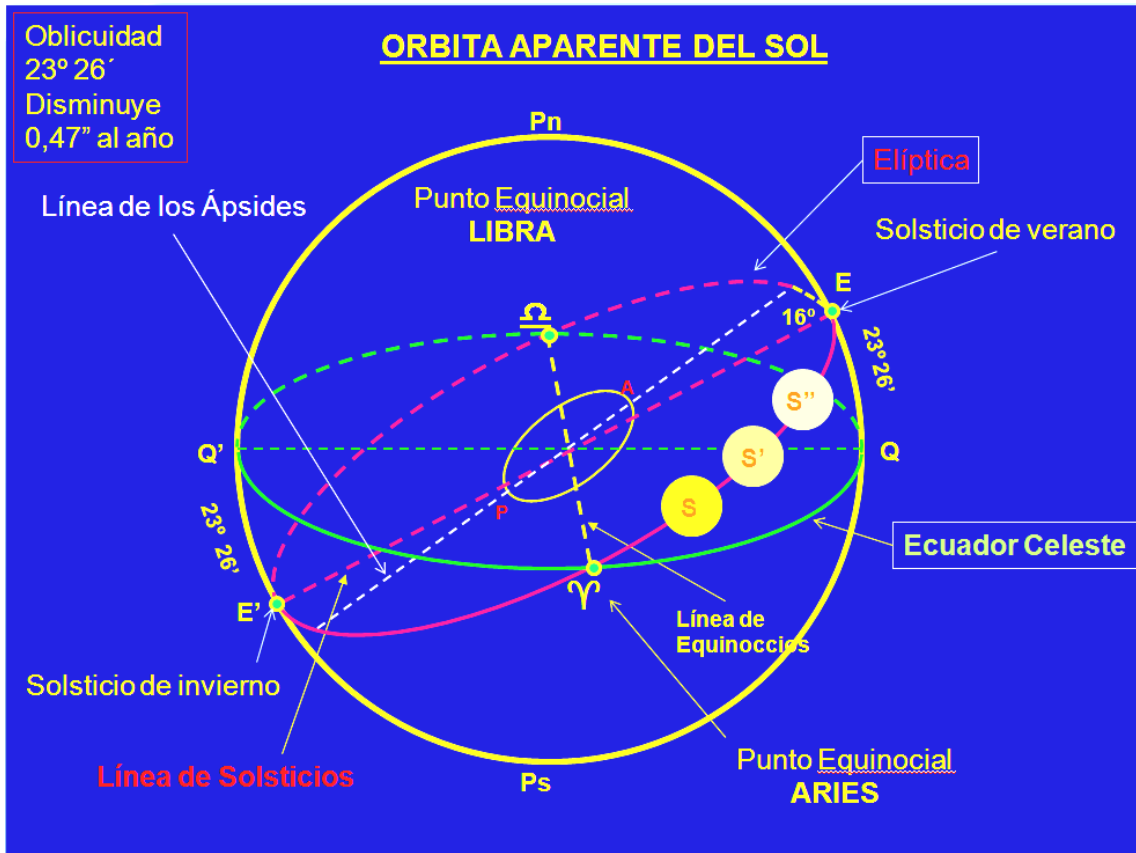


Figura 34 Órbita aparente del Sol

## ANEXO III: EXPLICACIÓN DE ÓRBITAS ELÍPTICAS

Las órbitas elípticas fueron estudiadas por Johannes Kepler en el siglo XVII. Las ecuaciones que desarrolló aún son válidas y son conocidas como las ecuaciones de Kepler.

En astronomía se utilizan las ecuaciones de Kepler para estudiar los movimientos y las posiciones de los planetas. En este proyecto no se han contemplado las posiciones de los planetas, pero usaremos para trabajar con el Sol la tercera ecuación de Kepler, ya que la Tierra describe una órbita elíptica alrededor del Sol.

Los elementos con los que se definen las órbitas elípticas son:

- Longitud del nodo ascendente ( $\Omega$ ): Ángulo con vértice en el Sol contado desde Aries hasta el nodo ascendente de la órbita, medido sobre la eclíptica y en sentido directo.
- Inclinação de la órbita ( $i$ ): Ángulo formado por la órbita del astro y la eclíptica. Para la órbita terrestre, al compararse con ella misma, es 0.
- Argumento del perihelio ( $w$ ): Ángulo conformado entre el nodo ascendente y el periastro en el plano de la órbita.
- Semieje mayor ( $A$ ): Es el semidiámetro mayor de la órbita.
- Excentricidad ( $e$ ): Relación que existe entre la distancia desde un foco de la órbita al punto dónde se encuentra el astro y la distancia a una recta llamada directriz. Es constante para cada órbita.

Algunos de estos elementos pueden apreciarse en la Figura 35. Pero además de estos elementos orbitales, usaremos las anomalías, que son las diferencias entre considerar el movimiento de la Tierra como elíptico o cómo circular.

Anomalía media de la época ( $M_0$ ): Fracción de un periodo orbital contado en ángulo desde el perihelio sobre una circunferencia cuyo diámetro coincide con el semieje mayor de la elipse.

Anomalía verdadera: Igual que la anterior, pero contada desde el foco de la elipse.

Anomalía excéntrica: Anomalía contada desde el centro de la elipse. La segunda ecuación de Kepler relaciona la anomalía excéntrica y la media.

Para diferenciar mejor estas anomalías, ver Figura 36.

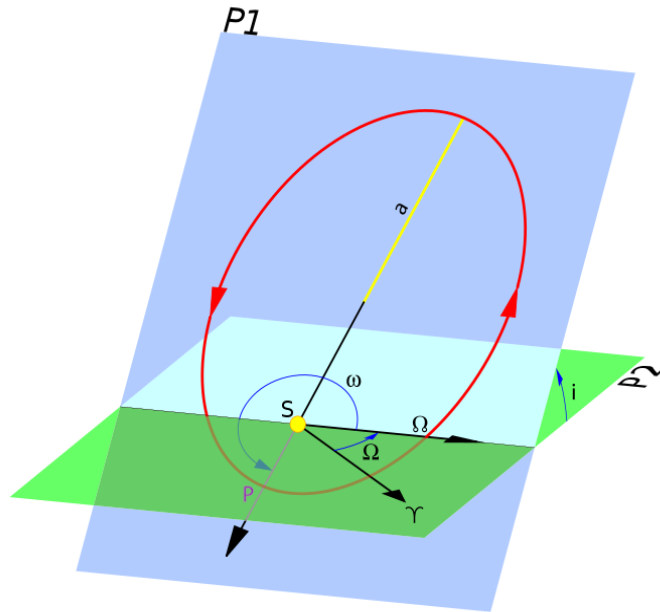


Figura 35 Elementos orbitales.

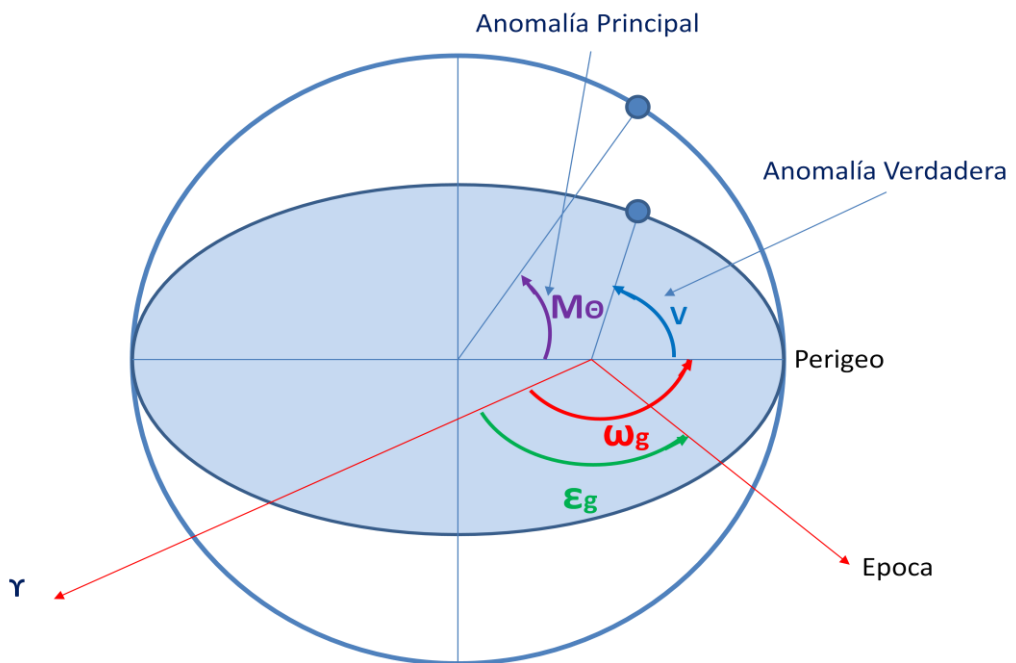


Figura 36 Anomalías

## ANEXO IV: COORDENADAS

En este proyecto, en la mayoría de los casos, se usarán las coordenadas ecuatoriales, es decir, la ascensión recta ( $\alpha$ ), y la declinación ( $\delta$ ). Como ya se explicó en el Anexo I, el punto Aries es el punto de corte del Ecuador terrestre con el plano de la eclíptica. Este punto será importante para entender las coordenadas ecuatoriales. Las dos siguientes coordenadas son las que utilizaremos para trabajar con las posiciones aparentes de los astros.

- Ascensión recta: Arco de ecuador que comprende desde el horario del lugar de Aries, hasta el horario del lugar del astro, en el sentido contrario de las agujas del reloj si visto desde el polo norte. (Es decir, hacia el Este) Normalmente se mide en horas, minutos y segundos, aunque para los cálculos usaremos grados, minutos de grado y segundos de grado, así como radianes. La ascensión recta es el complementario del ángulo sidéreo (AS) a  $360^\circ$ .
- Declinación: Arco de círculo horario contado desde el Ecuador hasta el astro. Es siempre menor de  $90^\circ$  y se llama Norte o positiva y Sur o negativa según el astro esté en el hemisferio Norte o Sur.

Sin embargo, en el caso del Sol, así como en el de algunas correcciones, necesitamos también utilizar otro tipo de coordenadas, ya que necesitaremos saber en qué punto de la órbita se encuentra la Tierra, la Luna, o el Sol (en su órbita aparente). Para ello usaremos:

- Longitud eclíptica (o celeste): Arco de la órbita eclíptica medido desde el equinoccio Aries de la época, hasta el planeta, en sentido anti horario si visto desde un punto al norte de la eclíptica.
- Latitud eclíptica (o celeste): Ángulo que forma un objeto celeste con el plano de la eclíptica. Será positivo si se mide hacia el norte eclíptico, y negativo si al contrario.

En [28], se establecen las ecuaciones para pasar de unas coordenadas a otras. Sin embargo, en este proyecto no nos será necesario utilizarlas.

Habiendo definido Aries, podemos explicar las relaciones entre las diferentes coordenadas horizontales, como se explica en el siguiente gráfico, y llegar a obtener la longitud.

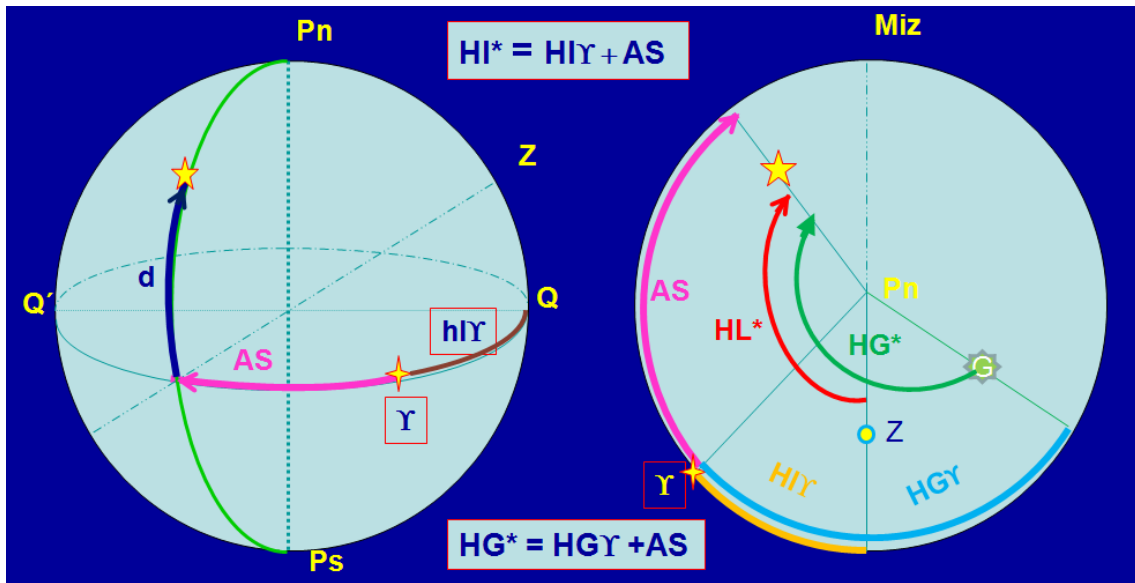


Figura 37 Coordenadas ecuatoriales.

## ANEXO V: CORRECCIONES AL MOVIMIENTO TERRESTRE

Ya hemos estudiado el movimiento de la Tierra, y cómo calcular posiciones aparentes del Sol y de las estrellas usándolo. Sin embargo, hay otro tipo de movimientos terrestres y otros efectos que afectan en menor medida a estas posiciones aparentes, pero que influyen de manera considerable al intentar obtener datos precisos.

- Correcciones debidas al movimiento de precesión:

La Tierra no mantiene un eje de rotación fijo. Debido a la influencia del Sol y la Luna; la Tierra, como giróscopo que es en su movimiento rotacional, ve su eje de rotación afectado por las fuerzas de gravedad de estos astros. Éstas son las que producen el efecto de precesión. Estas fuerzas provocan que el eje describa un movimiento aproximadamente circular alrededor del polo de la eclíptica. Este movimiento circular tiene un período aproximado de 26000 años, y provoca que los equinoccios se muevan aproximadamente 50" sobre la eclíptica cada año.

Las correcciones para los astros por la precesión de la Tierra, utilizando las fórmulas del *Astronomical Algorithms* que dan más precisión, y utilizando la época J2000, se alcanzan de acuerdo a las ecuaciones:

$$\zeta = 2306.2181''T + 0.30188''T^2 + 0.017998 T^3 \quad (36)$$

$$z = 2306.2181 T + 1.09468''T^2 + 0.018203 T^3 \quad (37)$$

$$\theta = 2004.3109''T - 0.42665 T^2 - 0.041833 T^3 \quad (38)$$

Siendo T los siglos Julianos transcurridos desde la época J2000.0:

$$A = \cos(\delta_1) * \text{sen}(\alpha_1 + \zeta) \quad (39)$$

$$B = \cos(\theta) \cos(\delta_1) \cos(\alpha_1 + \zeta) - \text{sen}(\theta)\text{sen}(\delta_1) \quad (40)$$

$$C = \text{sen}(\theta) \cos(\delta_1) \cos(\alpha_1 + \zeta) + \cos(\theta) \text{sen}(\delta_1) \quad (41)$$

A continuación, calculamos la declinación y ángulo recto en el instante deseado:

$$\alpha_2 = \text{atan}\left(\frac{A}{B}\right) - z \quad (42)$$

$$\delta_2 = \text{aseno}(C) \quad (43)$$

Teniendo en cuenta que en Java usaremos el método ATAN2, y que si el astro tiene una declinación con un valor absoluto mayor de  $65^\circ$ , se deberá usar:

$$\delta = \text{acos}\left(\sqrt{A^2 + B^2}\right) \quad (44)$$

- Correcciones debidas al movimiento de nutación:

La nutación es un movimiento oscilatorio del eje rotacional de la Tierra sobre su posición media. El eje de la Tierra, a la vez que gira con un período de 26000 años por el efecto de la precesión, tiene una pequeña vibración debida principalmente a la influencia de la Luna.

Para los cálculos, la nutación se divide en dos componentes, una paralela a la eclíptica, y una perpendicular a la misma. La primera se llamará nutación en longitud ( $\Delta\Psi$ ), y la segunda será nutación en oblicuidad ( $\Delta\varepsilon$ ), ambas en coordenadas eclípticas.

Debido a los objetivos de este proyecto, y a la precisión esperada, utilizaremos las fórmulas de [28] que nos ofrecen una precisión de  $0.5''$  en la nutación en longitud, y  $0.1''$  en la nutación en la oblicuidad.

$$\Delta\Psi = -17,2 * \text{sen}(\Omega) - 1,32 * \text{sen}(2Lo) - 0,23 * \text{sen}(2L') + 0,21 * \text{sen}(2\Omega) \quad (45)$$

$$\Delta\varepsilon = 9.2'' \cos(\Omega) + 0.57'' \cos(2Lo) + 0.1'' \cos(2L') - 0.09'' \cos(2\Omega) \quad (46)$$

Siendo L y L' las longitudes medias del Sol y de la Luna, respectivamente, y  $\Omega$  la longitud del nodo ascendente de la órbita media de la Luna, medido desde el equinoccio medio de la fecha.

Para otros cálculos, como el de las posiciones aparentes de las estrellas, necesitaremos los efectos de la nutación en las coordenadas ecuatoriales. Para ello usaremos:

$$\Delta\alpha = (\cos(\varepsilon_0) + \text{sen}(\varepsilon_0) \text{sen}(\alpha) \text{sen}(\delta)) \Delta\Psi - (\cos(\alpha) \tan(\delta)) \Delta\varepsilon \quad (47)$$

$$\Delta\varepsilon = (\text{sen}(\varepsilon_0) \cos(\alpha)) \Delta\Psi + \text{sen}(\alpha) \Delta\varepsilon \quad (48)$$

Sin embargo, estas ecuaciones son inválidas si la estrella está demasiado cerca del polo celeste, en cuyo caso trabajaremos con coordenadas eclípticas.

- Corrección a la oblicuidad debida a la nutación:

La oblicuidad de la eclíptica se ve afectada por la inclinación natural del eje de la tierra, y las variaciones que en ella provocan la precesión y la nutación. La oblicuidad de la eclíptica será la oblicuidad media corregida con la nutación en oblicuidad:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon \quad (49)$$

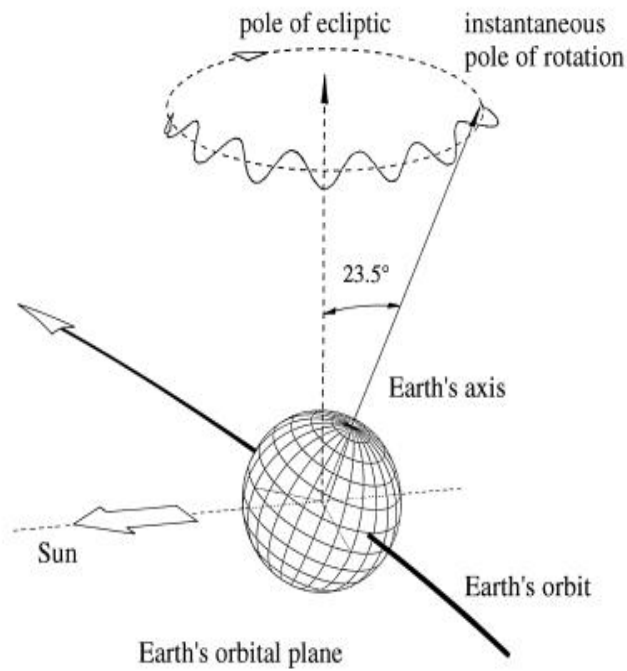


Figura 38 Movimientos de precesión y nutación.

- Corrección por aberración:

La aberración de la luz, debida al movimiento de la Tierra, afecta también a la posición aparente de las estrellas, es por eso que es necesario corregirla, ya sea con coordenadas eclípticas o ecuatoriales. En el caso de las coordenadas ecuatoriales, las ecuaciones necesarias son:

$$\Delta\alpha = -k \frac{\cos(\alpha) \cos(\theta) \cos(\varepsilon) + \text{sen}(\alpha)\text{sen}(\theta)}{\cos(\delta)} + e k \frac{\cos(\alpha) \cos(\pi) \cos(\varepsilon) + \text{sen}(\alpha)\text{sen}(\pi)}{\cos(\delta)} \quad (50)$$

$$\Delta\delta = -k [\cos(\theta) \cos(\varepsilon) (\tan(\varepsilon) \cos(\delta) - \text{sen}(\alpha)\text{sen}(\delta)) + \cos(\alpha) \text{sen}(\delta)\text{sen}(\theta)] + e k [\cos(\pi) \cos(\varepsilon) (\tan(\varepsilon) \cos(\delta) - \text{sen}(\alpha)\text{sen}(\delta)) + \cos(\alpha) \text{sen}(\delta)\text{sen}(\pi)] \quad (51)$$

Donde  $\Theta$  es la longitud verdadera del Sol y  $\pi$ ,  $k$  y  $e$  son parámetros que dependen únicamente del siglo juliano, y no se usarán en más cálculos que en el de la aberración.

- Corrección por paralaje anual:

El paralaje anual es el efecto provocado por estar la Tierra en diferentes posiciones a lo largo del año, lo que afecta a la posición aparente de los astros. Salvo en el caso del Sol, las estrellas están lo suficientemente lejanas como para despreciar este efecto.