



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Navegación astronómica sin situación de estima

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO: Germán Francisco Lázaro Pérez

DIRECTOR: José González Coma

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Navegación astronómica sin situación de estima

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa
Especialidad de Sistemas y Tecnologías de la Información

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este trabajo de fin de máster aborda la problemática actual de la dependencia de los buques de sistemas de posicionamiento, como el GPS, que pueden ser susceptibles a fallos o no estar disponibles. Se propone una alternativa basada en técnicas tradicionales de localización, específicamente el posicionamiento mediante la observación de astros, utilizando las alturas de cuerpos celestes como fuente de información.

El TFM se centra en el estudio de los principios que respaldan esta técnica de posicionamiento celeste y su implementación práctica en un lenguaje de programación. El objetivo principal es desarrollar una aplicación web que permita a sus usuarios implementar dos métodos diferentes de navegación astronómica, uno que emplea la situación de estima y otro que prescinde de esta información, y comparar el rendimiento de ambos métodos. De esta manera, se busca determinar la importancia de la situación de estima en la resolución del problema.

La culminación de este proyecto se traduce pues en el desarrollo de una aplicación web implementada en Python. La aplicación web ofrece una interfaz intuitiva y accesible, proporcionando a los usuarios una experiencia fluida y eficiente. El desarrollo de la aplicación web se ha llevado a cabo utilizando Dash, una biblioteca de Python que permite la creación de aplicaciones web interactivas y visualizaciones de datos de manera eficiente. Dash destaca por su capacidad para combinar la potencia de librerías como Plotly para gráficos interactivos y Skyfield para cálculos astronómicos precisos.

El resultado es una herramienta que demuestra la aplicación efectiva de las técnicas estudiadas, ofreciendo una solución concreta a los desafíos planteados en la dependencia de sistemas externos para el posicionamiento de buques.

PALABRAS CLAVE

Posicionamiento, navegación astronómica, situación de estima, aplicación web, Python

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	4
1 Introducción y objetivos	5
1.1 Motivación	5
1.2 Objetivos	6
1.3 Estructura de la memoria	6
2 Estado del arte	8
2.1 Fundamentos teóricos de la navegación astronómica	8
2.1.1 Forma elipsoide de la Tierra	9
2.1.2 Esfera celeste	9
2.1.3 Coordenadas horarias.....	11
2.1.4 Coordenadas uranográficas ecuatoriales.....	12
2.1.5 Coordenadas horizontales o azimutales.....	14
2.1.6 Trigonometría esférica [16]	15
2.1.7 Almanaque náutico	16
2.2 Navegación astronómica sin situación de estima.....	16
2.2.1 Círculo de alturas iguales.....	16
2.2.2 Cálculo analítico de la posición verdadera	17
2.3 Navegación astronómica con situación de estima.....	19
2.3.1 Triángulo de posición	19
2.3.2 Recta de altura	21
2.3.3 Cálculo gráfico de la posición verdadera.....	23
2.3.4 Cálculo analítico de la posición verdadera	25
3 Desarrollo de la Aplicación Web	26
3.1 Decisiones de diseño	26
3.2 Requisitos técnicos.....	26
3.2.1 Python.....	26
3.2.2 Dash	27
3.2.3 Skyfield.....	27
3.3 Desarrollo modular	28
3.4 Patrones de diseño.....	29
3.4.1 Patrón Modelo-Vista-Controlador	30
3.4.2 Patrón Observer	31

3.5 Arquitectura	32
3.5.1 Esquema lógico.....	32
3.5.2 Capa de presentación (frontend)	33
3.5.3 Capa de lógica de negocio (backend)	33
3.5.4 Capa de datos	34
3.6 Infraestructura y despliegue	34
3.6.1 Servidor.....	35
3.6.2 Servidor web	35
3.6.3 WSGI	35
3.6.4 HTTP/HTTPS	36
3.6.5 Let's Encrypt	36
4 Resultados	37
4.1 Introducción	37
4.2 Requisitos para la introducción de datos.....	37
4.3 Interfaz	38
4.3.1 Cabecera	39
4.3.2 Datos de los astros de la bóveda celeste	39
4.3.3 Puntos origen y destino.....	40
4.3.4 Comparativa de navegación astronómica sin situación de estima y con situación de estima.....	40
4.3.5 Representación gráfica de la comparativa	42
4.4 Pruebas	44
4.4.1 Sin situación de estima previa	44
4.4.2 Con situación de estima previa	45
5 Conclusiones y líneas futuras	48
5.1 Conclusiones	48
5.1.1 Desarrollo de la aplicación	48
5.1.2 Despliegue de la aplicación	49
5.1.3 Consideraciones finales	49
5.2 Líneas futuras	49
5.2.1 Mejoras propuestas	49
5.2.2 Posibles integraciones con otras herramientas.....	50
5.2.3 Ampliaciones propuestas	50
6 Bibliografía.....	51
Anexo I: Configuración del servidor web Apache	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esfera celeste [8]	10
Figura 2-2 Coordenadas horarias [9]	11
Figura 2-3 Coordenadas uranográficas ecuatoriales [14]	13
Figura 2-4 Coordenadas azimutales [9]	14
Figura 2-5 Triángulo esférico [17]	15
Figura 2-6 Círculos de altura [9]	17
Figura 2-7 Triángulos esféricos para dos círculos de altura [14]	18
Figura 2-8 Triángulo de posición con el astro al oeste del observador [9]	20
Figura 2-9 Recta de altura [9]	22
Figura 2-10 Intersección entre dos rectas de altura [14]	24
Figura 3-1 Diagrama de relaciones entre los distintos módulos de la aplicación	29
Figura 3-2 Patrón Modelo-Vista-Controlador	30
Figura 3-3 Arquitectura lógica de la aplicación	32
Figura 3-4 Proyección ortográfica de Plotly Scattergeo	33
Figura 4-1 Interfaz web de la aplicación	38
Figura 4-2 Cabecera	39
Figura 4-3 Campos para la introducción de los datos de observación de los astros	40
Figura 4-4 Campos para la introducción de los datos de origen y destino	40
Figura 4-5 Elementos de la interfaz para realizar la comparativa	42
Figura 4-6 Proyección ortográfica de Plotly Scattergeo	42
Figura 4-7 Proyección Mercator de Plotly Scattergeo	43
Figura 4-8 Proyección “Natural Earth” con los círculos de alturas iguales	45
Figura 4-9 Campos de latitud y longitud de estima vacíos	45
Figura 4-10 Influencia de la situación de estima en la precisión del método de rectas de altura	47
Figura A1-1 Virtual Host en Apache	53
Figura A1-2 Archivo WSGI	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Componentes principales del sistema	35
Tabla 4-1 Latitudes y longitudes de estima utilizadas.....	46
Tabla 4-2 Situaciones obtenidas por corte de rectas de altura.....	47

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

Desde los primeros días en que los marinos se aventuraron en los océanos, el desafío principal ha sido determinar su ubicación precisa. Los astros, siendo la única referencia para los navegantes en alta mar, les permitieron culminar con éxito sus travesías, dando origen a lo largo del tiempo a los procedimientos conocidos como navegación astronómica. Este enfoque de navegación es esencial para los marinos, ya que les proporciona la capacidad de zarpar desde un puerto siguiendo una ruta planificada en alta mar y llegar a su destino final sin depender de sistemas de posicionamiento por satélite. En lugar de ello, confían únicamente en la carta náutica, la observación de los astros y un sólido conocimiento de la navegación.

En la era actual de avances tecnológicos acelerados, la dependencia de sistemas de posicionamiento por satélite se ha vuelto omnipresente, especialmente en sectores críticos como la navegación marítima. Por ejemplo, la utilización generalizada del Sistema de Posicionamiento Global [1] (GPS), que es un sistema de navegación basado en satélites desarrollado y mantenido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, ha proporcionado una solución aparentemente infalible para la determinación de la ubicación, velocidad y dirección de buques y embarcaciones en alta mar. Sin embargo, esta dependencia exclusiva presenta un conjunto de desafíos significativos.

El GPS, aunque revolucionario, está sujeto a posibles fallos o interrupciones, ya sea debido a condiciones atmosféricas adversas, interferencias maliciosas o simplemente a la falta de señal en ubicaciones remotas. Esta vulnerabilidad plantea una amenaza real para la seguridad y la eficiencia de la navegación marítima. En este contexto, surge la necesidad crítica de explorar y desarrollar alternativas viables y robustas para el posicionamiento de buques. Este problema adquiere aún más relevancia cuando se consideran escenarios en los cuales la información de posición es crucial, como en operaciones de búsqueda y rescate, navegación en aguas desconocidas o en situaciones de emergencia.

La capacidad de llevar a cabo comparaciones precisas entre métodos de navegación fortalece la búsqueda de soluciones autónomas y confiables para la determinación de la posición de las embarcaciones, particularmente en escenarios críticos donde la dependencia de sistemas contemporáneos podría ser limitada o comprometida. En este sentido, la posibilidad de comparar resultados entre la navegación astronómica con y sin situación de estima destaca la importancia de la autonomía en la navegación marítima, al demostrar la viabilidad y eficacia de técnicas tradicionales frente a la dependencia exclusiva de sistemas modernos de posicionamiento.

Por otro lado, desarrollar una aplicación web utilizando tecnologías avanzadas como Plotly, Dash y Skyfield representa una oportunidad para explorar y aplicar herramientas tecnológicas modernas en

el ámbito de la navegación astronómica. Esto puede contribuir a la innovación tecnológica y al uso eficaz de recursos informáticos para abordar desafíos específicos.

La aplicación web pretende contribuir a la constitución de una plataforma informática para la aplicación práctica de conceptos teóricos de navegación astronómica. Esto puede cerrar la brecha entre la teoría y la práctica, brindando una comprensión más completa y aplicada de los principios de navegación.

Por último, la creación de una aplicación web que facilite la comparación entre la navegación astronómica con y sin situación de estima representa un respaldo significativo para la motivación de la enseñanza en la Escuela Naval Militar (ENM), especialmente en la especialidad específica de maniobra y navegación. Este software facilitará la explicación de conceptos relacionados con la navegación astronómica de manera más accesible y visual, convirtiéndose así en un estímulo adicional para el interés y estudio por parte de los alumnos.

1.2 Objetivos

El objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) se centra en desarrollar una herramienta práctica y educativa que contribuya al entendimiento de la navegación astronómica. En concreto, trata del diseño, desarrollo e implementación de una aplicación web interactiva y de fácil uso que permita la comparación sistemática entre métodos de navegación astronómica sin situación de estima y con situación de estima, demostrando si este factor afecta o no a la precisión y eficacia en la determinación de la posición.

La herramienta debe integrar funcionalidades específicas de navegación astronómica, permitiendo a sus usuarios simular y comparar diferentes escenarios de navegación sin la dependencia de sistemas de posicionamiento por satélite, como el GPS. También debe integrar fuentes de datos astronómicos y efemérides procedentes de fuentes fiables como la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y la Agencia Espacial Europea (ESA), para poder realizar con ellos los cálculos astronómicos necesarios.

Asimismo, es necesario integrar en la herramienta un módulo visual y gráfico que facilite la comparación de los resultados obtenidos a través de la navegación astronómica, con y sin situación de estima. Esto incluye representaciones visuales claras y detalladas de las rutas y la precisión de la ubicación estimada, verificando la coherencia de los resultados obtenidos con los principios teóricos establecidos.

Por último, será necesario documentar y presentar los resultados, elaborando una documentación completa que explique la arquitectura y funcionamiento de la aplicación, detallando los procesos de desarrollo, y presentar los resultados obtenidos y sus implicaciones.

1.3 Estructura de la memoria

En términos generales, la presente memoria se estructura de la siguiente manera:

En el capítulo 2, se describen los fundamentos de la navegación astronómica, esenciales para comprender la aplicación web desarrollada que permite la comparación entre la navegación astronómica sin situación de estima y con situación de estima.

En los diferentes subapartados de este capítulo, se definen de forma precisa los conceptos teóricos de navegación astronómica necesarios para entender el propósito de la aplicación web desarrollada.

Entre otros, se trata el uso de cuerpos celestes, como estrellas y planetas, para determinar la posición y orientación de un buque en alta mar. Se explica el triángulo de posición y su forma de

obtención, y se definen los conceptos de navegación astronómica sin situación de estima y con situación de estima, explicando cómo la situación de estima afecta a la precisión de la determinación de la posición.

También se define el círculo de alturas iguales y la recta de altura, y su aplicación a la hora de obtener la posición real sin situación de estima y con situación de estima respectivamente, detallando los cálculos necesarios para hallar la posición en cada caso.

El capítulo 3 describe el proceso de desarrollo de la aplicación web. Se realiza una descripción detallada de la arquitectura de la aplicación, explicando la integración del framework Dash y de módulos como Skyfield y Plotly en la aplicación.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la aplicación, explicando en detalle la interfaz de la aplicación y la funcionalidad de comparación entre la navegación astronómica sin situación de estima y con situación de estima. Se realiza un análisis de los resultados, interpretando los mismos y comparándolos con la literatura existente.

En el capítulo 5 y final se exponen las conclusiones del trabajo, destacando los logros alcanzados y las posibles implicaciones prácticas y teóricas, indicando también posibles mejoras a alcanzar en futuros trabajos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Fundamentos teóricos de la navegación astronómica

Según la definición de la Real Academia Española (RAE), la navegación se describe como “*la acción de navegar, viaje que se hace con la nave, o la ciencia y arte de navegar*” [2]. En este contexto, la navegación marítima se conceptualiza como la disciplina que engloba el conocimiento y la habilidad para dirigir una embarcación de manera segura desde un punto de partida hasta un destino determinado.

Existen varios tipos de navegación, que según las técnicas empleadas para obtener la posición se pueden clasificar de manera general [3] como:

- La navegación costera, que se basa en la observación de demoras, marcaciones y distancias respecto a puntos destacados en la costa.
- La navegación por estima, que utiliza el rumbo y velocidad estimados de la embarcación para calcular su posición después de un tiempo determinado.
- La navegación electrónica, fundamentada en sistemas de posicionamiento global (GPS).
- La navegación inercial, que determina la posición de la nave a partir de los datos proporcionados por giroscopios y acelerómetros, entre otros.
- La navegación astronómica consiste en la determinación de la posición de una embarcación utilizando las observaciones de los diferentes cuerpos celestes visibles. En este enfoque, se utilizan astros¹ como el Sol, la Luna, las estrellas y los planetas para calcular la posición y la dirección de movimiento de la nave.

Las posiciones obtenidas mediante el empleo de las técnicas anteriormente mencionadas se suelen plasmar de forma gráfica sobre una carta náutica, dibujando el rumbo y la distancia navegada a partir de una posición inicial sobre dicha carta. En náutica, según la RAE [4], la derrota es “*el rumbo o dirección que llevan en su navegación las embarcaciones*”. Existen dos tipos principales de derrotas a seguir por una embarcación en función de la constancia del rumbo o de la mínima distancia entre puntos, que se denominan loxodrómica y ortodrómica, respectivamente [5].

No obstante, la modalidad de navegación que constituye el fundamento teórico de este trabajo y que será tratada y explicada en esta memoria es la navegación astronómica.

¹ La palabra "astro" se utiliza para referirse a cuerpos celestes, especialmente aquellos que son visibles en el cielo nocturno.

2.1.1 Forma elipsoide de la Tierra

La navegación astronómica y la forma de la Tierra están intrínsecamente relacionadas debido a la forma elipsoide del planeta, que es una representación más precisa en comparación con una esfera perfecta. Aunque la Tierra se modela a menudo como una esfera para simplificar los cálculos, la realidad es que la Tierra es ligeramente achatada en los polos y ensanchada en el ecuador.

La forma elipsoide de la Tierra es el resultado de su rotación, ya que la fuerza centrífuga generada por la rotación provoca que la masa terrestre se desplace hacia el ecuador. Esta característica forma de nuestro planeta es fundamental para la navegación astronómica; cuando los navegantes realizan observaciones de los astros, como mediciones de altura de las estrellas o del Sol sobre el horizonte, deben tener en cuenta la forma real de la Tierra y realizar correcciones para poder obtener cálculos precisos.

En navegación, se utiliza un datum geodésico [6] para referenciar las coordenadas geográficas y tener en cuenta la forma elipsoide de la Tierra. En la actualidad, el datum geodésico más utilizado a nivel mundial es el WGS 84 (World Geodetic System 1984). Es un sistema de referencia geodésico que sirve como estándar para la representación de la forma y el tamaño de la Tierra, así como para la ubicación de puntos en la superficie terrestre, y ha sido ampliamente adoptado en sistemas de posicionamiento por satélite (GPS) y en tecnologías de georreferenciación en general. La mayoría de los dispositivos de navegación y mapas digitales utilizan este datum para proporcionar coordenadas geográficas precisas.

2.1.2 Esfera celeste

La esfera celeste [7] es un modelo imaginario utilizado en astronomía que proporciona un marco de referencia unificado para describir la posición de estrellas, planetas, y otros objetos celestes desde la perspectiva de un observador en la Tierra. Este modelo considera que todas las estrellas están ubicadas en la superficie de una esfera de radio arbitrario² que rodea la Tierra, y donde la Tierra además se ubica en su centro. De esta manera, la esfera celeste se convierte en una herramienta conceptual fundamental que facilita la localización y observación de los diferentes cuerpos celestes, independientemente de su distancia real a la Tierra.

La esfera celeste tiene un eje de rotación que coincide con el eje de rotación de la Tierra, denominado eje del mundo. Este eje corta a la esfera celeste en dos puntos, los polos celestes norte y sur, indicados en la figura 2-1 con P y P' respectivamente.

Al igual que en la superficie de la Tierra se utilizan líneas imaginarias llamadas meridianos y paralelos para describir la ubicación de puntos geográficos, en la esfera celeste también se emplean conceptos similares: los meridianos celestes, y los paralelos celestes o círculos de declinación.

El plano ecuatorial es un plano imaginario perpendicular al eje de rotación y que pasa por el ecuador terrestre. La intersección de la esfera celeste y el plano ecuatorial define entonces de manera natural la línea del ecuador celeste.

Como hemos comentado anteriormente, la esfera celeste proporciona un marco de referencia para describir la posición aparente de los objetos celestes desde la perspectiva de un observador en la superficie terrestre.

En este contexto, dado un observador concreto, el eje de referencia asociado a dicho observador es la denominada vertical, que se define como la prolongación del radio terrestre que se extiende desde el observador en la Tierra hacia arriba, pasando por el cenit (punto del cielo situado directamente sobre el observador) y por el nadir (punto diametralmente opuesto, invisible para el observador).

² En la práctica de la navegación astronómica, la distancia a las estrellas es irrelevante.

De manera similar al plano ecuatorial se define el plano horizonte, perpendicular a la vertical y que pasa por el centro de la esfera celeste (y por tanto de la Tierra). La intersección de la esfera celeste y este plano define, también de manera natural, la línea del horizonte astronómico del observador.

El meridiano celeste del observador es la línea imaginaria que conecta los polos celestes, el cenit y el nadir. Este meridiano divide el cielo en dos hemisferios y es fundamental para la descripción de la posición de los objetos celestes en el cielo desde la perspectiva de un observador en la Tierra.

El meridiano celeste de un astro es la línea imaginaria que conecta los dos polos celestes y pasa por el astro. Si un cuerpo celeste (astro) cruza el meridiano celeste del observador, el meridiano celeste del astro y del observador coinciden, y significa que el astro ha alcanzado su punto más alto en el cielo.

Los puntos cardinales norte y sur, indicados en la figura 2-1 con N y S respectivamente, se encuentran en las intersecciones del horizonte astronómico con el meridiano celeste del observador. El punto más cercano al polo norte es el punto cardinal norte y el más cercano al polo sur es el punto cardinal sur.

De la misma manera, los puntos cardinales este y oeste, indicados en la figura 2-1 con E y W respectivamente, se encuentran en las intersecciones del horizonte astronómico con el ecuador celeste. El punto cardinal este es el que queda a la derecha al mirar al punto cardinal norte, y el punto cardinal oeste a la izquierda.

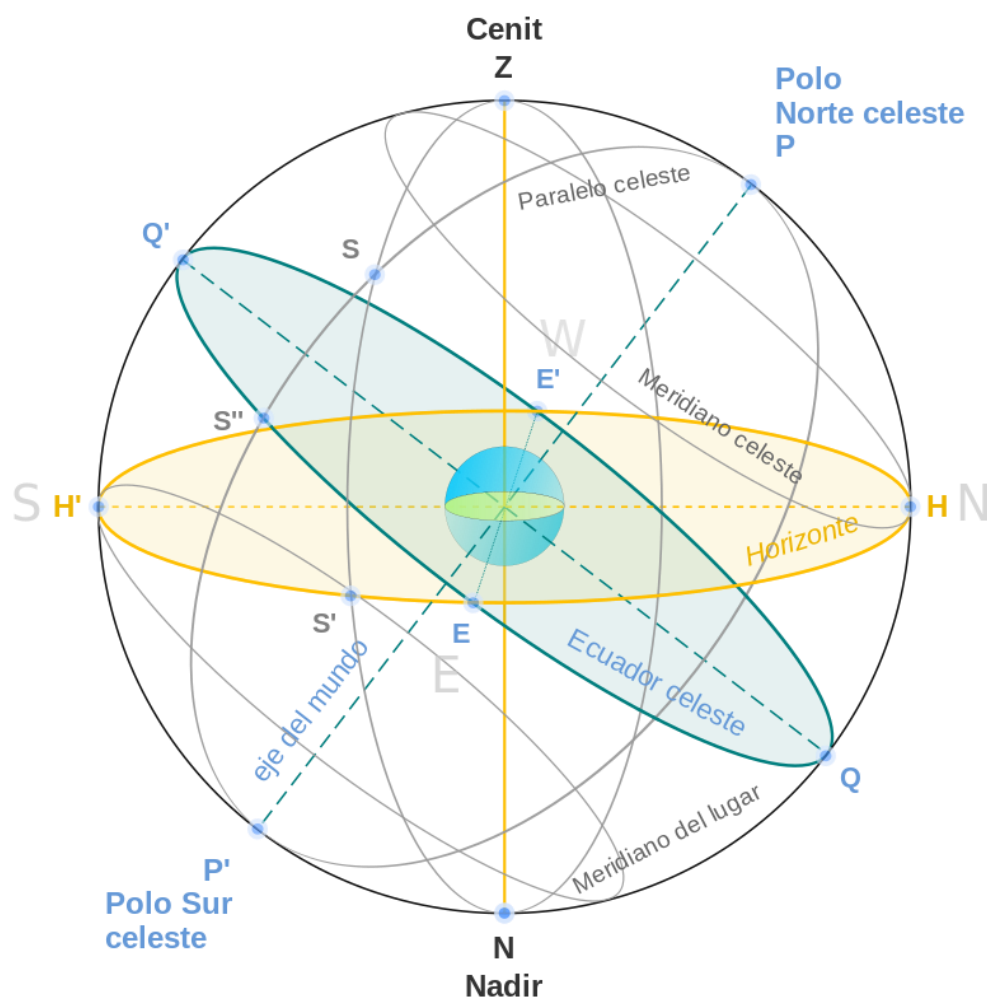


Figura 2-1 Esfera celeste [8]

2.1.3 Coordenadas horarias

Las coordenadas horarias son un sistema de referencia utilizado en astronomía para describir la posición de los astros en el cielo. Estas coordenadas son análogas a las coordenadas geográficas en la Tierra que utilizan la latitud y la longitud, pero a diferencia de éstas, las coordenadas horarias se basan en la posición aparente de los astros en la esfera celeste. Como las coordenadas geográficas, son totalmente independientes de la posición del observador.

El equivalente a la latitud geográfica es la declinación de un astro, δ , y se define como el ángulo medido en un meridiano celeste que indica cuán al norte o al sur de la línea ecuatorial se encuentra un objeto celeste. Por tanto, si el objeto está en el ecuador celeste, su declinación es 0° . Los objetos al norte tienen declinaciones positivas, mientras que los objetos al sur tienen declinaciones negativas.

La codeclinación o distancia polar del astro, Δ , se define como la distancia angular desde el astro hasta el polo celeste norte. Es decir:

$$\Delta = 90^\circ - \delta$$

Tal y como ocurre con los meridianos terrestres, es necesario definir un meridiano “cero” o primer meridiano que sirva de origen a la hora de definir las coordenadas. La elección natural es elegir el meridiano celeste de Greenwich, que se define como la línea que conecta los polos celestes y el cenit (y nadir) de Greenwich.

El equivalente a la longitud geográfica es el horario en Greenwich del astro, h_G , y se define como el ángulo medido en el ecuador celeste que va desde el meridiano celeste de Greenwich, hacia el oeste, hasta el meridiano celeste del astro, tomando un valor entre 0° y 360° .

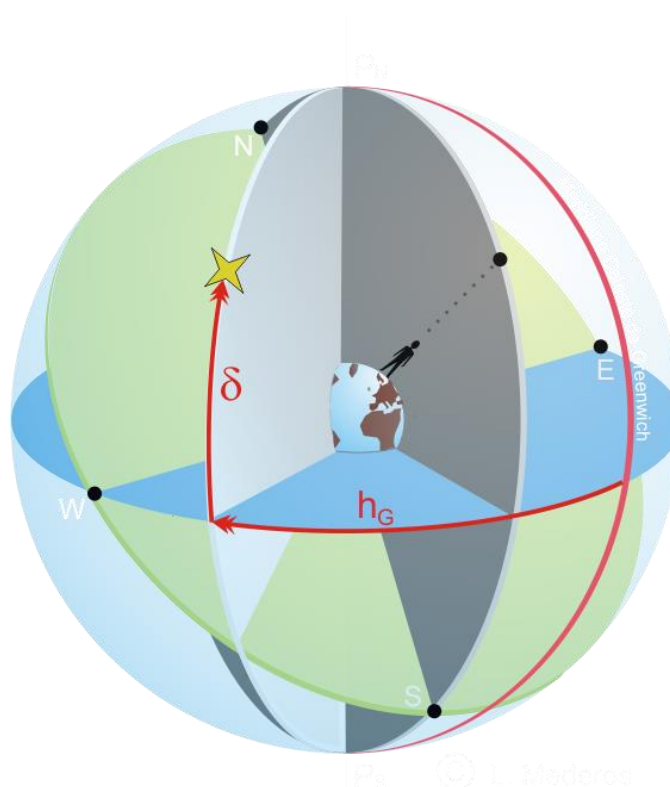


Figura 2-2 Coordenadas horarias [9]

El horario en el lugar del astro, h_l , es el ángulo medido en el ecuador celeste que va desde el meridiano celeste del observador, hacia el oeste, hasta el meridiano celeste del astro, tomando igualmente un valor entre 0° y 360° .

El ángulo en el polo, $\hat{P}$, es equivalente al horario en el lugar del astro, pero se mide desde el meridiano celeste del observador, hacia el este o el oeste, hasta el meridiano celeste del astro. Es decir, se mide siempre por el camino más corto de forma que su valor siempre quede comprendido entre 0° y 180° .

Su relación con el horario en Greenwich es la siguiente:

$$\begin{aligned}\hat{P}(W) &= h_{G*} + L && , si (h_{G*} + L) \in [0^\circ, 180^\circ] \\ \hat{P}(E) &= -(h_{G*} + L) && , si (h_{G*} + L) \in (-180^\circ, 0^\circ) \\ \hat{P}(W) &= 360^\circ + (h_{G*} + L) && , si (h_{G*} + L) \in [-360^\circ, -180^\circ] \\ \hat{P}(E) &= 360^\circ - (h_{G*} + L) && , si (h_{G*} + L) \in (180^\circ, 360^\circ]\end{aligned}$$

Siendo L la longitud del observador. Según el convenio usual de signos, en esta memoria la longitud se considera positiva al este y negativa al oeste del meridiano de Greenwich.

Y su relación con el horario en el lugar h_{l*} es la siguiente:

$$\begin{aligned}h_{l*} &= \hat{P}(W) \\ h_{l*} &= 360^\circ - \hat{P}(E)\end{aligned}$$

2.1.4 Coordenadas uranográficas ecuatoriales

Una estrella es un punto aproximadamente fijo de la esfera celeste. Las estrellas en realidad se mueven sobre la esfera celeste, pero lo hacen tan lentamente que, en el contexto de la navegación astronómica, se pueden considerar fijas durante todo un mes.

Puesto que el ecuador celeste y los paralelos de declinación son, por definición, perpendiculares al eje del mundo, la declinación de una estrella resulta ser aproximadamente constante. Sin embargo, su horario en Greenwich varía muy rápido ya que el meridiano de Greenwich rota con la Tierra, y por tanto el meridiano celeste de Greenwich rota con la esfera celeste.

Por tanto, si las estrellas están fijas en el cielo resulta más apropiado y eficiente referenciarlas respecto a un punto fijo de la esfera celeste utilizado como origen.

Las coordenadas uranográficas ecuatoriales son otro sistema de coordenadas utilizado en astronomía para describir la posición de objetos celestes en el cielo. Al igual que las coordenadas horarias, son independientes del observador, y también utilizan el sistema de referencia definido por el eje del mundo y el ecuador celeste.

Las coordenadas uranográficas ecuatoriales son conceptualmente las mismas que las coordenadas horarias, pero utilizando como origen para medir los horarios el denominado punto Vernal [10] o Aries, Υ (en vez del meridiano de Greenwich de las coordenadas horarias), que es un punto fijo³ en el ecuador de la esfera celeste y, por tanto, su declinación es siempre cero.

El eje de rotación de la Tierra no es fijo, sino que experimenta un movimiento de precesión [11]. Este movimiento es causado principalmente por la influencia gravitacional del Sol y la Luna sobre el abultamiento ecuatorial de la Tierra. El ciclo completo de precesión toma alrededor de 26.000 años, y se denomina precesión de los equinoccios. Debido a esta precesión de los equinoccios, el punto Vernal

³ No es un astro, no hay una estrella fija en él.

se desplaza con respecto a las estrellas hacia el oeste a lo largo de la eclíptica⁴, que es una línea imaginaria que marca la trayectoria aparente del Sol alrededor de la Tierra.

La declinación δ se define exactamente igual que en el caso de las coordenadas horarias.

El ángulo sidéreo, A_s , es el ángulo correspondiente al arco de ecuador celeste, de 0° a 360° , medido desde el punto Vernal hacia el oeste hasta el pie del meridiano celeste del astro. En otras palabras, es equivalente al *horario en Aries* del astro.

Los astrónomos no utilizan el ángulo sidéreo, sino que utilizan la denominada ascensión recta, que es el ángulo correspondiente al arco de ecuador celeste, de 0 a 24 horas, medido desde el punto Vernal en sentido antihorario (hacia el este) hasta el pie del meridiano celeste del astro.

La nutación [12] es un fenómeno periódico en la orientación del eje de rotación de la Tierra, que se superpone al fenómeno más lento de la precesión. Por otro lado, la aberración estelar [13] es un fenómeno que afecta a la posición aparente de las estrellas en el cielo a lo largo del año, debido al movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol. Debido a los movimientos de precesión y nutación, y a la aberración estelar, el sistema de referencia de coordenadas uranográficas no es realmente constante (la declinación y el ángulo sidéreo varían con el tiempo). Esto significa que ni las estrellas ni el punto Vernal son realmente fijos en la esfera celeste, pero su movimiento es tan lento que a efectos prácticos se pueden considerar fijos durante todo un mes.

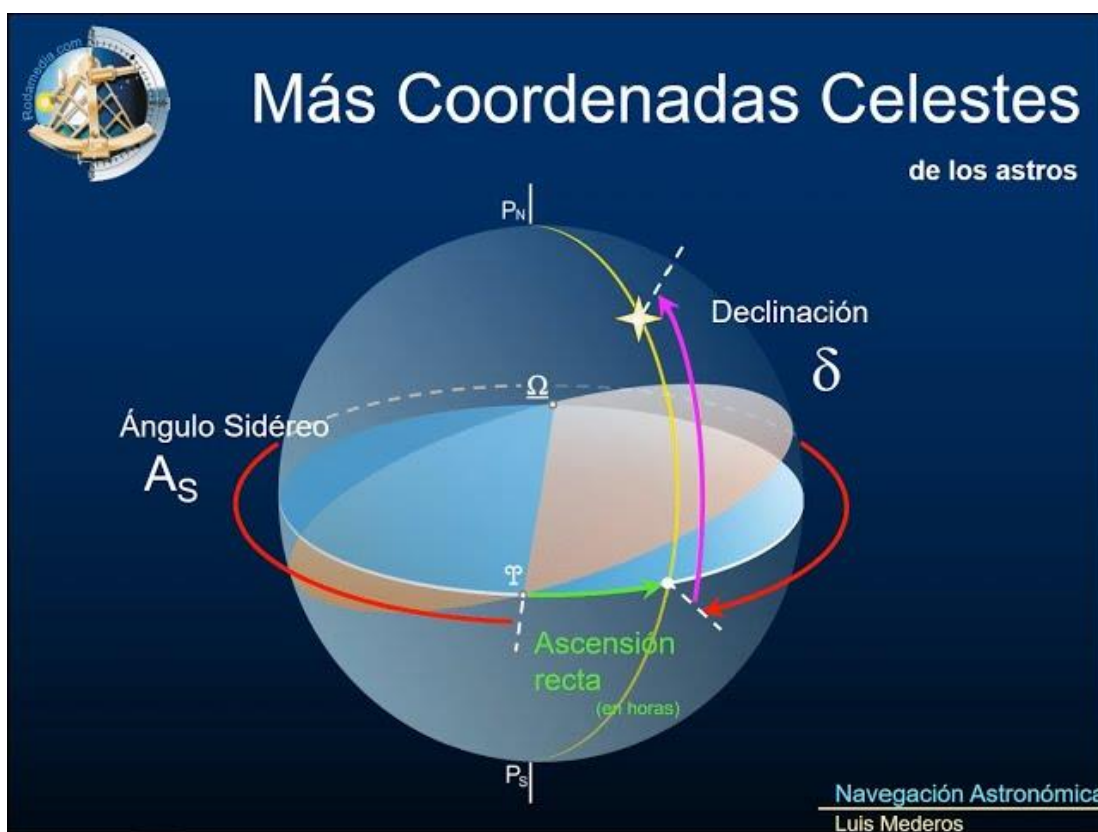


Figura 2-3 Coordenadas uranográficas ecuatoriales [14]

⁴ El ecuador celeste forma un ángulo constante con la eclíptica de aproximadamente unos 23.5 grados. Este ángulo es el responsable de las estaciones del año.

2.1.5 Coordenadas horizontales o azimutales

Las coordenadas horizontales o azimutales son otro sistema de coordenadas utilizado en astronomía y navegación. Las coordenadas principales son el azimut, $\hat{Z}$, y la altura, a , y, a diferencia de las coordenadas horarias, este sistema describe las posiciones de cuerpos celestes en el cielo en relación con un observador.

El azimut de un astro es el ángulo medido en el horizonte astronómico entre un origen arbitrario y la vertical del astro, y se refiere a la dirección en la que se encuentra un objeto celeste desde la perspectiva de un observador.

En astronomía náutica [15] se suele utilizar el azimut náutico o circular, que define al punto cardinal norte como origen. Se mide en grados y aumenta en sentido horario (dirección oeste), tomando un valor entre 0 y 360°, donde 0° es el norte, 90° es el este, 180° es el sur y 270° es el oeste. Por tanto, es equivalente a la demora (astronómica) del punto determinado por la intersección de la vertical del astro y del horizonte.

La altura de un astro se define como la medida angular vertical desde el horizonte hasta el astro. Se mide en grados, con 0° en el horizonte y 90° (máximo) en el cenit.

La distancia cenital, C_a , se define como la distancia angular desde el astro hasta el cenit del observador. Es decir, es el ángulo complementario de la altura:

$$C_a \equiv 90^\circ - a$$

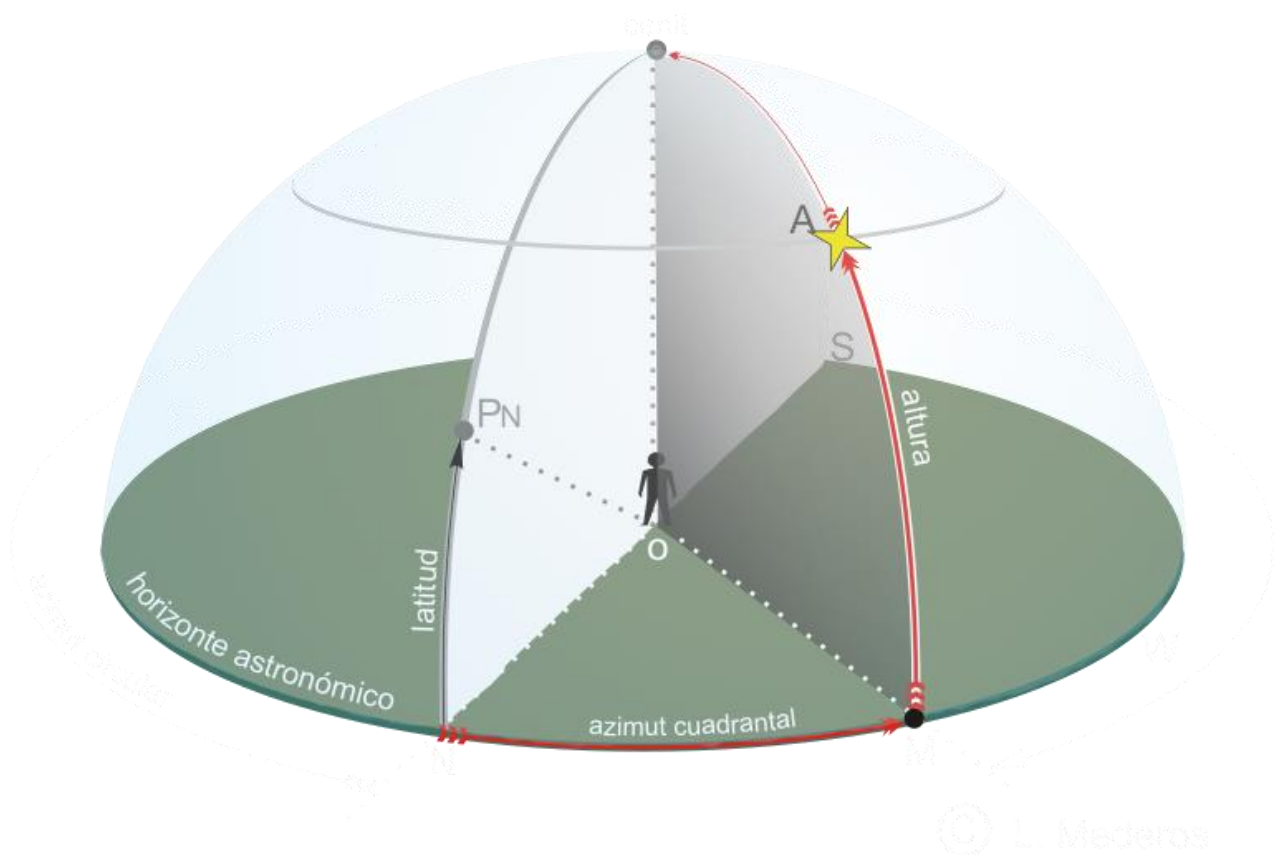


Figura 2-4 Coordenadas azimutales [9]

2.1.6 Trigonometría esférica [16]

Un círculo máximo en una esfera es cualquier círculo que tenga un diámetro igual al diámetro de la esfera. En otras palabras, es el círculo más grande que se puede trazar en la superficie de una esfera y su centro coincide con el centro de la esfera. Ejemplos de círculos máximos en la esfera terrestre son los meridianos y el ecuador, pero no los paralelos.

La trigonometría esférica es una rama de la trigonometría que se centra en el estudio de los polígonos que se forman sobre la superficie de la esfera, en especial, en los triángulos formados por arcos de círculos máximos de una esfera. A diferencia de la trigonometría plana, que se aplica a triángulos en un plano bidimensional, la trigonometría esférica trabaja con triángulos en la superficie de una esfera.

Un triángulo esférico es una porción de la superficie de una esfera delimitada por tres círculos máximos que se cortan entre sí. Los lados a , b , c , de un triángulo esférico son, por definición, los ángulos⁵ formados en el centro de la esfera por los radios de sus vértices, tal y como se indica en la figura 2-5. A , B , C son los ángulos opuestos a los lados a , b , c respectivamente. Como veremos más adelante, la resolución de triángulos esféricos es particularmente importante en astronomía náutica y navegación, ya que permite calcular la ubicación de una embarcación en mar abierto mediante la observación de los astros.

Para resolver analíticamente un triángulo esférico, es suficiente con aplicar un único teorema de la trigonometría esférica, el denominado teorema de los cosenos.

En un triángulo esférico con lados de longitud a , b , y c y ángulos opuestos A , B , y C , respectivamente, el teorema de los cosenos esféricos se puede expresar como:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

Y como:

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a$$

Y de manera similar podemos obtener las expresiones para los lados b y c y los ángulos B y C .

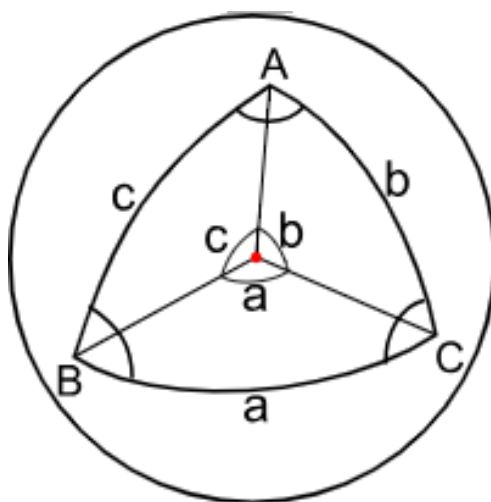


Figura 2-5 Triángulo esférico [17]

⁵ Y como tales, se miden en grados.

2.1.7 *Almanaque náutico*

El Almanaque Náutico (AN) español, es una publicación anual publicada por el Observatorio de Marina de San Fernando, que contiene información astronómica y náutica esencial para la navegación marítima. Su objetivo principal es proporcionar datos precisos y actualizados en formato impreso que son de utilidad para los navegantes, especialmente aquellos que utilizan la navegación astronómica tradicional.

Aunque hoy en día la navegación electrónica y sistemas GPS son comunes, el Almanaque Náutico sigue siendo una referencia confiable, especialmente en situaciones en las que se requiere independencia de sistemas electrónicos.

El AN proporciona el horario en Greenwich h_{G*} y la declinación δ , para cada día y hora medida en tiempo universal UT, del Sol, la Luna, los planetas y, de manera indirecta, las estrellas. Se usan 99 estrellas en el AN español para navegación astronómica, y también proporciona el ángulo sidéreo AS de cada una de las 99 estrellas para cada mes del año. Al incluir el *horario en Greenwich de Aries* para cada hora, como si fuese un planeta más, resulta sencillo también obtener el horario en Greenwich de la estrella.

2.2 Navegación astronómica sin situación de estima

En la navegación tradicional, la "situación de estima" se refiere a la posición estimada de una embarcación en un momento específico, calculada en función de la última posición conocida, el rumbo y la velocidad estimada.

La "navegación sin situación de estima" es un término que se utiliza en el ámbito de la navegación para describir una situación en la cual el navegante no dispone de una estimación de su posición actual en el mar, y que puede ser debido a varios factores, como falta de referencias visuales, problemas con instrumentos de navegación, falta de información actualizada sobre corrientes, mareas, etc., o simplemente errores acumulados en el cálculo de la situación de estima.

La navegación astronómica sin situación de estima implica pues la determinación de la posición de una embarcación únicamente a través de observaciones astronómicas y sin utilizar datos de estimación previa.

2.2.1 *Círculo de alturas iguales*

Un círculo de alturas iguales es el círculo de posiciones desde donde el observador ve a un determinado astro con la misma altura (pero distinto azimut). Si se traza una circunferencia con centro en la proyección vertical del astro sobre la superficie terrestre, denominada polo de iluminación o punto astral, PA , y radio su distancia cenital, el observador debería de encontrarse en cualquier punto de dicha circunferencia.

Nótese que es indiferente representar los triángulos esféricos sobre la superficie terrestre o sobre la esfera celeste, ya que los ángulos no varían (ver apartado 2.1.6). Las coordenadas del polo de iluminación por tanto coinciden con las coordenadas horarias del astro en el instante de la observación.

Cuanto mayor es la altura del astro, menor es el radio de este círculo, y en el caso límite del astro situado justo en el cénit del observador, el radio se reduce a un único punto, que es el propio cénit.



Figura 2-6 Círculos de altura [9]

2.2.2 Cálculo analítico de la posición verdadera

Si se obtienen simultáneamente⁶ las alturas verdaderas de dos o más astros, los puntos de corte de los respectivos círculos de alturas iguales nos indicarán la posición real de la embarcación. Sin embargo, la resolución gráfica de este problema no suele ser viable en la práctica, debido a las usualmente enormes dimensiones de estos círculos, lo que imposibilita poder dibujarlos en ninguna carta de navegación que nos permita obtener la precisión necesaria (por ejemplo, para poder distinguir visualmente de forma razonable el valor de una milla, sería necesario contar con un globo de 7 metros de diámetro).

Por tanto, sin situación de estima previa, la mejor aproximación es el cálculo analítico de las coordenadas de los puntos de corte.

Para realizar este cálculo analítico, es necesario observar al menos dos astros, de manera que se puedan obtener dos círculos de alturas iguales que se corten entre sí. En este caso, para calcular la latitud y longitud de los dos puntos de corte obtenidos (ver figura 2-7), se puede proceder como sigue en los siguientes párrafos.

De la observación de dos astros obtenemos las dos alturas verdaderas respectivas, a_1 y a_2 . Asimismo, a partir de la hora UT de medida podemos obtener del almanaque náutico u otros medios el horario en Greenwich de los astros, h_{G1} y h_{G2} , y también sus declinaciones δ_1 y δ_2 .

Tenemos, según la figura 2-7, una serie de triángulos esféricos de los que conocemos todos los datos excepto el ángulo en el polo P del astro 2, la latitud ϕ , los ángulos A , B y R y el lado D_0 . Y, por supuesto, la situación del observador S_0 .

⁶ Es decir, con un intervalo de pocos minutos entre las medidas.

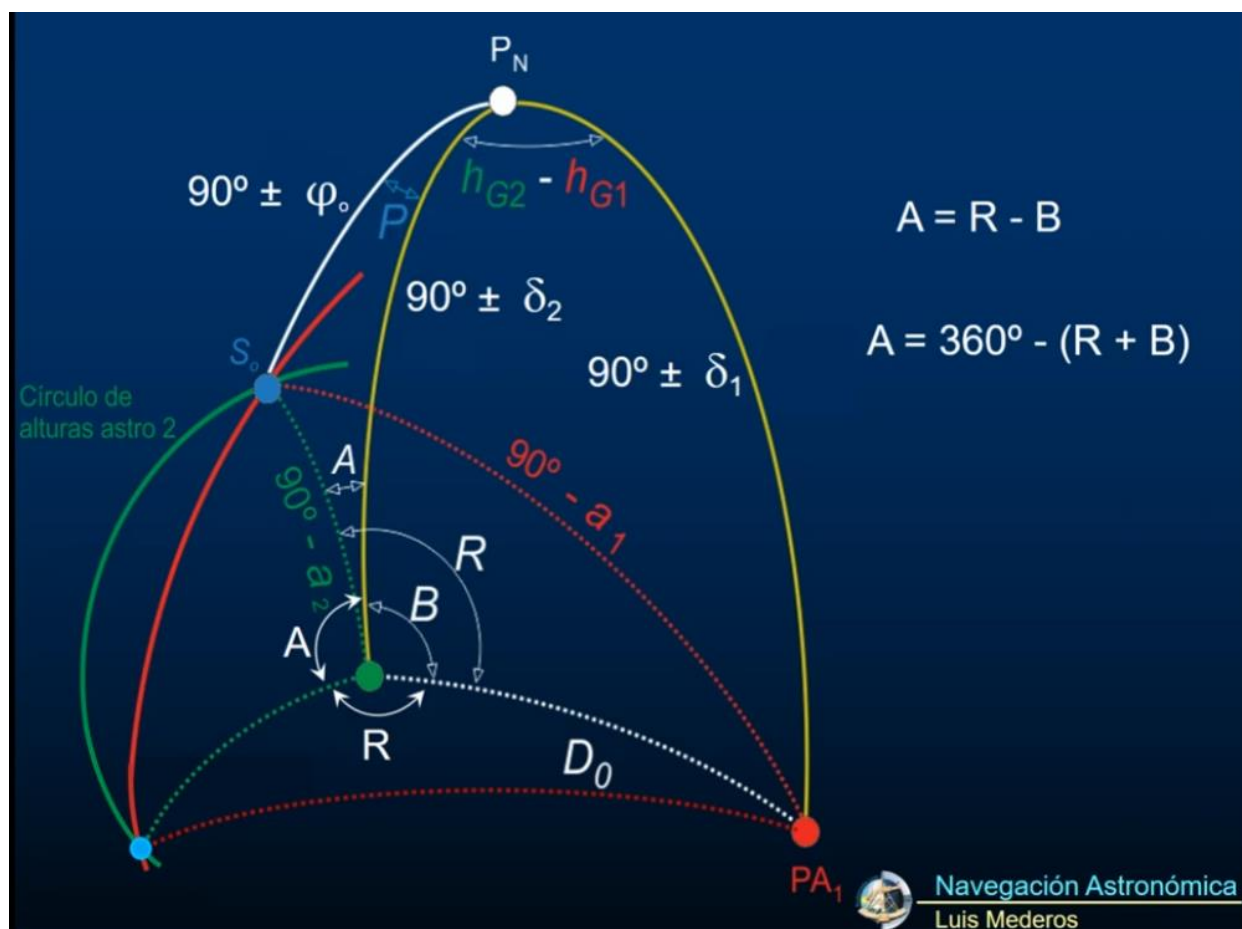


Figura 2-7 Triángulos esféricos para dos círculos de altura [14]

Las líneas amarillas de la figura 2-7 son los meridianos celestes de los dos astros, y sus valores son las codeclinaciones, que ya conocemos. Asimismo, conocemos el valor del vértice superior del triángulo, ubicado en el polo norte, que no es más que la diferencia (en valor absoluto) de los horarios en Greenwich respectivos. Por tanto, podemos aplicar el teorema de los cosenos para obtener el valor del lado D_0 , que no es más que la distancia ortodrómica entre los dos polos de iluminación de los astros.

Una vez calculado D_0 , aplicamos nuevamente el teorema de los cosenos para obtener el ángulo B , que es el rumbo ortodrómico inicial de la trayectoria entre el astro 2 y el astro 1.

Del triángulo punteado de la figura 2-7, que une los puntos S_0 , PA_1 y PA_2 , aplicando nuevamente el teorema de los cosenos, obtenemos el ángulo R . Una vez calculado R , es inmediato calcular el ángulo A como la diferencia entre R y B .

Ahora, con el triángulo esférico que une los puntos S_0 , P_N y PA_2 , podemos aplicar dos veces el teorema de los cosenos, la primera para calcular el valor de la colatitud (y, por tanto, la latitud de S_0), y la segunda y última para calcular el valor del ángulo P , del cual se obtiene la longitud de S_0 a partir del valor de h_{G2} .

Por tanto, aplicando un total de cinco veces el teorema de los cosenos, somos capaces de calcular la latitud y longitud de uno de los dos puntos de corte entre dos círculos de altura. Para calcular la latitud y longitud del otro punto de corte, los valores de D_0 , B y R no varían. Sin embargo, el valor del ángulo A es, ahora:

$$360^\circ - B - R.$$

Y nos queda calcular los nuevos valores de la colatitud y del ángulo en el polo, pero ahora sobre el triángulo esférico formado por los puntos S_0' , P_N y PA_1 , obteniendo entonces la latitud y longitud del segundo punto de corte.

Cuando se observan las alturas de únicamente dos astros, los círculos de alturas iguales asociados se cruzan en dos puntos, es decir, la intersección de los dos círculos de alturas iguales crea dos posiciones posibles para la embarcación. Sin embargo, el navegante puede utilizar información adicional o realizar observaciones adicionales para determinar cuál de las dos posiciones es la correcta:

- Realizar observaciones adicionales: la intersección de tres o más círculos de alturas iguales proporciona una posición única para la embarcación. La probabilidad de error se reduce considerablemente en comparación con el caso de solo dos círculos y, además, la posición resultante es más precisa y ofrece menos margen de error.
- Utilizar información adicional: si además de disponer de las alturas de los dos astros, se dispone también de los azimuts aproximados a los mismos, el navegante puede conocer su situación relativa con respecto a los polos de iluminación. Esta información debería ser suficiente para poder decidir cuál de los dos puntos de corte representa la posición correcta de la embarcación.

2.3 Navegación astronómica con situación de estima

La navegación de estima es un método que implica calcular y proyectar la posición futura de una embarcación basándose en su velocidad y rumbo actuales. Aunque se supone que la embarcación navega a una velocidad y rumbo constantes, en la realidad, diversos factores como las corrientes marinas, el viento, las mareas y las condiciones meteorológicas pueden afectar a la derrota real seguida.

La situación de estima se actualiza periódicamente en función del tiempo transcurrido desde la última corrección y de los cambios en la velocidad y el rumbo. Este método es especialmente relevante en travesías oceánicas de larga distancia, donde la embarcación se aleja de las referencias costeras y la actualización frecuente de la posición es esencial para la seguridad y la eficacia en la navegación.

La navegación astronómica con situación de estima es una técnica, utilizada en la navegación marítima, que consiste en determinar la posición de una embarcación en el océano utilizando observaciones astronómicas. Sin embargo, y a diferencia del caso anterior, antes de realizar las observaciones astronómicas se debe tener una posición estimada basada en el rumbo y velocidad de la embarcación desde la última posición conocida. Esta posición se llama "situación de estima" y sirve como punto de partida para las observaciones astronómicas. En lo que sigue, se supone que se dispone de una situación estimada inicial aceptable.

Por último, es importante mencionar que la navegación astronómica requiere conocimientos detallados de cálculos astronómicos, así como el uso adecuado de instrumentos de navegación. Además, la precisión de este método depende en mucha medida de la habilidad del navegante y de las condiciones atmosféricas.

2.3.1 Triángulo de posición

Todos los cálculos necesarios para situarse mediante la navegación astronómica buscan obtener las coordenadas geográficas (latitud I y longitud L), de un navegante que en un determinado momento observa a un astro (o astros) con unas determinadas coordenadas horizontales (azimut y altura), y dispone de las coordenadas horarias de los mismos (horario en Greenwich y declinación).

Como veremos, en cada instante, y para cada astro observado, existe una relación única entre los tres pares de coordenadas mencionados anteriormente. Y esta relación se puede plasmar de forma gráfica sobre la esfera celeste, en forma de un triángulo esférico cuyos vértices son el polo norte celeste, el astro y el cenit del observador, y cuyos lados quedan formados por arcos del meridiano celeste del observador, el meridiano celeste del astro y la vertical del astro.

El triángulo esférico así formado se denomina triángulo de posición, y es único para cada terna astro, observador e instante de tiempo.

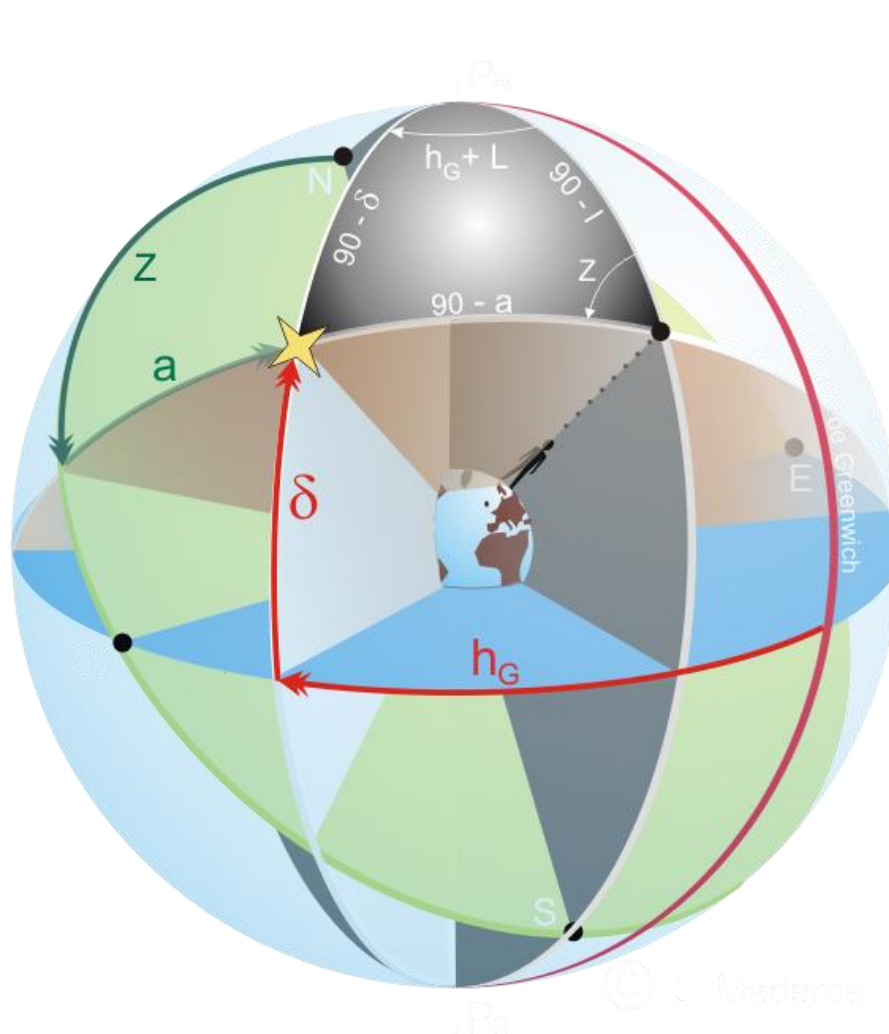


Figura 2-8 Triángulo de posición con el astro al oeste del observador [9]

De la figura 2-8 del triángulo de posición tenemos que:

- El vértice en el polo norte celeste, que no es más que el valor del ángulo en el polo $\hat{P}$, toma el valor $|h_G^* + L|$ o el valor $360^\circ - |h_G^* + L|$, dependiendo de si el astro se sitúa al oeste o al este del observador, respectivamente.

Hay que medir $\hat{P}$ siempre por el camino más corto, de manera que no sobrepase los 180° , pues, de lo contrario, los círculos máximos no se cortarían formando un triángulo esférico.

- El vértice en el cenit del observador es el ángulo $\hat{Z}$. Al igual que el ángulo en el polo, su valor varía dependiendo de si el astro se sitúa al oeste o al este del observador.

Toma el valor $360^\circ - \hat{Z}$ si $\hat{Z} \geq 180^\circ$, lo cual ocurre si el astro se sitúa al este del observador.

- El lado del triángulo que va del astro al cenit (arco de la vertical del astro) es la distancia cenital C_a .
- El lado del triángulo que va del astro al polo norte celeste (arco del meridiano celeste del astro) es la codeclinación Δ .
- El lado del triángulo que va del cenit al polo norte celeste (arco del meridiano celeste del observador) toma el valor $90^\circ - l$, y se denomina colatitud, Cl.

El vértice en el astro, denominado ángulo paraláctico, $\hat{A}$, no se utiliza en navegación astronómica básica.

Para resolver analíticamente el triángulo de posición, es suficiente con aplicar el teorema de los cosenos (ver apartado 2.1.6). De esta manera, para calcular cualquier lado o ángulo del triángulo de posición, únicamente tenemos que sustituir los valores conocidos y despejar el valor a calcular.

Un caso particular se produce cuando el astro en cuestión pasa por el meridiano celeste del observador. En este caso, el meridiano celeste del observador y el meridiano celeste del astro se superponen, y el triángulo de posición se convierte en una línea de posición, simplificando así los cálculos.

La altura meridiana o culminación de un astro es la máxima altura que dicho astro alcanza sobre el horizonte, y se produce precisamente en el instante en que atraviesa el meridiano celeste del observador. En ese instante, el astro se encuentra exactamente en la línea norte-sur del navegante, es decir, en su meridiano. Esta particularidad hace que sea muy sencillo calcular el valor de la latitud, a partir de la declinación y de la distancia cenital.

Cuando la latitud es mayor que la declinación del astro, la codeclinación es igual a la suma de la colatitud y de la distancia cenital. Por tanto, en este caso tenemos:

$$90^\circ - \delta = (90^\circ - l) + (90^\circ - a) \rightarrow \delta + (90^\circ - a) = l \rightarrow l = \delta + C_a$$

Pero cuando la latitud es menor que la declinación del astro, la colatitud es igual a la suma de la codeclinación y de la distancia cenital. Y, por tanto, en este otro caso tenemos:

$$90^\circ - l = (90^\circ - \delta) + (90^\circ - a) \rightarrow \delta - (90^\circ - a) = l \rightarrow l = \delta - C_a$$

2.3.2 Recta de altura

Una vez realizadas las pertinentes observaciones astronómicas, y puesto que se dispone de una situación de estima inicial razonable, se puede aceptar que los círculos de alturas iguales obtenidos estarán razonablemente cerca⁷ de la situación de estima inicial.

Por tanto, ya no es necesario dibujar sobre una carta el círculo de alturas completo, sino sólo la parte que más se aproxime a nuestra situación de estima. Y dado que el círculo de alturas es usualmente muy grande (para una altura medida de 45° , su radio sería de 2.700 millas), se puede aproximar dicha parte a una línea recta, tangente al círculo de alturas, denominada recta de altura.

Sin embargo, para que esta aproximación sea viable, se tienen que cumplir necesariamente dos condiciones previas:

⁷ De hecho, pasará por encima si la situación estimada y la verdadera coinciden.

- La primera condición requiere disponer de una situación de estima aceptable, de manera que las distancias entre la situación estimada S_e y los círculos de alturas iguales obtenidos sean despreciables en comparación con los radios de dichos círculos.

Según la literatura existente [18], se ha definido como aceptable un error en la situación de estima de hasta 20 millas.

- La segunda, es que las dimensiones de los círculos de alturas iguales deben ser lo suficientemente grandes como para que su curvatura no sea importante y puedan aproximarse por una recta sin pérdida de precisión. Esta condición implica que no pueden utilizarse observaciones de astros cercanos al cénit, pues en este caso el círculo de alturas correspondiente tendrá un radio demasiado pequeño.

Así, cumpliendo estas condiciones, para cada astro observado tenemos que la recta de altura obtenida (al igual que el círculo de alturas iguales de la que se deduce), es una línea a lo largo de la cual la altura del astro es, a efectos prácticos, constante en el momento de la observación.

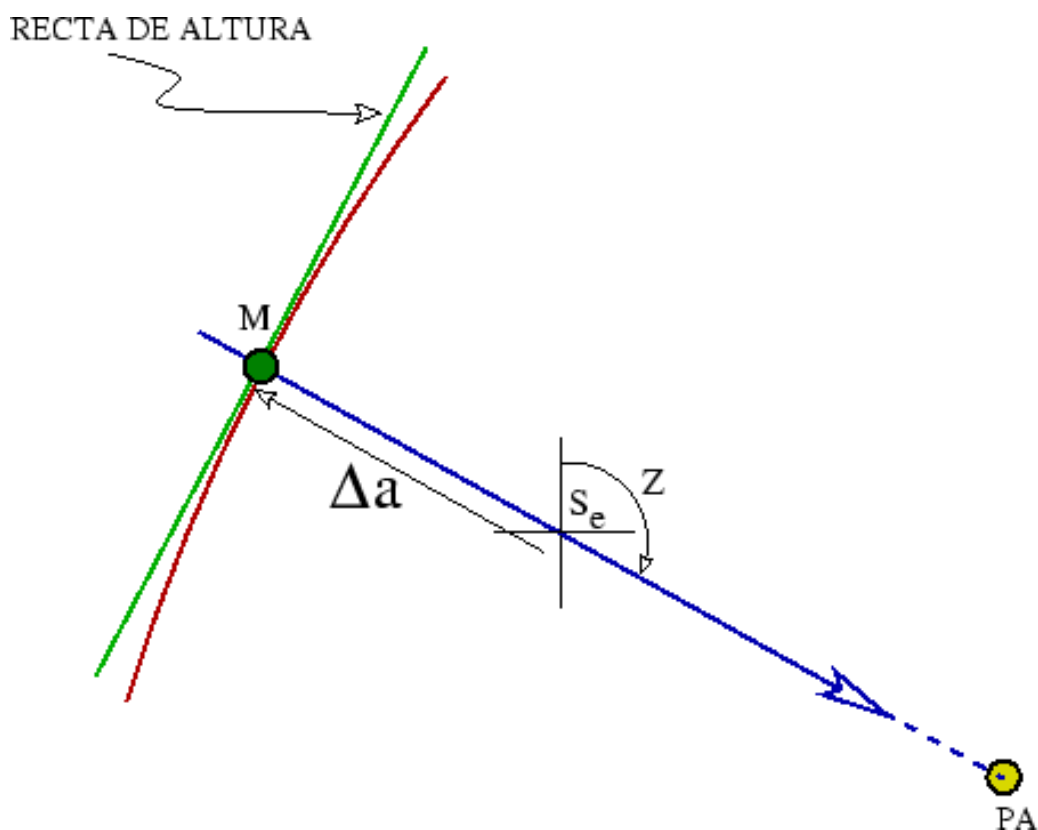


Figura 2-9 Recta de altura [9]

El azimut es en realidad la demora al polo de iluminación del astro, es decir, al centro del círculo de alturas iguales. Por tanto, sabemos que el azimut estimado $\hat{Z}_e$ no es más que la línea recta que une S_e con el polo de iluminación PA del astro (ver figura 2-9).

Dado que el error máximo asumido en la situación de estima S_e con respecto a la situación verdadera S_o es despreciable (comparado con el radio del círculo de alturas iguales), podemos aceptar que el azimut $\hat{Z}_e$ calculado a partir de S_e es, a efectos prácticos⁸, el mismo que hubiésemos observado de estar en la situación verdadera S_o . Es decir, tenemos que $\hat{Z}_e \cong \hat{Z}_o = \hat{Z}$.

⁸ Se puede considerar que la paralaje es nula, es decir, la dirección de observación al PA no varía perceptiblemente ya que la distancia a dicho punto es lo suficientemente grande.

Al obtener la altura verdadera a_v del astro, tenemos que el polo de iluminación del astro PA se encuentra a una distancia $C_a^{verd} = 90^\circ - a_v$. Sin embargo, un hipotético observador situado en S_e hubiese obtenido una altura (estimada) a_e , a una distancia $C_a^{est} = 90^\circ - a_e$ de PA . La diferencia entre esas distancias es entonces la distancia por recorrer, Δa , desde S_e y en la dirección $\hat{Z}$:

$$90^\circ - a_e - (90^\circ - a_v) = a_v - a_e = \Delta a$$

Aquí surgen dos posibilidades:

- Si $\Delta a > 0$ entonces desde la posición de estima S_e se calcula un punto M sobre el azimut $\hat{Z}$, en sentido hacia el PA , Δa millas.
- Si $\Delta a < 0$ entonces desde la posición de estima S_e se calcula un punto M sobre el azimut $\hat{Z}$, pero en sentido contrario al PA , Δa millas.

El punto M calculado, denominado punto aproximado, es el punto sobre el cual debe pasar la recta de altura del astro, perpendicularmente al azimut $\hat{Z}$ (ver figura 2-9). El conjunto de datos mínimos necesarios para poder obtener la recta de altura se conoce como determinante de la recta de altura, y comprende los siguientes elementos:

- La situación estimada, S_e
- El azimut, $\hat{Z}$
- La diferencia de alturas verdadera y estimada, Δa
- La fecha-hora UT de la observación

Mediante la observación de un solo astro, se puede realizar una corrección de la situación de estima, simplemente sustituyendo S_e por M . La nueva posición estimada siempre será mejor, pues el punto M pertenece a la recta de altura.

Es preciso tener en cuenta que el cálculo de la recta de altura no depende de la situación de estima escogida, siempre que ésta sea aceptable. Es decir, la recta de altura correspondiente a la observación de un astro es única e independiente de la situación de estima utilizada; por tanto, es indiferente utilizar M , S_e o cualquier otra situación razonable, como situación estimada inicial para el cálculo de la recta de altura.

2.3.3 Cálculo gráfico de la posición verdadera

A diferencia de la navegación astronómica sin situación de estima, donde el cálculo analítico es la única opción disponible, cuando se dispone de una situación de estima previa es posible utilizar una carta náutica que nos permita representar gráficamente las rectas de altura obtenidas.

Para realizar este cálculo, y al igual que en el caso anterior, es necesario observar al menos dos astros de manera que se puedan obtener sendas rectas de altura que se corten entre sí. En este caso, existe un único punto de corte que será la posición verdadera S_o de la embarcación (ver figura 2-10). Para calcular su latitud y longitud, se puede proceder como sigue en los siguientes párrafos.

De la observación de dos astros obtenemos las dos alturas verdaderas respectivas, a_1 y a_2 . Asimismo, a partir de la hora UT de medida podemos obtener del almanaque náutico u otros medios el horario en Greenwich de los astros, h_{G1} y h_{G2} , y también sus declinaciones δ_1 y δ_2 .

Para cada astro, tenemos entonces un triángulo de posición del que podemos obtener los datos necesarios, que son el azimut $\hat{Z}$ y la distancia cenital estimada C_a^{est} . El resto de los valores del triángulo de posición se pueden obtener de manera casi inmediata, como veremos a continuación.

Sabemos que el ángulo en el polo se debe medir por el camino más corto. Para ello, calculamos primero la suma del horario de Greenwich del astro y la longitud de la situación de estima, que no es más que el horario del lugar del astro. Si el resultado es negativo, se le suman 360° :

$$h_{l*} = h_{G*} + L_e [+360^\circ]$$

Y de aquí se deduce rápidamente el valor de $\hat{P}$:

$$\hat{P}(W) = h_{l*} \quad , \text{ si } h_{l*} \leq 180^\circ$$

$$\hat{P}(E) = 360^\circ - h_{l*} \quad , \text{ si } h_{l*} > 180^\circ$$

La codeclinación se calcula de forma inmediata:

$$\Delta = 90^\circ - \delta$$

Y la colatitud también, utilizando la latitud de la situación estimada:

$$C_l = 90^\circ - l_e$$

A partir de aquí, ya estamos en condiciones de obtener el azimut $\hat{Z}$ y la distancia cenital estimada C_a^{est} del triángulo de posición, aplicando dos veces el teorema de los cosenos. De la distancia cenital estimada obtenemos la altura estimada, y de ahí la diferencia de alturas Δa .

Una vez obtenido el determinante de la recta de altura, se procede a obtener el punto aproximado M. Para ello, trazamos el azimut sobre la carta desde la posición estimada S_e , teniendo en cuenta que el azimut obtenido del triángulo de posición es en realidad un azimut astronómico (medido desde el norte hacia el este o el oeste, en función de si el ángulo en el polo $\hat{P}$ es oriental u occidental respectivamente).

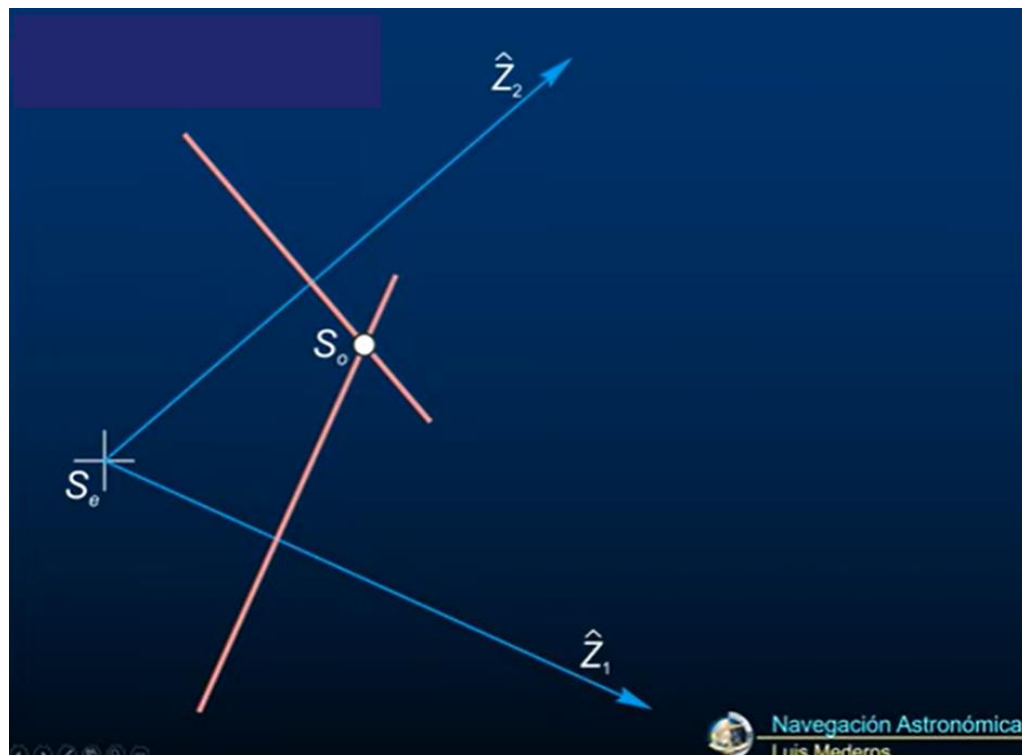


Figura 2-10 Intersección entre dos rectas de altura [14]

Utilizando las escalas de longitudes y latitudes de la carta, se mide sobre el azimut la diferencia de alturas Δa en sentido hacia el polo de iluminación o en sentido contrario, en función del signo de Δa . Se dibuja el punto M calculado sobre la carta, y se traza la perpendicular al azimut que pase por dicho punto, que será la recta de altura.

Aplicando el mismo procedimiento al segundo astro, obtenemos una segunda recta de altura. El punto de corte es la situación verdadera S_o , tal y como se puede observar en la figura 2-10.

Por tanto, aplicando un total de cuatro veces el teorema de los cosenos (dos por cada recta de altura), somos capaces de trazar dos rectas de altura sobre la carta y obtener la latitud y longitud de la situación verdadera de la embarcación, que será la del punto de corte entre dichas rectas.

2.3.4 Cálculo analítico de la posición verdadera

En este caso, que es el caso de la aplicación desarrollada para este trabajo, no tenemos a disposición una carta sobre la que poder realizar los cálculos gráficos descritos en el apartado anterior, ni podemos terminar dibujando sobre ella las rectas de altura obtenidas. Por tanto, necesitamos sustituir los cálculos realizados de forma gráfica en el apartado anterior, por cálculos exclusivamente analíticos.

Para obtener el punto aproximado M se realiza en esta ocasión un cálculo de estima, considerando S_e como punto de partida y navegando una distancia Δa con rumbo $\hat{Z}$ o rumbo contrario a $\hat{Z}$, dependiendo del signo de Δa . El punto de destino de esta navegación ficticia será el punto M.

Desde este punto M calculado se realiza otro cálculo de estima, navegando por ejemplo una distancia arbitraria pero razonable de veinticinco (25) millas con rumbo perpendicular al azimut, en un sentido y en otro. De esta manera obtenemos dos puntos que definen a la recta de altura buscada.

Se realiza el mismo proceso con el segundo astro y se obtiene la segunda recta de altura. Para encontrar el punto de corte, que es la posición verdadera S_o de la embarcación, sólo hay que resolver el sistema de ecuaciones lineales formado por las ecuaciones de las dos rectas.

3 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN WEB

3.1 Decisiones de diseño

Las aplicaciones web modernas para navegación astronómica deben centrarse en proporcionar interfaces de usuario interactivas y atractivas. Esto puede incluir visualizaciones en tiempo real, gráficos dinámicos e interactivos, flexibilidad y facilidad de uso (interfaces intuitivas).

Además, este tipo de aplicaciones web deben tener también un enfoque educativo y de divulgación, sirviendo de herramientas interactivas para ayudar a los usuarios a comprender conceptos astronómicos relevantes.

Por otro lado, la integración con fuentes de datos astronómicos en tiempo real es esencial. Esto puede incluir el uso de servicios web o la integración de librerías que proporcionen efemérides actualizadas, datos sobre posiciones celestes y otra información relevante.

3.2 Requisitos técnicos

Para implementar la aplicación se ha utilizado el lenguaje de programación Python por requerimientos técnicos del proyecto, para que los módulos de los que consta esta aplicación puedan formar parte de otros proyectos desarrollados en este mismo lenguaje de programación. Asimismo, se ha utilizado el *framework* Dash y la librería Plotly para el diseño de la interfaz, y la librería Skyfield para realizar parte de los cálculos astronómicos requeridos.

3.2.1 Python

Python [19] es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de propósito general. Diseñado por Guido van Rossum y lanzado por primera vez en 1991, Python se destaca por su legibilidad y simplicidad, lo que facilita el aprendizaje para los principiantes en programación. Su sintaxis permite a los desarrolladores expresar conceptos en menos líneas de código en comparación con otros lenguajes, como C++ o Java.

Python es un lenguaje multiparadigma, que soporta la programación orientada a objetos, imperativa y, en menor medida, funcional. Es extensible y se puede integrar con otros lenguajes de programación, permitiendo el uso de librerías y herramientas en varios contextos.

Esta versatilidad de Python lo hace popular en diversas áreas como desarrollo web, análisis de datos, aprendizaje automático, ciencia de datos, automatización y desarrollo de scripts. Su amplia

gama de librerías y frameworks, como Dash para desarrollo web y Skyfield para cálculos astronómicos, han sido factores que han ayudado mucho en el desarrollo de la aplicación.

3.2.2 Dash

Dash [20] es un marco de desarrollo web de Python que permite crear aplicaciones web interactivas y visualizaciones de datos de manera rápida y sencilla. Dash es especialmente popular en el ámbito de la ciencia de datos y la visualización de datos debido a su capacidad para integrarse bien con librerías como Plotly⁹. Además, permite a los desarrolladores crear aplicaciones web utilizando Python puro, lo que facilita el desarrollo a aquellos que ya están familiarizados con este lenguaje.

Dash permite la creación de aplicaciones con componentes interactivos, como gráficos interactivos, tablas, controles deslizantes y cuadros de texto. Estos componentes pueden actualizarse en tiempo real en respuesta a las interacciones del usuario. Además, es altamente personalizable y admite extensiones y complementos. Se pueden agregar temas, personalizar la apariencia de los gráficos y ampliar la funcionalidad según las necesidades.

Por tanto, Dash puede ser utilizado en el contexto de navegación astronómica para desarrollar aplicaciones web interactivas que faciliten la obtención, visualización y análisis de datos astronómicos relevantes, utilizando gráficos interactivos de Plotly para representar las posiciones obtenidas de observaciones de los astros, y realizar comparativas entre los distintos métodos de obtención de las mismas.

Dash utiliza Flask internamente como servidor web, el cual maneja las solicitudes HTTP y sirve la aplicación web a los usuarios.

3.2.3 Skyfield

La navegación astronómica implica utilizar datos astronómicos precisos para determinar la posición de una embarcación en el mar, a partir de observaciones de cuerpos celestes. Estos datos, necesarios para calcular las coordenadas celestes de los astros observados, pueden proceder principalmente de publicaciones oficiales anuales o de diversas aplicaciones o librerías capaces de realizar los cálculos necesarios para la navegación astronómica.

En la aplicación se ha utilizado Skyfield [21], que es una librería de código abierto implementada en el lenguaje de programación Python, y diseñada para realizar cálculos astronómicos precisos. Es capaz de calcular posiciones precisas de objetos celestes como planetas, estrellas, satélites y la Luna, a partir de bases de datos astronómicas que se pueden obtener de Internet.

Los datos astronómicos utilizados por Skyfield proceden fundamentalmente de dos fuentes:

- Catálogo Hipparcos: el catálogo Hipparcos [22] es un catálogo estelar que contiene mediciones precisas de las posiciones y magnitudes de alrededor de 120.000 estrellas. Este catálogo fue producido por la misión espacial Hipparcos de la Agencia Espacial Europea (ESA), que operó desde 1989 hasta 1993. Las mediciones realizadas por Hipparcos han sido fundamentales en astronomía y son ampliamente utilizadas en diversos campos, incluida la navegación astronómica. En concreto, Skyfield descarga y utiliza la base de datos de estrellas “Hipparcos Data” (archivo `hip_main.dat`), que contiene los datos del catálogo Hipparcos.
- JPL ephemeris DE421: el JPL Ephemeris DE421 [23] (Development Ephemeris 421) es un conjunto de datos de efemérides astronómicas desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA. Estas efemérides proporcionan información detallada sobre las posiciones y

⁹ Plotly es la librería de Python más utilizada para crear gráficos dinámicos, y se integra nativamente con Dash.

movimientos de los cuerpos celestes en el sistema solar, incluyendo planetas, lunas y otros objetos importantes. En concreto, Skyfield descarga y utiliza el archivo "de421.bsp", que es una base de datos de efemérides válidas desde 1900 hasta 2050. La extensión ".bsp" se refiere a "Binary SPice"¹⁰, un formato de archivo utilizado por la NASA para almacenar datos de efemérides de cuerpos celestes.

Estas fuentes de datos astronómicos son esenciales para que la librería Skyfield pueda realizar cálculos precisos en astronomía y navegación astronómica, y predecir la posición de objetos celestes en momentos específicos.

Existe un proyecto de código abierto, denominado SkyAlmanac-Py3 que, utilizando la librería Skyfield, ha conseguido reproducir fielmente los datos astronómicos ofrecidos por el Almanaque Náutico publicado por el United States Naval Observatory (USNO).

Se ha realizado una comparativa de los datos astronómicos calculados utilizando Skyfield con los datos publicados por el Almanaque Náutico español, observando pequeñas discrepancias que en el peor de los casos no van más allá de unas pocas décimas de minuto (2-3 décimas). Estas pequeñas discrepancias, que no entorpecen en absoluto los objetivos de este proyecto, pueden ser debidas a no utilizar correctamente algunos parámetros de ajuste de la librería Skyfield.

3.3 Desarrollo modular

El código de la aplicación web que se ha desarrollado en el marco de este proyecto tiene un enfoque marcadamente modular. Se ha dividido la funcionalidad del aplicativo en una serie de módulos que encapsulan funcionalidades específicas que pueden ser desplegadas de manera independiente, lo que permite realizar actualizaciones y cambios en los mismos sin necesidad de rediseñar la aplicación. Cada módulo está constituido por un único fichero Python que ha sido desarrollado, probado y desplegado de forma independiente, de tal manera que cuando trabajan juntos conforman una aplicación web completamente funcional.

Se trata de una separación lógica, ya que todos los módulos están integrados en el mismo desarrollo en Python. Esta arquitectura modular y escalable ha permitido gestionar eficazmente las complejidades de una aplicación web para comparativas astronómicas, aprovechando las capacidades de Dash y Plotly para la interfaz de usuario y Skyfield para los cálculos astronómicos.

Cada módulo de la aplicación tiene un propósito específico. A continuación, se exponen las funcionalidades básicas de cada uno de los cinco módulos de los que consta la aplicación:

- “appdef.py”: este módulo actúa como el punto de entrada de la aplicación. Aquí es donde se definen los callbacks de Dash, que gestionan las acciones del usuario en la interfaz gráfica y actualizan los elementos de la interfaz en respuesta a esas acciones, y que por tanto son esenciales para la interactividad de la aplicación web. Este módulo se subdivide a su vez en tres submódulos que se corresponden con los tres apartados de los que se compone la interfaz web, y que se explicarán detalladamente en el capítulo 4.
- “calculos.py”: aquí es donde se utiliza la librería Skyfield para llevar a cabo diferentes cálculos astronómicos. Además, existen funciones que realizan cálculos de trigonometría esférica, como los del triángulo de posición, necesarios para determinar la ubicación de la embarcación.
- “figura.py”: este módulo es el que se encarga de personalizar el gráfico “Scattergeo” de la librería Plotly, y se utiliza para visualizar gráficamente los resultados de los cálculos. Esto

¹⁰ SPICE es un acrónimo de Spacecraft and Planetary Ephemerides.

incluye la representación de círculos de alturas iguales y rectas de altura, así como sus intersecciones, indicando latitud y longitud.

- “utildef”: este módulo contiene funciones útiles que apoyan a otros módulos. Estas funciones pueden incluir cálculos de distancias geodésicas y otras operaciones auxiliares necesarias para el funcionamiento integral de la aplicación.
- “astros.py”: este archivo contiene listas de los astros observables (estrellas y planetas), incluyendo sus códigos del catálogo de Hipparcos y HR. El código HR de las estrellas se refiere al "Harvard Revised Photometry Catalogue", comúnmente conocido como el "Catálogo Bright Star" o "Catálogo de Estrellas Brillantes", y que asigna a cada estrella un número HR, basado en su brillo aparente en el cielo nocturno. Estos códigos son esenciales a la hora de utilizar la librería Skyfield, que realiza sus cálculos astronómicos basados en estos identificadores.

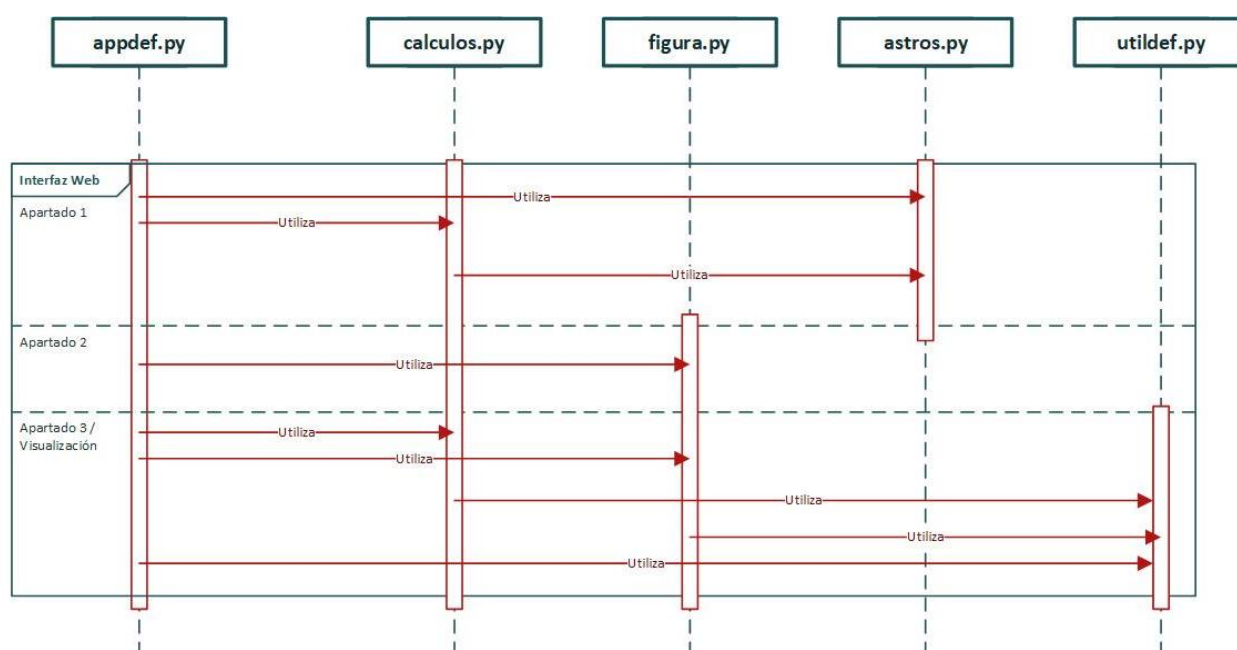


Figura 3-1 Diagrama de relaciones entre los distintos módulos de la aplicación

3.4 Patrones de diseño

Los patrones de diseño de software son soluciones generalizadas a problemas comunes en el diseño y desarrollo de software, es decir, evitan que los desarrolladores tengan que encontrar soluciones desde cero para problemas que ya han sido resueltos. Esto ahorra tiempo y reduce la probabilidad de errores.

Al seguir un patrón de diseño, el código resultante es más ordenado, consistente y fácil de entender, lo cual facilita su mantenimiento y evolución.

En la aplicación web desarrollada, se han seguido los patrones de diseño expuestos a continuación.

3.4.1 Patrón Modelo-Vista-Controlador

Para el desarrollo de la aplicación web se ha utilizado el patrón de arquitectura de software conocido como Modelo-Vista-Controlador [24] (en adelante MVC). La aplicación de este patrón ha permitido estructurar la aplicación de manera eficiente, asegurando que sea escalable, mantenible y fácil de entender.

El patrón MVC es un patrón de arquitectura de software ampliamente utilizado para desarrollar interfaces de usuario, y divide una aplicación en tres componentes interconectados. Esto se hace para separar las representaciones internas de la información de las formas en que la información se presenta y acepta del usuario.

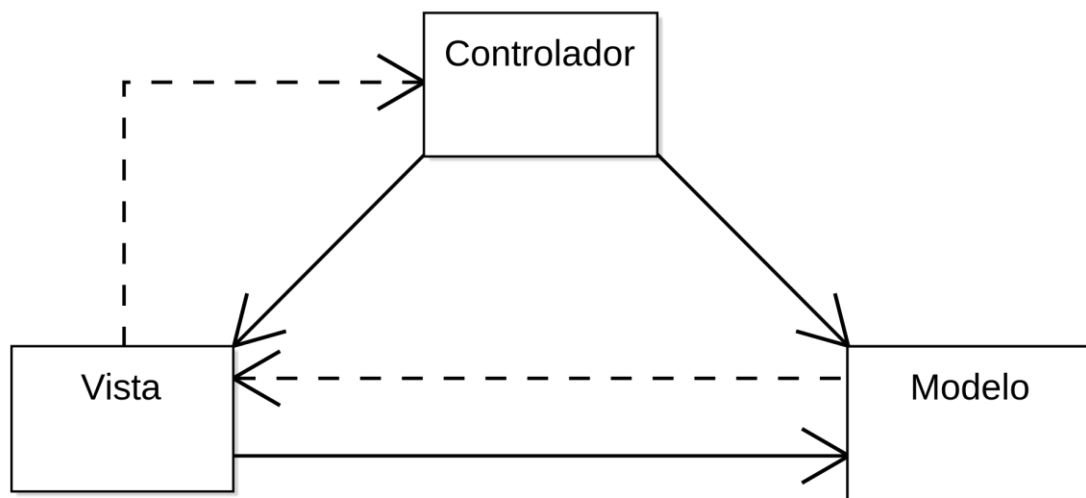


Figura 3-2 Patrón Modelo-Vista-Controlador

A continuación, se detalla cada componente y cómo se aplica en el contexto del presente proyecto de desarrollo.

- **Modelo:** el Modelo representa la parte lógica de la aplicación que gestiona los datos, la lógica y las reglas del negocio. En el contexto de esta aplicación, en el Modelo se han integrado las siguientes funcionalidades:
 - Realizar cálculos astronómicos utilizando Skyfield y otras funciones desarrolladas al efecto.
 - Acceder y gestionar datos astronómicos, como posiciones de estrellas, planetas, etc.
 - Realizar operaciones como cálculos de posición, estima y comparativas.
- **Vista:** la Vista es responsable de la representación visual de los datos, es decir, todo lo relacionado con la interfaz de usuario. La vista solo recibe datos, no realiza ningún procesamiento de los mismos. En el contexto de esta aplicación, en la Vista se han integrado las siguientes funcionalidades:
 - Mostrar visualizaciones de los datos astronómicos y resultados de cálculos.
 - Utilizar Dash para crear gráficos interactivos y otros componentes de la interfaz de usuario.
- **Controlador:** el Controlador actúa como un intermediario entre el Modelo y la Vista, controlando el flujo de datos y transformando las entradas del usuario en acciones. En Dash,

los controladores se implementan a través de "*callbacks*" que reaccionan a eventos de la interfaz de usuario (como por ejemplo clics de botones o selecciones en *dropdowns*). Estos *callbacks* son los que responden a las interacciones del usuario, procesan los datos mediante el Modelo y luego actualizan la Vista. En el contexto de esta aplicación, en el Controlador se han integrado las siguientes funcionalidades:

- Manejar la entrada del usuario (como selecciones de objetos astronómicos, rangos de fechas, etc.).
- Llamar a las funciones del Modelo para obtener o actualizar los datos basándose en la entrada del usuario.
- Actualizar la Vista cuando el Modelo cambia.

3.4.2 Patrón Observer

El patrón Observer [25] (Observador en español) es un patrón de diseño de software que define una dependencia entre objetos del tipo uno a muchos, de manera que cuando un objeto (conocido como "sujeto") cambia su estado, todos sus objetos dependientes (los "observadores") son notificados y actualizados automáticamente.

Este patrón es fundamental en la programación de interfaces de usuario y aplicaciones reactivas, donde los cambios en el estado de ciertos elementos deben reflejarse en tiempo real en otras partes de la aplicación, garantizando en nuestro caso una experiencia de usuario fluida y dinámica. Asimismo, permite una separación clara y eficaz entre el Modelo y la Vista, facilitando un diseño modular, mantenible y escalable.

Dash implementa de forma nativa el patrón Observer. En Dash, los componentes de la interfaz de usuario (como botones, gráficos, entradas de texto) son los observadores. Estos componentes "escuchan" los cambios en los datos o en las interacciones del usuario. Por ejemplo, un gráfico puede actualizarse automáticamente cuando un usuario selecciona un rango de fechas en un selector de fechas.

De esta manera, Dash permite la creación de interfaces de usuario reactivas, donde los elementos de la interfaz de usuario se actualizan en respuesta a las interacciones del usuario o a cambios en los datos, permitiendo a los desarrolladores centrarse en definir la lógica de interacción y visualización de datos, sin tener que implementar explícitamente todo el mecanismo de observación y notificación que caracteriza al patrón Observer.

Siguiendo este patrón de diseño, la aplicación está diseñada para responder a cambios en el estado de los datos, de manera que cuando se realizan nuevos cálculos o se actualizan los datos, la interfaz de usuario se actualiza automáticamente para reflejar estos cambios. Como ya hemos mencionado, en el framework Dash, los distintos componentes de la interfaz de usuario actúan como observadores. Estos componentes están diseñados para ser sensibles a cambios en los datos, y se actualizan en respuesta a estos cambios.

De esta manera, tenemos un ciclo continuo de retroalimentación entre el usuario, la interfaz de usuario y los cálculos astronómicos realizados. Las interacciones del usuario con la interfaz desencadenan cálculos astronómicos, y los resultados de estos cálculos se reflejan nuevamente en la interfaz.

3.5 Arquitectura

La aplicación web que se ha desarrollado en el marco de este proyecto se ha estructurado en un modelo de tres capas (presentación, lógica y datos), y se ha desarrollado íntegramente con el lenguaje de programación Python.

3.5.1 Esquema lógico

La arquitectura de tres capas es un modelo de diseño de software que garantiza una buena separación de responsabilidades, facilitando el mantenimiento y la escalabilidad de la aplicación web. En el esquema lógico de la arquitectura se pueden identificar los siguientes componentes:

- Capa de presentación (frontend): es el nivel más alto de la aplicación. Su principal función es interactuar con el usuario final, enfocándose en la interfaz de usuario y la experiencia del usuario.
- Capa de lógica de negocio (backend): esta capa actúa como un intermediario entre la capa de presentación y la capa de acceso a datos. Es responsable de procesar las solicitudes del usuario, realizar los cálculos y enviar los resultados a la capa de presentación.
- Capa de acceso a datos: es la capa más baja, que interactúa directamente con las bases de datos astronómicas. Está integrada en la librería Skyfield.

A continuación, se expone el diagrama de arquitectura lógica identificando los principales componentes por capa de la aplicación web.

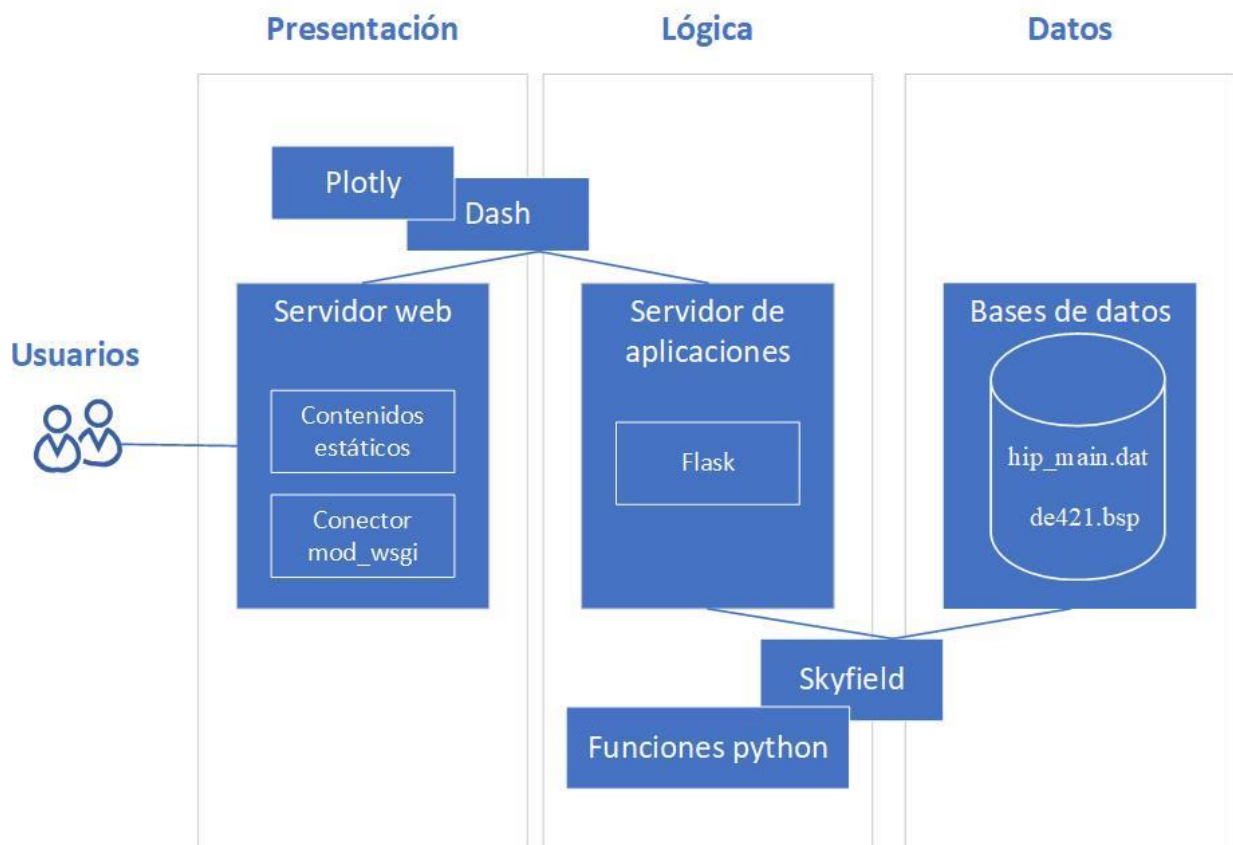


Figura 3-3 Arquitectura lógica de la aplicación

3.5.2 Capa de presentación (frontend)

La capa de presentación, o *frontend*, de una aplicación web es la parte visible de la aplicación donde los usuarios pueden interactuar directamente, es decir, comprende todo lo que se ejecuta en el navegador web. Esta capa es crucial porque determina cómo los usuarios visualizan y manejan los datos astronómicos.

En la capa de presentación, Dash y Plotly se encargan de crear una interfaz de usuario interactiva y visualmente atractiva, permitiendo a los usuarios ingresar datos, interactuar con la aplicación y visualizar los resultados de las comparativas de navegación de manera clara y comprensible.

Plotly es una librería de código abierto, que se integra de forma nativa en Dash, y que permite la creación de visualizaciones de datos interactivas. En concreto, para la representación de los círculos de alturas iguales y de las posiciones estimadas de la embarcación, se ha utilizado el componente de Plotly denominado Scattergeo, que permite visualizar datos geográficos sobre un mapa interactivo de la Tierra, utilizando las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de los puntos a representar.

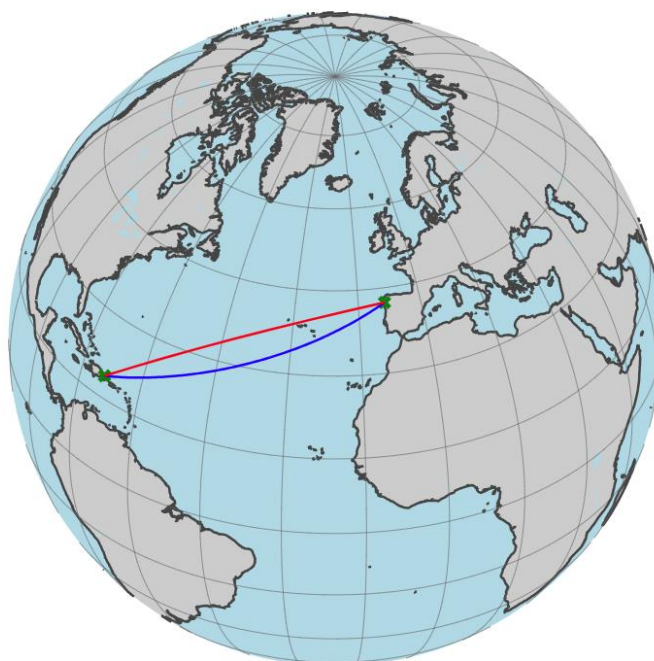


Figura 3-4 Proyección ortográfica de Plotly Scattergeo

Los gráficos creados con Plotly son interactivos. Esto significa que los usuarios pueden hacer *zoom*, arrastrar el mapa, y pasar el cursor sobre los puntos para obtener más información mediante *tooltips*. Utilizando estas capacidades, la aplicación puede mostrar gráficos comparativos que ilustran las diferencias en la situación astronómica con y sin estimaciones.

3.5.3 Capa de lógica de negocio (backend)

La capa de lógica de negocio, o *backend*, de la aplicación web contiene la lógica para procesar las solicitudes del usuario, interactuar con el Modelo y enviar datos a la Vista. Aquí se encuentra el motor de cálculo astronómico impulsado por Skyfield y funciones Python desarrolladas ad-hoc. Esta capa es responsable de realizar todos los cálculos astronómicos precisos y las simulaciones de navegación

astronómica, procesando las entradas del usuario y generando los datos posicionales y comparativos necesarios.

La librería Skyfield se encarga de procesar los datos astronómicos en bruto procedentes de la capa de datos, como por ejemplo las efemérides planetarias, y mediante cálculos astronómicos específicos los transforma en información relevante, como por ejemplo la posición de un planeta en un momento dado. Skyfield devuelve datos principalmente en forma de coordenadas en la esfera celeste. Los tipos de coordenadas que Skyfield calcula y devuelve, en el contexto del presente trabajo, son:

- Coordenadas ecuatoriales, en términos de ascensión recta y declinación. Tienen en cuenta los movimientos de precesión y nutación de la Tierra.
- Coordenadas horizontales, que incluyen la altura verdadera sobre el horizonte y el azimut. Estas coordenadas tienen en cuenta los efectos de refracción de la luz en la atmósfera terrestre (estimados “estándar” o personalizados por el usuario) y la posición geográfica del observador, según el datum WGS84.

La información procedente de Skyfield sirve de entrada a su vez para que determinadas funciones Python del Modelo realicen los cálculos de navegación astronómica necesarios para calcular la posición de la embarcación (con y sin situación de estima previa).

3.5.4 Capa de datos

La capa de datos es responsable de manejar todas las operaciones relacionadas con los datos, como su almacenamiento, recuperación, manipulación y envío a otras capas para su procesamiento o presentación.

En esta aplicación, la capa de datos se encarga únicamente del procesamiento y manipulación de los datos astronómicos presentes en las bases de datos de efemérides planetarias y catálogos estelares. La librería Skyfield descarga automáticamente de Internet estas bases de datos externas si no las encuentra en el servidor.

Estos datos en bruto son los que utiliza Skyfield y las funciones del Modelo para su utilización posterior en los diferentes cálculos astronómicos. Es interesante considerar que, dado que en realidad no hay almacenamiento de datos, todos los cálculos se deben realizar en tiempo real en respuesta a las solicitudes de los usuarios.

3.6 Infraestructura y despliegue

La aplicación web se aloja temporalmente en un servidor en la nube, al que se ha instalado y configurado el servidor web Apache, que es el que sirve en Internet la aplicación web desarrollada y permite un acceso seguro y eficiente a la misma. Además, se ha adquirido el dominio “navegacionastronomica.es”, y se ha configurado para que apunte al servidor en la nube.

El sistema diseñado para este proyecto es una integración de varias tecnologías y componentes, cada uno cumpliendo un rol específico para alcanzar los objetivos de este proyecto. Los principales componentes de este sistema se pueden visualizar en la tabla 3-1.

Componentes del Sistema	
Nombre	Descripción/Versión
Servidor	Ubuntu Server 20.04 LTS
Servidor Web	Apache 2.4
Dominio	navegacionastronomica.es
Contenidos estáticos	Imágenes
Conector	mod_wsgi
Servidor de Aplicaciones	Flask 3.0
Aplicativo	Aplicación web desarrollada en Python 3.8 con el framework Dash 2.14.
Principales librerías	Dash, Plotly, Skyfield
Bases de datos	“Hipparcos Data” y “Ephemeris DE421”

Tabla 3-1 Componentes principales del sistema

3.6.1 Servidor

El servidor donde se aloja la aplicación web está basado en un sistema operativo Linux, en concreto la distribución Ubuntu Server 20.04 LTS.

Ubuntu Server es un proyecto de código abierto conocido por su estabilidad, seguridad y amplia comunidad de usuarios y desarrolladores. En concreto, la versión 20.04 LTS (*Long Term Support*) ofrece actualizaciones de seguridad y soporte extendido a lo largo de un período de cinco años, lo que facilita la configuración y el mantenimiento del servidor, proporcionando una base sólida y confiable para el alojamiento de aplicaciones web.

3.6.2 Servidor web

El Servidor web Apache, también conocido como Apache HTTP Server, es uno de los servidores web más populares y ampliamente utilizados en Internet. Es un software de código abierto desarrollado y mantenido por la Apache Software Foundation, y funciona en varios sistemas operativos, incluyendo UNIX, Linux, MacOS y Windows.

Apache es principalmente un servidor HTTP, lo que significa que utiliza el protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol) para servir archivos y datos en la web, como páginas HTML, imágenes, y estilos CSS. También proporciona características de seguridad, como conexiones seguras mediante el protocolo SSL/TLS.

3.6.3 WSGI

WSGI [26], que significa "Web Server Gateway Interface", es una especificación en Python para una interfaz simple y universal entre servidores web y aplicaciones web. Fue concebido como una forma estandarizada de conectar aplicaciones web y sus frameworks con servidores web, lo que facilita

el desarrollo y la implementación de aplicaciones web en Python. Antes de WSGI, los desarrolladores de aplicaciones web tenían que escribir diferentes códigos para cada servidor web.

Internamente, Dash está construido sobre Flask, que es un framework web WSGI. Esto significa que las aplicaciones Dash son, en esencia, aplicaciones WSGI. Para que Apache pueda comunicarse con este tipo de aplicaciones, utiliza un módulo llamado `mod_wsgi`, que es un adaptador que permite comunicarse con aplicaciones web a través de WSGI. Gracias a este módulo, Apache puede servir la aplicación como lo haría con cualquier otro recurso web, como páginas HTML o archivos PHP.

Para que funcione, es necesario crear un archivo de extensión `.wsgi` en la aplicación web. Este archivo será el que utilice el módulo `mod_wsgi` de Apache para iniciar la aplicación.

3.6.4 HTTP/HTTPS

HTTP, o Protocolo de Transferencia de Hipertexto, es el protocolo de comunicación utilizado en la World Wide Web para la transmisión de datos. Es el medio a través del cual los navegadores web solicitan información de servidores web y luego presentan esa información a los usuarios.

Si bien HTTP es efectivo para la transferencia de datos, no es inherentemente seguro ya que los datos se transmiten en texto plano. Por ello, se creó HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure), que es una extensión de seguridad del protocolo HTTP. Se utiliza para la comunicación segura a través de una red, y es ampliamente utilizado en Internet. En HTTPS, la comunicación se cifra utilizando el protocolo TLS (Transport Layer Security), lo que garantiza que la transferencia de datos entre el navegador del usuario y el sitio web es segura y privada.

3.6.5 Let's Encrypt

Let's Encrypt es una autoridad de certificación (CA) gratuita, automatizada y abierta, que proporciona certificados TLS/SSL para poder habilitar HTTPS en sitios web. Estos certificados son los que validan la identidad del sitio web y permiten el cifrado.

Para habilitar HTTPS en la aplicación web desarrollada, se ha instalado y configurado en Apache un certificado emitido por Let's Encrypt al dominio “navegacionastronomica.es”. Para emitir dicho certificado se ha instalado y utilizado “Certbot”, que es una herramienta automatizada cuyo propósito es facilitar la obtención e instalación de certificados SSL de Let's Encrypt.

Una de las principales ventajas de usar Certbot es que permite renovar los certificados automáticamente antes de que caduquen, ya que además los certificados de Let's Encrypt únicamente son válidos durante 90 días.

Aunque Certbot puede configurar automáticamente Apache al instalar los certificados, en este proyecto se ha optado por una configuración manual, ya que el uso de la especificación WSGI impide una configuración correctamente automatizada por parte de Certbot. La configuración exacta del servidor web Apache utilizando los certificados de Let's Encrypt aparece descrita en el Anexo I.

4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se define la interfaz de la aplicación web desarrollada, explicando su funcionamiento y las instrucciones a seguir para realizar una comparativa entre los dos tipos de navegación astronómica: con situación de estima y sin situación de estima.

A continuación, en base a unos datos de entrada de ejemplo (caso práctico), se calculan las posiciones reales de una embarcación en alta mar utilizando los dos tipos de navegación astronómica y se realiza un estudio pormenorizado de los resultados obtenidos, ofreciendo datos que demuestren qué tipo de navegación es más precisa, y en qué casos esto es así.

Por último, realizado el análisis de los resultados, se interpretan los mismos y se comparan con los resultados teóricos que debieran obtenerse según la literatura existente.

4.2 Requisitos para la introducción de datos

La aplicación web desarrollada presenta una serie de características, limitaciones y requisitos generales que deben tenerse en cuenta a la hora de introducir los datos para realizar los cálculos:

- Actualmente sólo permite introducir los datos (obligatorios) de dos astros, que se utilizarán para calcular los respectivos círculos de alturas iguales y rectas de altura.
- No se tienen en cuenta las condiciones de observación de los astros, es decir, la aplicación permite introducir datos independientemente de la climatología (nubosidad, etc.) y del período de observación¹¹ a la hora de realizar las observaciones de los astros.
- Las alturas introducidas deben ser siempre alturas verdaderas, la aplicación no implementa *per se* ningún tipo de aplicación de correcciones (refracción de la atmósfera, altura del observador sobre el nivel del mar, error de índice del sextante, etc.), ya que es un aspecto que no entraba en el alcance de los requisitos del proyecto. No obstante, es una mejora de fácil implementación, si se considera necesario.
- La hora introducida en la aplicación debe ser siempre la hora UT de la observación. Por tanto, debe corresponder a la hora exacta UT en que se produjeron las observaciones de los astros.

¹¹ En la práctica, con carácter general, solo se pueden realizar observaciones de la mayoría de los astros durante el crepúsculo matutino o el crepúsculo vespertino.

- La aplicación solo realiza cálculos astronómicos en base a observaciones simultáneas de los astros, no presentará unos resultados precisos si hay una diferencia significativa de tiempo entre observación y observación.
- La aplicación no tiene en consideración la posición estimada del observador, por lo que aparecen listados todos los astros, independientemente de si son observables (altura verdadera positiva) o no (altura verdadera negativa).

4.3 Interfaz

La interfaz se ha implementado siguiendo un diseño de página única (SPA¹²), es decir, carga una única página que se actualiza mediante código JavaScript, sin necesidad de recargar completamente la página durante su uso.

Las funcionalidades de la interfaz de la aplicación web están implementadas en su mayor parte mediante código JavaScript generado automáticamente por el *framework* Dash Plotly. A la aplicación se accede actualmente desde Internet escribiendo la siguiente URL en un navegador:

<https://navegacionastronomica.es/>

La interfaz mostrada es la siguiente:



Figura 4-1 Interfaz web de la aplicación

¹² Single Page Application

Como podemos ver en la figura 4-1, la interfaz consta de una cabecera seguida de tres apartados que se utilizan para introducir los datos necesarios, y finaliza con una representación gráfica de la Tierra que se utiliza para reflejar de forma gráfica los resultados obtenidos.

Los tres apartados se han dispuesto en un formato de menú acordeón, es decir, su contenido se muestra o se oculta cuando el usuario hace clic en cada apartado. Esta forma de mostrar el contenido permite reducir el tamaño de la página web, al no tener que mostrar toda la información desde el principio. De esta manera, los usuarios tienen la opción de visualizar solo lo que necesitan en cada momento.

4.3.1 Cabecera

Aquí aparece la información relativa al proyecto y al máster en el que se encuadra, incluyendo datos como el CUD y universidad asociados.



Figura 4-2 Cabecera

4.3.2 Datos de los astros de la bóveda celeste

En este apartado, el usuario debe introducir los datos relativos a las observaciones realizadas sobre los astros. En concreto, se deben introducir los siguientes datos, tal y como se muestra en la figura 4-3:

- Fecha de la observación: es un calendario que al desplegarse permite escoger el día de la observación astronómica, entre los años 1900 y 2050, ya que es el período temporal para el que la aplicación dispone de los datos astronómicos necesarios en sus bases de datos.
- Horas UT de la observación: hay dos campos, uno para cada astro observado. Como ya se ha mencionado, es necesario tener en cuenta que la aplicación no implementa el cálculo de situaciones no simultáneas, por lo que no deberían introducirse valores muy dispares (sólo diferencias de unos pocos minutos).
- Selección de astros: los astros incluyen las 99 estrellas tal y como aparecen en el almanaque náutico español, más los planetas Venus, Marte, Júpiter y Saturno, y el Sol. Hay dos campos, uno para cada astro observado.
- Datos de los astros: al seleccionar los dos astros, aparecen unas fichas de los mismos que permiten, al hacer clic en ellas, visualizar en una tabla sus datos astronómicos más relevantes. En este caso, se visualiza su nombre, horario en Greenwich, ángulo sidéreo y declinación para la fecha y la hora seleccionadas.

Datos de los astros de la bóveda celeste

Seleccione una fecha
 Seleccione la fecha de la observación astronómica
 3 de enero, 2000

Introduzca una hora UT
 Introduzca la hora UT de la observación astronómica del primer astro
 17 : 28 : 00

Seleccione el primer astro observado
 Seleccione de la lista el astro observado en primer lugar
 Aldebaran

Introduzca una hora UT
 Introduzca la hora UT de la observación astronómica del segundo astro
 18 : 28 : 00

Seleccione el segundo astro observado
 Seleccione de la lista el astro observado en segundo lugar
 Hamal

Nombre del astro: Hamal
 Horario en Greenwich: 347 grados 54.1 minutos
 Ángulo Sidéreo: 328 grados 12.5 minutos
 Declinación: +23 grados 27.7 minutos

Figura 4-3 Campos para la introducción de los datos de observación de los astros

4.3.3 Puntos origen y destino

En este apartado, el usuario puede introducir los datos relativos al origen y destino de la navegación, que, si bien no son necesarios para realizar la comparativa, ayudan a poner en contexto las situaciones calculadas, referenciándolas a las derrotas ortodrómicas o loxodrómicas seguidas. En concreto, el usuario puede introducir los siguientes datos, tal y como se muestra en la figura 4-4:

- Nombres del origen y destino: nombres de las localizaciones geográficas del origen y destino de la navegación (ciudad, país, isla, cabo, bahía, etc.).
- Coordenadas geográficas (latitud y longitud) de los puntos origen y destino, en formato decimal.

Puntos origen y destino

Nombre del punto origen
 Santo Domingo (Rep. Dominicana)

Latitud del punto de origen
 En formato decimal (Sur negativo)
 18,99570

Nombre del punto destino
 Isla de Yeu (Francia)

Longitud del punto de origen
 En formato decimal (Oeste negativo)
 -68,84320

Latitud del punto de destino
 En formato decimal (Sur negativo)
 46,72417

Longitud del punto de destino
 En formato decimal (Oeste negativo)
 -2,34833

Figura 4-4 Campos para la introducción de los datos de origen y destino

4.3.4 Comparativa de navegación astronómica sin situación de estima y con situación de estima

Este es el apartado más importante de los tres, ya que aquí se deben introducir los datos que permiten calcular la posición verdadera de la embarcación, utilizando dos métodos diferentes de navegación astronómica.

Los resultados obtenidos se representan gráficamente, de forma que se pueda realizar una comparativa visual entre la posición de la embarcación utilizando el método de navegación astronómica sin situación de estima (círculos de alturas iguales) y utilizando el método de navegación astronómica con situación de estima previa (rectas de altura).

Además, también existen una serie de controles que permiten administrar los datos que aparecen y gestionar cómo se representan visualmente. Los elementos de los que consta este apartado, reflejados en la figura 4-5, son los siguientes:

- Latitud y longitud de la situación de estima: en estos dos campos se introducen las coordenadas geográficas de la posición de estima previa, en formato decimal.
- Alturas de los astros: en estos dos campos se introducen las alturas verdaderas observadas de los dos astros, una en cada campo. En la descripción del campo se indica el nombre del astro observado, para no introducir los datos de alturas en diferente orden.
- Proyección a aplicar: consiste en una lista desplegable que permite seleccionar una proyección cartográfica para la visualización de los resultados de la comparativa. Este control permite seleccionar una de las siguientes proyecciones cartográficas [27]:
 - Proyección Mercator: es muy útil para la navegación ya que las líneas de rumbo constante aparecen como líneas rectas. Sin embargo, distorsiona el tamaño de los objetos a medida que aumenta la latitud, lo que provoca, por ejemplo, que los círculos de alturas iguales no aparecen con forma circular, sino con forma de elipsoide estirado en dirección norte y sur.
 - Proyección ortográfica: esta proyección produce un efecto similar al de ver la Tierra desde el espacio, mostrando una vista de "globo" semi-realista. Es una proyección muy visual, que representa los polos sin deformación.
 - Proyección Transversal de Mercator: similar a la proyección Mercator pero orientada verticalmente. Resulta útil para visualizar regiones extendidas de norte a sur.
 - Proyección “Natural Earth”: proyección de compromiso que intenta minimizar la distorsión en áreas clave, especialmente cerca del ecuador y de los polos.
 - Proyección “Equal Earth”: como su propio nombre indica, esta proyección busca minimizar la distorsión visual, especialmente en las formas de las masas terrestres. Es visualmente atractiva, adecuada para actividades educativas.
 - Proyección estereográfica: proyecta la superficie de la Tierra sobre un plano desde un punto en la superficie opuesto al centro del plano. Es particularmente efectiva para representar las regiones polares.
 - Proyección gnomónica: no mantiene ni el área ni los ángulos, pero es especialmente útil en navegación, ya que las derrotas ortodrómicas se representan como líneas rectas.
- Zoom automático: consiste en un par de elementos web con forma de “interruptores” que se pueden activar para aumentar y enfocar automáticamente las áreas de interés en la visualización de la comparativa. En concreto, permite ajustar dos áreas: el área correspondiente a la derrota de navegación y el área correspondiente a la posición de estima de la embarcación.
- Mostrar círculos de alturas iguales y rectas de altura: son dos botones independientes que permiten visualizar los círculos de alturas iguales y las rectas de altura, respectivamente. Actúan a modo de interruptor, permitiendo mostrar u ocultar estos datos según las preferencias del usuario en cada momento.

 Comparativa de navegación astronómica sin situación de estima y con situación de estima

Latitud de la situación de estima En formato decimal (Sur negativo) 44,80000	Altura del astro Aldebaran Altura del astro observado en primer lugar 25,49833	Seleccione la proyección a aplicar Seleccione una proyección cartográfica para la representación gráfica de la comparativa Mercator
Longitud de la situación de estima En formato decimal (Oeste negativo) -5,50000	Altura del astro Hamal Altura del astro observado en segundo lugar 55,60500	

☐ Zoom a la derrota prevista
☐ Zoom a la posición de la embarcación

Figura 4-5 Elementos de la interfaz para realizar la comparativa

4.3.5 Representación gráfica de la comparativa

Por último, en la parte inferior de la interfaz, se muestra una representación gráfica de la comparativa entre los dos métodos de navegación astronómica. Para implementar esta representación visual se ha utilizado Plotly Scattergeo que, como se ha comentado anteriormente en esta memoria, es un tipo de gráfico que ofrece la librería Plotly y que se utiliza para crear gráficos de dispersión geoespaciales, es decir, gráficos que muestran puntos o líneas georreferenciados sobre un mapa del mundo.



Figura 4-6 Proyección ortográfica de Plotly Scattergeo

Para acercar o alejar la vista del mapa (cambiar la escala), se puede hacer clic en un punto específico del mapa y utilizar la rueda del desplazamiento del ratón. Alternativamente, se pueden utilizar dos dedos de la manera usual en pantallas táctiles.

Para desplazar el mapa y así poder visualizar diferentes áreas geográficas, simplemente se debe hacer clic en un punto del mapa y, manteniendo presionado el botón izquierdo del ratón, arrastrar el mapa en la dirección deseada.

El tamaño del mapa se adapta automáticamente (es *responsive*) al tamaño de la pantalla o de la ventana del navegador. Asimismo, en el mapa se indican las superficies de agua (océanos, mares y lagos) de color azul claro, y las superficies terrestres (continentes, islas) de color marrón-gris claro. Los contornos de separación entre tierra y agua se destacan en color gris oscuro.



Figura 4-7 Proyección Mercator de Plotly Scattergeo

El mapa muestra la siguiente información (ver figuras 4-6 y 4-7):

- Indicación del origen y destino (puntos inicial y final) de la navegación, que se representan por dos cruces azules en el mapa. Al pasar el ratón sobre dichas cruces, se indica la latitud y la longitud del punto representado.
- Representación gráfica de las derrota ortodrómica y loxodrómica entre el punto origen y el punto destino, en distintas tonalidades de color azul.
- Representación gráfica de los círculos de alturas iguales y de los puntos de corte entre ellos, en diferentes tonalidades de color verde.

- Representación gráfica de las rectas de alturas iguales y del punto de corte entre ellas, en distintas tonalidades de color rojo.
- Indicación de la proyección utilizada, en la esquina superior derecha.
- Leyenda con indicación de todos los puntos y líneas (objetos) trazados sobre el mapa, con indicación de los colores utilizados, en la esquina superior izquierda. Al pulsar sobre cualquiera de estos objetos en la leyenda, se muestra/oculta en el mapa el objeto correspondiente.

4.4 Pruebas

El objetivo principal del presente trabajo es realizar una comparativa de las precisiones obtenidas en los cálculos de las situaciones verdaderas de una embarcación, al utilizar dos métodos diferentes de navegación astronómica: con situación de estima previa (rectas de altura) y sin situación de estima previa (círculos de alturas iguales).

Para ello, y utilizando la aplicación web desarrollada en el alcance de este proyecto, proponemos el siguiente caso de prueba [18]:

“El día 3 de enero de 2000, navegando por el hemisferio norte, medimos simultáneamente, a las 17:28:00 UT, las alturas verdaderas de Hamal, que resultó ser de 55.605° , y Aldebarán 25.49833° . ¿Cuál es nuestra situación en el momento de la medida?”

A continuación, procedemos a resolver este problema mediante la aplicación, que utilizará internamente los dos métodos de cálculo descritos anteriormente.

4.4.1 Sin situación de estima previa

Introducimos los datos requeridos en los apartados 1 y 3 (los datos del apartado 2 son opcionales). En el apartado 3 no es necesario introducir los datos de la situación de estima, ya que no son necesarios para realizar los cálculos.

Una vez introducidos todos los datos (fecha y horas UT, nombres de los astros observados y alturas verdaderas de los mismos), pulsamos el botón “Mostrar círculos de alturas iguales”, y nos aparecen los datos reflejados en la figura 4-8.

Y tenemos que la situación verdadera de la embarcación, calculada por la aplicación y que llamaremos S_C , es la siguiente:

$S_C = 45^\circ 3,5' N \quad 5^\circ 52,6' W$



Figura 4-8 Proyección “Natural Earth” con los círculos de alturas iguales

4.4.2 Con situación de estima previa

Para que la aplicación pueda calcular la situación de la embarcación por este método, es necesario introducir los datos de latitud y longitud de estima en el apartado 3 de la interfaz. Si no lo hacemos así, al pulsar el botón “Mostrar rectas de altura”, la aplicación nos requerirá la introducción de estos datos señalando los respectivos campos en color rojo, tal y como se muestra en la figura 4-9.

Comparativa de navegación astronómica sin situación de estima y con situación de estima

Latitud de la situación de estima En formato decimal (Sur negativo) Valor requerido	Altura del astro Aldebaran Altura del astro observado en primer lugar 25,49833	Seleccione la proyección a aplicar Seleccione una proyección cartográfica para la representación gráfica de la comparativa Mercator
Longitud de la situación de estima En formato decimal (Oeste negativo) Valor requerido	Altura del astro Hamal Altura del astro observado en segundo lugar 55,60500	☐ Zoom a la derrota prevista ☐ Zoom a la posición de la embarcación

Mostrar círculos de alturas iguales Mostrar rectas de altura

Figura 4-9 Campos de latitud y longitud de estima vacíos

Para comprobar la precisión de este método, y poder compararlo exhaustivamente con el método anterior, se introducen diferentes situaciones de estima S_E , cada vez más alejadas de la posición real de la embarcación calculada en el apartado anterior. Así, calculamos la situación real de la embarcación a partir de las latitudes y longitudes de estima expuestas en la tabla 4-1.

Posiciones estimadas de la embarcación			
S_E	Latitud	Longitud	Distancia a S_C
1	45° 3,5' N	5°52,6' W	0 millas
2	45° 7,0' N	5°57,6' W	5 millas
3	45° 10,6' N	6°02,6' W	10 millas
4	45° 14,1' N	6°07,6' W	15 millas
5	45° 17,6' N	6°12,7' W	20 millas
6	45° 24,6' N	6°22,8' W	30 millas
7	45° 31,6' N	6°32,9' W	40 millas
8	45° 38,6' N	6°43,1' W	50 millas
9	45° 45,6' N	6°53,4' W	60 millas
10	45° 52,6' N	7°03,6' W	70 millas
11	46° 13,4' N	7°34,7' W	100 millas
12	47° 21,7' N	9°21,2' W	200 millas
13	48° 28,4' N	11°12,4' W	300 millas
14	49° 33,1' N	13°08,5' W	400 millas
15	50° 35,9' N	15°09,7' W	500 millas

Tabla 4-1 Latitudes y longitudes de estima utilizadas

Y los resultados obtenidos, a los que llamaremos S_R se muestran en la tabla 4-2. Comparando los datos de las dos tablas, vemos que la tendencia es clara, cuanto más error tiene la situación de estima, mayor error tendrá la situación calculada mediante el método de rectas de altura. Esto se puede ver mucho mejor en el gráfico 4-10.

Sin embargo, no deja de sorprender la capacidad que tiene este método de manejar estimaciones muy alejadas de la posición real. Así, hemos visto que situaciones con un error de 100 millas sobre la situación real pueden servir todavía razonablemente bien como situaciones de estima, y dar resultados muy aceptables con un error final de menos de dos millas.

Esto contrasta con la literatura existente [18], donde se recomienda utilizar situaciones de estima con una diferencia máxima de 20 millas con respecto a la situación real de la embarcación. Si bien es cierto que normalmente este método se aplica de forma gráfica, y manejar diferencias superiores puede ser dificultoso en la práctica pues implica tener que dibujar rectas de altura muy largas sobre la carta.

Posiciones verdaderas de la embarcación por corte de rectas de altura			
S_R	Latitud	Longitud	Diferencia entre S_C y S_R
1	45° 3,3' N	5°52,6' W	0,16 millas
2	45° 3,3' N	5°52,6' W	0,16 millas
3	45° 3,3' N	5°52,6' W	0,15 millas
4	45° 3,4' N	5°52,5' W	0,14 millas
5	45° 3,4' N	5°52,5' W	0,12 millas
6	45° 3,4' N	5°52,4' W	0,12 millas
7	45° 3,5' N	5°52,3' W	0,19 millas
8	45° 3,6' N	5°52,2' W	0,33 millas
9	45° 3,8' N	5°52,0' W	0,51 millas
10	45° 4,0' N	5°51,8' W	0,74 millas
11	45° 4,6' N	5°50,9' W	1,65 millas
12	45° 9,0' N	5°45,5' W	7,44 millas
13	45° 17,3' N	5°36,0' W	18,12 millas
14	45° 30,5' N	5°22,1' W	34,55 millas
15	45° 49,6' N	5°03,4' W	57,64 millas

Tabla 4-2 Situaciones obtenidas por corte de rectas de altura

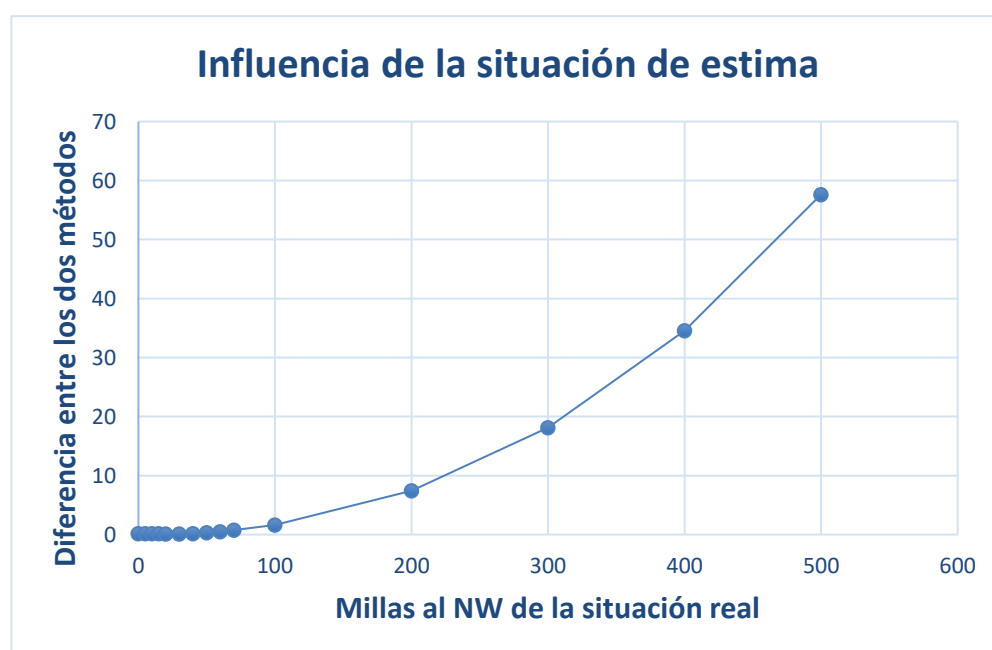


Figura 4-10 Influencia de la situación de estima en la precisión del método de rectas de altura

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Este trabajo incluye una parte dedicada al estudio de los principios del posicionamiento celeste, esencial en la navegación astronómica, abordando su uso para la determinación de la posición geográfica de una embarcación.

Sin embargo, la parte más importante del proyecto ha consistido en la implementación de estos principios en el lenguaje de programación Python, lo que ha implicado traducir los cálculos astronómicos y geométricos necesarios en código de programación.

Por último, se ha realizado una comparativa exhaustiva entre dos de las técnicas más importantes en navegación astronómica, como son la navegación astronómica sin situación de estima, basada en el corte de círculos de alturas iguales, y la navegación astronómica con situación de estima, basada en el corte de sendas rectas de altura.

5.1.1 Desarrollo de la aplicación

En el marco de este proyecto se ha desarrollado una aplicación web diseñada para facilitar la introducción, visualización y análisis de datos relacionados con la navegación astronómica, incluyendo la implementación de gráficos interactivos y herramientas para interpretar observaciones astronómicas y calcular posiciones basadas en datos astronómicos precisos.

En concreto, para el desarrollo de esta aplicación se ha utilizado Python y dos herramientas principales: Dash y Plotly. Dash es un marco de trabajo de Python para construir aplicaciones web analíticas y Plotly es una librería de gráficos que permite crear visualizaciones interactivas. La combinación de Dash y Plotly ha sido muy conveniente, ya que ha permitido una interacción en tiempo real con los datos y una representación gráfica clara y detallada.

También se ha integrado la librería Skyfield en la aplicación. Skyfield es una librería utilizada en astronomía computacional que, basándose en datos astronómicos proporcionados por la NASA y por la ESA, es capaz de calcular posiciones de planetas, estrellas y otros cuerpos celestes en cualquier instante y con gran precisión. Esta determinación exacta de las posiciones de los astros ha permitido, en primer lugar, prescindir del uso de otro tipo de fuentes como el Almanaque Náutico y, en segundo lugar, ha sido la base para la posterior implementación de los cálculos necesarios para determinar la posición geográfica de una embarcación utilizando las técnicas de navegación astronómica.

5.1.2 Despliegue de la aplicación

Una vez finalizado el desarrollo de la aplicación web, se ha procedido a hacer accesible la misma por Internet. Para ello, se ha desplegado la aplicación en un servidor en la nube con Ubuntu Server 20.04 LTS y el servidor web Apache, que se ha configurado para que sea capaz de comunicarse con la aplicación utilizando una interfaz llamada WSGI (ver Anexo I).

Ha sido necesario asignar un nombre de dominio a la dirección IP pública del servidor donde se aloja la aplicación. A tal efecto, se ha adquirido el dominio “navegacionastronomica.es” y se han generado y configurado certificados TLS (con Let’s Encrypt) para garantizar una conexión segura y encriptada.

5.1.3 Consideraciones finales

Una vez finalizado el proyecto, se puede afirmar que se han alcanzado sobradamente los objetivos propuestos, obteniendo una aplicación web interactiva que permite la aplicación sencilla de dos técnicas poderosas de navegación, como son la navegación astronómica sin situación de estima, basada en el corte de círculos de alturas iguales, y la navegación astronómica con situación de estima, basada en el corte de sendas rectas de altura.

A mayor abundamiento, el trabajo demuestra la efectividad de la navegación astronómica sin depender de posiciones estimadas, reafirmando la importancia y la relevancia de los métodos tradicionales de navegación marítima y evidenciando la viabilidad y eficacia de este tipo de navegación en el contexto actual. El desarrollo, implementación y despliegue exitosos de la aplicación web demuestra cómo las técnicas de navegación celeste pueden complementar e incluso sustituir a los sistemas modernos de posicionamiento (p. ej. GPS) en determinadas circunstancias.

Además, la aplicación tiene el potencial de ser utilizada en programas educativos para enseñar navegación astronómica, ofreciendo una plataforma interactiva y práctica para los alumnos.

5.2 Líneas futuras

Además de cumplir sus objetivos, el proyecto está abierto a futuras mejoras y ampliaciones en sus funcionalidades e integraciones con otras herramientas de navegación astronómica.

5.2.1 Mejoras propuestas

- Ampliar la funcionalidad para calcular y visualizar más de dos rectas de altura y más de dos círculos de alturas iguales, lo que permitiría un análisis más complejo y completo de las técnicas de navegación astronómica.
- Filtrar los astros observables en función de la situación estimada y la fecha-hora UT, de tal manera que sólo aparezcan en el listado aquellos astros con una altura verdadera superior a los 15 grados¹³, facilitando la selección de astros relevantes para los cálculos.
- Filtrar los astros observables en función de los astros ya seleccionados para la observación, de tal manera que los azimuts de todos los astros observados estén suficientemente separados entre sí. Esto permitiría que los círculos de alturas iguales y las rectas de altura se corten con un ángulo apreciable y por tanto de forma clara y precisa.

¹³ Aquellos astros con alturas entre 0 y 15 grados no deberían utilizarse debido a la dificultad de medir su altura por la refracción de la luz en la atmósfera.

- Gestionar los astros cerca del cenit en las rectas de altura. Estos astros no son compatibles con las rectas de altura debido a que los círculos de altura asociados tienen demasiada curvatura.
- Posibilidad de realizar cálculos basados en observaciones no simultáneas. Para implementar esta funcionalidad, sería necesario introducir datos adicionales como el azimut del primer astro en el instante de su medida, y la velocidad y el rumbo de la embarcación, a fin de que la aplicación pueda realizar los cálculos de estima necesarios.

5.2.2 Posibles integraciones con otras herramientas

Gracias a su diseño modular, la aplicación es capaz de integrar otros módulos y herramientas que conjuntamente podrían ofrecer un catálogo de servicios más extenso y completo. Por ejemplo, se podrían contemplar las siguientes integraciones:

- Integración con otras técnicas de posicionamiento, como por ejemplo mediante alturas observadas al Sol, la estrella Polar o la Luna.
- Integración con herramientas capaces de identificar y obtener directamente las alturas de los astros, como por ejemplo mediante el uso de aplicaciones en dispositivos móviles.

5.2.3 Ampliaciones propuestas

Los datos astronómicos ofrecidos por la aplicación, aunque muy precisos, no llegan al nivel de precisión de los datos ofrecidos por el Almanaque Náutico español. Es necesario tener en cuenta que este nivel de precisión no está contemplado en el alcance ni en los objetivos de este proyecto, ya que al fin y al cabo los cálculos relacionados con la navegación astronómica se basan en trigonometría esférica, y por tanto ya introducen un pequeño error pues la Tierra no es una esfera perfecta, sino que se asemeja más bien a un geoide.

Sin embargo, con esta mejora la aplicación se podría equiparar en precisión con el Almanaque Náutico, y se convertiría en una herramienta todavía más robusta y confiable para la navegación en general y para la navegación astronómica en particular.

La precisión en los datos astronómicos ofrecidos por la aplicación podría mejorarse aplicando las siguientes medidas:

- Profundizar en el conocimiento y uso de la librería Skyfield, que es la que proporciona la base sobre la que se construyen los cálculos astronómicos más precisos. En concreto, incorporar la información proporcionada por el IERS¹⁴, que informa sobre las variaciones en la rotación de la Tierra y sirve para sincronizar el tiempo UTC con el tiempo astronómico UT1.
- Establecer un sistema para actualizar regularmente los datos astronómicos en la aplicación, asegurando que los cálculos se basen en la información más actualizada disponible.
- Realizar pruebas periódicas para comparar los datos y cálculos de la aplicación con los datos del Almanaque Náutico, y ajustar la aplicación según sea necesario para mejorar la precisión.

¹⁴ Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. C. O. (NCO), «Sistema de Posicionamiento Global,» [En línea]. Available: <https://www.gps.gov/spanish.php>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [2] RAE. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/navegaci%C3%B3n>. [Último acceso: 28 12 2023].
- [3] PRONAUTIC, «Técnicas de navegación marítima,» [En línea]. Available: <https://pronautictc.com/tecnicas-navegacion-maritima/>. [Último acceso: 28 12 2023].
- [4] RAE. [En línea]. Available: <https://www.rae.es/drae2001/derrota>. [Último acceso: 28 12 2013].
- [5] G. infinita, «Loxodromía y ortodromía, dos trayectorias posibles,» [En línea]. Available: <https://www.geografiainfinita.com/2018/04/loxodromia-y-ortodromia/>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [6] I. d. E. y. C. d. Andalucía, «Junta de Andalucía,» [En línea]. Available: https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/rap/sites/default/files/public/Sistemas_Geodesico_de_referencia.pdf. [Último acceso: 17 01 2024].
- [7] A. p. todos, «La esfera celeste. Sistemas de coordenadas celestes,» [En línea]. Available: <https://astronomiaparatodos.com/2018/03/08/la-esfera-celeste/>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [8] Wikipedia, «Esfera celeste,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Esfera_celeste. [Último acceso: 09 01 2024].
- [9] L. Mederos, «Navegación Astronómica,» [En línea]. Available: <https://rodamedia.com/>. [Último acceso: 09 01 2024].
- [10] I. d. A. d. C. (IAC), «Historias de la Primavera,» [En línea]. Available: <https://www.iac.es/es/blog/vialactea/2016/03/historias-de-la-primavera>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [11] S. E. d. Astronomía, «Precesión,» [En línea]. Available: <https://www.sea-astronomia.es/glosario/precesion>. [Último acceso: 17 01 24].
- [12] C. S. d. I. C. (CSIC), «La precesión de los equinoccios y la nutación,» [En línea]. Available: <http://sac.csic.es/astrosecundaria/complementario/es/actividades/modelos/precesion.pdf>. [Último acceso: 17 01 2024].

- [13] C. d. c. científica, «De la aberración estelar,» [En línea]. Available: <https://culturacientifica.com/2014/08/26/de-la-aberracion-estelar/>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [14] L. Mederos, «Youtube,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/channel/UCaC9jN8KlGvznLJ29ga5sPg/videos>. [Último acceso: 09 01 2024].
- [15] EscolaPort, «Teoría de navegación,» [En línea]. Available: <https://aulanautica.org/unit/teoria-de-navegacion-capitan-yate/>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [16] U. d. Cádiz, «Notas y apuntes de trigonometría esférica y astronomía de posición,» [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/161353191.pdf>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [17] Math10, «Triángulo esférico,» [En línea]. Available: <https://www.math10.com/es/matematicas-universitarias/triangulo-esferico.html>. [Último acceso: 09 01 2024].
- [18] L. Mederos, Navegación astronómica, Boadilla del Monte, Madrid: Ediciones Tutor, S.A., 2020.
- [19] «python,» [En línea]. Available: <https://www.python.org/>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [20] Plotly, «Dash Python User Guide,» [En línea]. Available: <https://dash.plotly.com/>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [21] Skyfield, «Elegant Astronomy for Python,» [En línea]. Available: <https://rhodesmill.org/skyfield/>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [22] ESA, «The hipparcos and Tycho Catalogues,» [En línea]. Available: <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos/catalogues>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [23] NASA, «The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421,» 15 08 2009. [En línea]. Available: https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-178/178C.pdf. [Último acceso: 17 01 2024].
- [24] Mozilla, «MVC,» [En línea]. Available: <https://developer.mozilla.org/es/docs/Glossary/MVC>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [25] Ó. Blancarte, «Observer,» [En línea]. Available: <https://reactiveprogramming.io/blog/es/patrones-de-diseno/observer>. [Último acceso: 17 01 2024].
- [26] P. E. Proposals, «PEP 3333 – Python Web Server Gateway Interface,» [En línea]. Available: <https://peps.python.org/pep-3333/>. [Último acceso: 15 01 2024].
- [27] P. G. Libraries, «Map projections,» [En línea]. Available: <https://plotly.com/python/map-configuration/#map-projections>. [Último acceso: 16 01 2024].

ANEXO I: CONFIGURACIÓN DEL SERVIDOR WEB APACHE

Para el despliegue de la aplicación web, de forma que sea accesible por Internet, ha sido necesario instalar y configurar Apache en un servidor Ubuntu Server 20.04 LTS ubicado en la nube.

Además de instalar Apache, es necesario instalar el módulo “mod_wsgi”, que es un módulo de Apache que permite servir aplicaciones Python. En concreto, los comandos que se han utilizado son:

- `sudo add-apt-repository ppa:ondrej/apache2 -y`
- `sudo apt update`
- `sudo apt install apache2 libapache2-mod-wsgi-py3`

A continuación, es necesario configurar un Virtual Host en Apache para la aplicación. Esto implica editar el archivo de configuración de Apache o crear un nuevo archivo en el directorio “sites-available”. En este proyecto, el archivo de configuración es el siguiente:

```
VirtualHost *:443>
    ServerName https://navegacionastronomica.es:443
    DocumentRoot /var/www/html/tfm

    ErrorLog ${APACHE_LOG_DIR}/tfm.error.log
    CustomLog ${APACHE_LOG_DIR}/tfm.access.log combined

    SSLEngine on
    SSLCertificateFile /etc/letsencrypt/live/navegacionastronomica.es/fullchain.pem
    SSLCertificateKeyFile /etc/letsencrypt/live/navegacionastronomica.es/privkey.pem
    <FilesMatch "\.(cgi|shtml|phtml|php)$">
        SSLOptions +StdEnvVars
    </FilesMatch>
    <Directory /usr/lib/cgi-bin>
        SSLOptions +StdEnvVars
    </Directory>

    WSGIDaemonProcess dash threads=5 user=www-data group=www-data home=/var/www/html/tfm python-home=/var/www/html/tfm/.venv
    WSGIScriptAlias / /var/www/html/tfm/app.wsgi

    <Directory /var/www/html/tfm>
        WSGIProcessGroup dash
        WSGIApplicationGroup %{GLOBAL}
        Require all granted
    </Directory>
    ServerName https://navegacionastronomica.es:443
</VirtualHost>
```

Figura A1-1 Virtual Host en Apache

Además, es necesario crear un archivo WSGI para la aplicación, en el mismo directorio donde se aloja el archivo principal “appdef.py” de la aplicación Python. Este archivo actúa como punto de entrada para la aplicación Dash. En este proyecto, el contenido del archivo WSGI es el siguiente:

```
app.wsgi
1  import sys
2  sys.path.insert(0, "/var/www/html/tfm")
3
4  from appdef import app
5  application = app.server
```

Figura A1-2 Archivo WSGI

Y, por último, no hay más que habilitar el sitio y reiniciar Apache para aplicar los cambios:

- `sudo a2ensite tfm`
- `sudo systemctl restart apache2`