



UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA
FACULTAD DE FILOSOFÍA

Máster Universitario en Filosofía Teórica y Práctica
Especialidad de Lógica, Historia y Filosofía de la Ciencia

Trabajo Fin de Máster

Historia de la navegación astronómica en el siglo XX

Sus antecedentes tecnológicos e impacto socio-cultural

Autor: Fco. de Borja Ibarrodo Hernández
Tutor: Manuel A. Sellés García

Madrid, 10 Septiembre 2022

Resumen

Este trabajo trata sobre la historia de la navegación astronómica en el siglo XX y analiza ciertos aspectos de su influencia en el desarrollo social y cultural actual. Se presentará cómo la navegación astronómica marítima, desde sus orígenes en la antigüedad, estaba prácticamente resuelta a finales del siglo XIX. Durante el siglo XX el hombre se separó de los mares con la llegada de la aviación. La navegación celestial intentó adaptarse con nuevos instrumentos y métodos de cálculo. Sin embargo los instrumentos se avenían mal a las necesidades de la navegación aérea. El problema no quedó inicialmente resuelto hasta que la radio navegación fue desarrollada. En la segunda mitad del siglo el desarrollo tecnológico permitió viajar al espacio. La radio, los relojes atómicos y la relatividad hicieron posible el desarrollo de la navegación por satélite práctica, que permitió mucha más precisión y un sistema de navegación a escala planetaria. La navegación, inicialmente una tecnología para especialistas y militares, está hoy al alcance de cualquier persona con un teléfono móvil e incorporada en cualquier aspecto de nuestra vida diaria. Los desarrollos tecnológicos del siglo pasado junto con las innovaciones al alcance de los usuarios comunes en el XXI han dado lugar a una auténtica revolución cultural.

Abstract

This master thesis deals with the history of astronomical navigation in the 20th century and analyses certain aspects of its influence on today's social and cultural development. It will present how maritime astronomical navigation, from its origins in antiquity, was practically solved by the end of the 19th century. During the 20th century, man separated from the seas with the advent of aviation. Celestial navigation tried to adapt with new instruments and methods of calculation. However, the instruments were ill-suited to the needs of aerial navigation. The problem was not initially solved until radio navigation was developed. In the second half of the century technological developments made space travel possible. Radio, atomic clocks and relativity made possible the development of practical satellite navigation, which allowed much more accurate and planetary-scale navigation. Navigation, initially a technology for specialists and the military, is now available to anyone with a mobile phone and incorporated into every aspect of our daily lives. The technological developments of the last century together with the innovations available to ordinary users in the 21st century have led to a true cultural revolution.

Índice general

1. Introducción y metodología	1
1.1. Alcance y contenido	1
1.2. Objetivos	6
2. Antecedentes	9
2.1. Antigüedad hasta s. XVII	9
2.1.1. Navegación en la antigüedad	9
2.1.2. La navegación a la estima y el comienzo de la navegación astronómica	12
2.1.3. Cálculo de la latitud	14
2.1.4. Los primeros instrumentos angulares	16
2.2. El desarrollo de la navegación científica	17
2.3. Siglo XIX	23
2.3.1. El descubrimiento de Sumner	24
2.3.2. Método de Saint Hilaire	28
2.3.3. Los almanaques marinos en el siglo XIX	35
2.3.3.1. Reino Unido	35
2.3.3.2. España	40
2.3.3.3. Estados Unidos	42
2.3.4. La cooperación internacional	45
2.3.5. Establecimiento del meridiano de Greenwich como referencia universal	45
3. Navegación aérea	51
3.1. Navegación marítima a principios de siglo	51
3.2. La llegada de la aviación	54
3.3. Métodos de cálculo astronómicos	56
3.3.1. Historia del sextante aéreo	57
3.3.2. Errores en los sextantes de burbuja	76
3.3.3. Métodos de cálculo reducidos	78
3.3.4. El almanaque aéreo	80

3.3.5.	Uso de sextantes en viajes espaciales	80
3.4.	Interludio: la navegación en los grandes raids	83
3.5.	Historia de la radionavegación	84
3.5.1.	Modelos iniciales europeo y americano	86
3.5.2.	Radionavegación en la segunda guerra mundial	91
3.5.3.	Radionavegación tras la segunda guerra mundial	98
3.6.	La navegación autónoma	102
3.6.1.	Navegación inercial	102
3.6.2.	Navegación Doppler	106
4.	Navegación por satélite	107
4.1.	Antecedentes y requisitos	107
4.1.1.	El primer sistema satelital, el Transit	107
4.1.2.	Antecedentes tecnológicos	110
4.1.2.1.	Microprocesador	110
4.1.2.2.	El oscilador de cuarzo y el reloj atómico	110
4.1.3.	Desarrollo del GPS	112
4.1.4.	Requisitos	114
4.2.	Funcionamiento del sistema	116
4.2.1.	Cálculo de la posición	116
4.2.2.	Transmisión de señal en amplio espectro	117
4.2.3.	Filtros Kalman	118
4.2.4.	Efemérides y otros datos	119
4.2.5.	Parámetros orbitales	119
4.3.	Desarrollos posteriores	120
4.3.1.	Vuelo 007 de Korean Air Lines	121
4.3.2.	La disponibilidad selectiva	123
4.4.	Política y Tecnología	125
4.4.1.	Precisión y GPS	125
4.4.2.	Sistema Galileo	128
5.	Impacto socio-cultural	131
5.1.	La construcción social	131
5.2.	Conocimiento tecnológico	134
5.3.	La señal de navegación como artefacto	137
5.4.	Versatilidad de funciones	140
5.5.	Privacidad	143
5.6.	Mapas cognitivos	147

6. Apéndice	151
6.1. Sistemas celestes	151
6.1.1. Sistema local de coordenadas horizontales	151
6.1.2. Sistema terrestre de coordenadas horarias	152
6.1.3. Sistema ecuatorial	153
6.1.4. Sistema Internacional de Referencia	153
6.2. Sistemas terrestres	154
6.3. Tiempo universal	154
Referencias	157

Índice de figuras

1.1. Grabado de Flammarion, 1888	2
2.1. Representación de las bóveda de las estrellas fijas en el <i>Margarita philosophica</i>	11
2.2. Método de la altura meridiana para calcular la latitud	15
2.3. Ballestilla	17
2.4. Octante modelo Hadley	19
2.5. Línea de posición	25
2.6. Círculo de altura	28
2.7. Método de St Hilaire	31
2.8. Triángulo astronómico	32
2.9. Método de Saint Hilaire con diferencia de alturas	33
2.10. Círculo mural	37
2.11. Gran telescopio ecuatorial	39
2.12. Maria Mitchell, astrónoma estadounidense	43
2.13. Asistentes a la conferencia de Washinton de 1884	49
3.1. Sectante con nonio tipo vernier	53
3.2. Wright Flyer	54
3.3. Quintante	59
3.4. Octante de aerostato	60
3.5. Sextante giroscópico	61
3.6. Sextante marítimo adaptado	62
3.7. Primera travesía aérea del Atlántico Sur	64
3.8. Octante modelo Brandis	67
3.9. Patente de Davis y Radford para sextante aeronáutico	68
3.10. Sextante de burbuja	69
3.11. Octante de aviación marca Pioneer	70
3.12. Octante Mark IV	72
3.13. Sextante periscópico	73
3.14. Sextante de burbuja modelo Link A12	75

3.15. Sextante de la nave espacial Apollo	81
3.16. Hidroavión Dornier conocido como <i>Plus Ultra</i>	84
3.17. Aerovías norteamericanas, 1933	88
3.18. Radiogoniómetro	89
3.19. Sistema de navegación hiperbólica	94
3.20. Cartas de navegación hiperbólica	95
3.21. Receptor LORAN	97
3.22. Wernher von Braun con un modelo de cohete V2	103
3.23. Unidad de medida inercial en el Apollo	104
4.1. Satélite Transit	108
4.2. Reloj atómico	113
4.3. Satélite Timation	115
4.4. Representación de la constelación de satélites GPS	120
4.5. Derribo del vuelo 007 de Korean Airways en 1983	122
6.1. Sistema de coordenadas horizontales	152

Capítulo 1

Introducción y metodología

1.1. Alcance y contenido del trabajo

En este trabajo se revisa la evolución de la navegación, desde sus comienzos como navegación astronómica hasta la navegación con referencia a astros artificiales, la navegación por satélite. Se describen brevemente los motivos de su evolución, las técnicas utilizadas, su fundamento científico y su impacto en la sociedad. El énfasis es en el siglo XX, existiendo magníficas obras que tratan periodos anteriores¹.

La navegación se definió originalmente como el arte de conducir ordenadamente navíos en la mar. Proviene del latín *navis*, que significa barco y el verbo *agere*, que significa mover o dirigir. Ya Jorge Juan en el *Compendio* distinguía entre pilotaje y maniobra² y dentro del pilotaje diferenciaba entre pilotaje práctico, en las inmediaciones de la costa, y pilotaje teórico, cuando se navega alejado de ella³. Para el cálculo de la posición de naves alejada de la costa, la llamada navegación en altura, existían varios métodos, como la navegación a la estima, aunque la que aquí nos interesa es la que se realizaba empleando como fuente de información principal la posición de astros u objetos espaciales, conocida como *navegación astronómica o celeste*.

La tecnología de la navegación astronómica ha tenido más de dos mil años de desarrollo. La palabra *tecnología* es de origen griego y originalmente significaba el conocimiento sobre las artes. La navegación es una tecnología, entendida en el sentido más moderno como un conjunto de técnicas coordi-

¹Sellés García, 2000.

²Evidentemente Jorge Juan no fue el primero en hacer esta distinción. A bordo de los buques estas dos tareas estaban asignadas a distintas personas. El pilotaje, calcular el punto en la carta, asignada al piloto. La maniobra era responsabilidad del contramaestre que estaba a las órdenes de los oficiales.

³Sellés García, 2000.

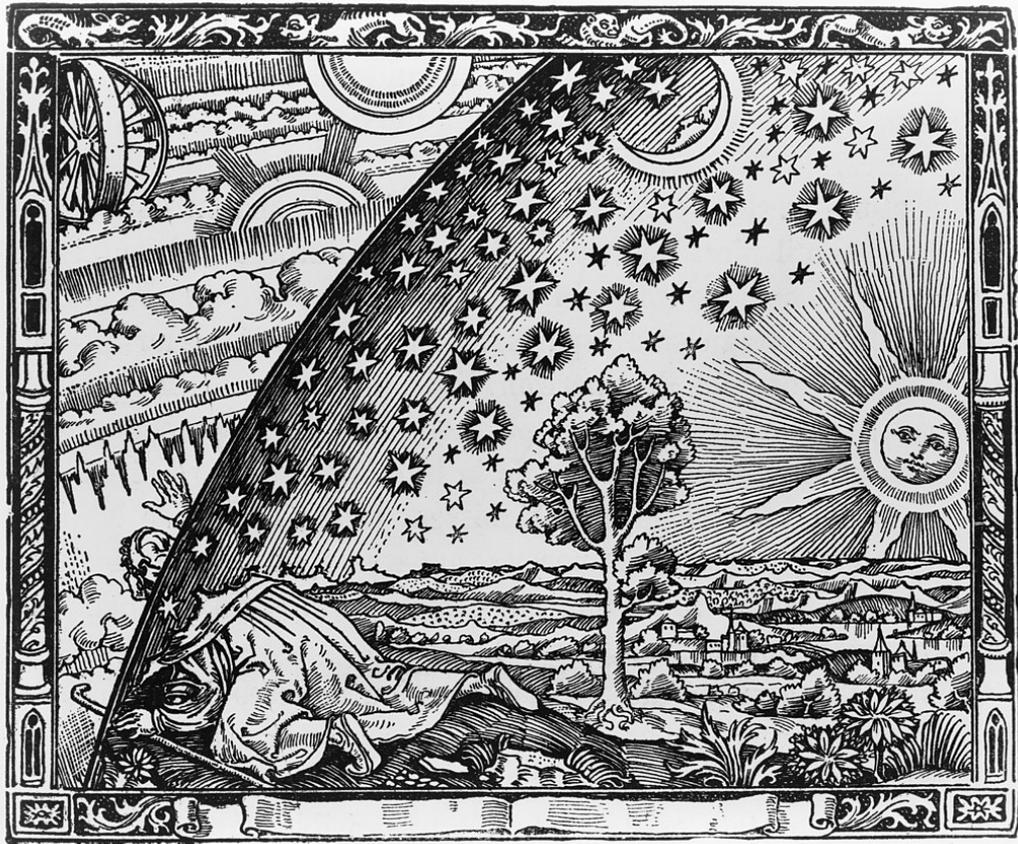


Figura 1.1: Un viajero coloca su cabeza bajo el borde del firmamento, observado el funcionamiento del universo. El conocimiento astronómico descriptivo ha sido la base para la navegación durante siglos. Fuente: reproducido en *L'Atmosphère: Météorologie Populaire* de Camille Flammarion⁴

nadas para un fin. Su evolución a lo largo de la historia tiene condicionantes muy particulares que hacen especialmente relevante su estudio. Su importancia en política internacional, en el comercio y la economía mundial y su aplicación militar, hicieron que los grandes avances técnicos y científicos se aplicasen con rapidez a la navegación, y muchas veces fuesen y aún sean secretos de estado. La mecánica celeste, la geografía, la trigonometría esférica, la observación astronómica, el electromagnetismo, la teoría cuántica o la relatividad son algunos ejemplos de disciplinas científicas directamente aplicables a la navegación. La navegación refleja el estado de la ciencia y de la técnica en cada época.

La historia de la navegación celeste es pues un componente fundamental de la historia de la ciencia y de la tecnología. Lógicamente no se tratará

aquí de abarcar todo su desarrollo. En este trabajo se describirán a modo de contexto sus inicios prácticos hasta su situación a finales del siglo XIX y su objetivo es tratar con más detalle los desarrollos durante el siglo XX hasta llegar a la actualidad. Esta historia de la navegación es la historia de sus métodos, sus instrumentos y sus descubridores pero también en gran medida de las instituciones que la hicieron posible.

Con el perfeccionamiento alcanzado en el siglo XVIII en el diseño de los instrumentos náuticos y los cronómetros marítimos, la navegación astronómica había alcanzado cotas de precisión más que aceptables. Aunque las cuestiones teóricas estaban resueltas, el aumento progresivo de la velocidad de los buques al introducir maquinaria térmica, exigía un procedimiento de cálculo de la longitud mucho más rápido. En última instancia, fueron los propios navegantes los que desarrollaron los métodos de cálculo astronómicos más adecuados, con los métodos de Summer y Saint Hilaire en el siglo XIX que se tratan en el capítulo 2.

La llegada del aeroplano a comienzos del siglo XX, con incluso mayores velocidades, supuso un reto a las técnicas de navegación existentes. Aunque inicialmente intentaron adaptarse los métodos e instrumentos astronómicos, con un gran desarrollo del sextante, los nuevos requisitos impuestos por la aviación encontraron respuesta finalmente en otro gran avance de las ciencias humanas, la radio. El capítulo 3 trata de la revolución que supuso la llegada de la aviación a la navegación astronómica.

Sin embargo, aún quedaba pendiente el problema de la navegación en tres dimensiones, problema que sólo se solucionaría con el desarrollo de la astronáutica y el acceso al espacio en la segunda mitad del siglo XX. Fue necesario que la radionavegación diese paso a la navegación por referencia a astros artificiales, creados por el ser humano para reemplazar a los que le guiaron durante siglos, la conocida como navegación por satélite. Situar una constelación de satélites en órbita con relojes atómicos a bordo fue todo un reto tecnológico. Este cambio de paradigma fue el resultado no sólo del progreso tecnológico y las ideas científicas acumuladas durante siglos sino de las circunstancias de la época. El capítulo 4 contiene una descripción de estos sistemas tecnológicos y del desarrollo conceptual de la navegación por satélite.

En última instancia, este cambio iniciado con la navegación por satélite, en la que se ha sustituido a la bóveda celeste con toda su complejidad por constelaciones controlables de satélites, puede considerarse como irreversible. La navegación astronómica por métodos clásicos ha dejado de ser el principal instrumento para orientarse en el mar. Casi ha dejado de enseñarse en academias navales militares y de marina mercante y cada vez menos profesionales son capaces hoy en día de encontrar su posición sin un GPS. Algunos

de los sistemas de radionavegación, que experimentaron un gran desarrollo desde 1920 a 1970 y fueron utilizados profusamente durante la segunda guerra mundial, aún permanecen en uso, ver tabla 1.1 si bien son desplazados progresivamente por la navegación por satélite.

Por otro lado la propia sociedad moldea la extensión de los avances tecnológicos, hay una concepción social de la tecnología que es evidente en el caso de la navegación por satélite, con un tremendo impacto en nuestro marco conceptual del tiempo y del espacio y cuyos efectos ahora en el siglo XXI aún están por descubrir. Nuestro concepto de lo que supone la navegación ha cambiado, forzado por la tecnología que usamos.

La navegación por satélite se ha revelado además como una tecnología versátil, aunque no lo fue intencionadamente. El GPS es un sistema militar norteamericano, controlado por militares, un origen que su fácil accesibilidad inmediata ha hecho que sea desconocido para gran parte del público y que además no cuestiona sus implicaciones militares ⁵. La sociedad ha sabido encontrar usos y aplicaciones inicialmente no previstos, moldeando los requisitos de los avances de la técnica más allá de las iniciales consideraciones mercantiles o militares. Esto es debido a que el GPS, que como decimos fue diseñado con un uso principalmente militar, se ha integrado fácilmente con múltiples otras tecnologías en el marco de la sociedad de la información.

La sustitución de la referencia a los astros, que fue propia del ser humano durante siglos, por la utilización de un sistema artificial de navegación, plantea importantes transformaciones culturales. Ha supuesto una intervención humana a escala global con el resultado de cambiar de modo irreversible nuestra forma de vida. El sistema de navegación puede considerarse en un marco más filosófico como un artefacto intangible, dotado de funciones propias y de sistema, conceptos que se revisarán aquí. La filosofía de la tecnología se ha ocupado sobre todo del significado de la tecnología para la sociedad y la cultura, y de su impacto en ellas, y además se ocupa de la tecnología en sí misma, con el fin de comprender tanto la práctica del diseño y la creación de artefactos en sentido amplio. Los impactos socio-culturales y más filosóficos de esta tecnología se consideran en el capítulo 5.

Finalmente un apéndice expone brevemente los sistemas de coordenadas celestes y terrestres, así como los estándares de tiempo universal que se utilizan durante la exposición.

⁵El sistema europeo Galileo es enteramente de origen civil

Técnica	Uso	Situación actual, 2022
Navegación celestial, con sextante, cronometro y tablas astronómicas	Navegación marítima tradicional	Como sistema de reserva en emergencias. Los sistemas militares y espaciales emplean seguidores automáticos de estrellas
Mapa, barómetro y brújula	Ejércitos	Ejército, excursionistas
Transit	Sistema obsoleto de cobertura global para uso civil y militar	Fuera de servicio
Omega	Barcos y aviones intercontinentales	Fuera de servicio
Loran-C	Barcos y aviones intercontinentales	Fuera de servicio
VOR, DME, ILS, MLS, TACAN	Sistemas de radioayudas para aviación comercial y militar	En uso
Radar	Aeropuertos, puertos, canales, carreteras, usos militares	En uso, sus capacidades no pueden reemplazarse por la navegación por satélite
Navegación inercial	Misiles balísticos, sistemas militares y aviación comercial	En uso, muy integrado con GPS, resistente a interferencias y contramedidas

Tabla 1.1: Sistemas de navegación aérea y marítima, situación actual

1.2. Objetivos, limitaciones y posibles desarrollos posteriores

El trabajo se ha centrado en la revisión del proceso histórico de evolución de la tecnología de la navegación celestial, con énfasis desde 1900 hasta hoy. Se analizan los instrumentos, métodos e instituciones relacionadas y las influencias de la sociedad en el desarrollo y diseño. También se consideran ciertas consideraciones desde el punto de vista de la filosofía de la tecnología, incluidos los aspectos culturales y sociales de la utilización masiva de esta tecnología en la actualidad.

La bibliografía publicada sobre estos temas es muy extensa y por tanto de calidad variable. Se ha intentado seleccionar, ordenar y sistematizar, para presentar el desarrollo tecnológico como un continuo en la medida de lo posible. Sin embargo el trabajo no intenta ser exhaustivo, lo que no sería posible dado su contexto.

En este sentido, se ha preferido hacer hincapié en aspectos quizás menos conocidos, como el desarrollo del sextante aéreo y la radionavegación. Pero no se hace especial énfasis, por no creer que añade especial valor al discurso, en aspectos meramente descriptivos de la tecnología cuando estos son conocidos o fácilmente accesibles, como por ejemplo detalles técnicos del GPS o del Galileo, que son fáciles de encontrar en recursos abiertos en la web.

Por otro lado, en lo que respecta a la tecnología en sí, se trata de un panorama vasto con múltiples desarrollos derivados, imposible de cubrir aquí en toda su magnitud. Como ejemplo de sistemas que no se tratan y que podrían ser relevantes en un futuro trabajo son los sistemas de navegación a la estima, los mecanismos de cálculo de deriva en aviones y barcos, los sistemas automáticos de seguimiento estelar -empleados en misiles balísticos y sondas espaciales. Tampoco se trata en detalle la transformación de los almanaques tras la llegada de la navegación por satélite. Se ha buscado no el detalle tecnológico, sino una visión del uso y evolución de los conceptos tecnológicos, dentro del marco académico del Máster.

En general se tratan aquí sistemas europeos y americanos, bien conocidos y cuya información está publicada. Otros, como por ejemplo los sistemas de navegación por satélite ruso *Glonass* o el chino *Beidou*, bien no están totalmente operativos o en cierta medida se desconoce su estado de funcionamiento y desarrollo, situados bajo un manto de secretismo. Además en lo posible y cuando es adecuado, se hace referencia al caso español a lo largo del trabajo.

Podemos mostrar ahora, tras más de cinco décadas de navegación por

satélite moderna, que se dispone de cuatro sistemas globales ⁶, más algunos sistemas regionales ⁷. Sin embargo, sólo hace menos de dos décadas, ya entrado el siglo XXI, que el usuario individual empezó a sacar provecho con la integración de los datos de geolocalización con otras aplicaciones en dispositivos portátiles. Los peligros de la falta de privacidad asociados a esta integración se revisan en este trabajo de forma enfocada. Sin embargo, estos riesgos forman parte de un debate más amplio asociado a la sociedad de la información y al internet de las cosas, que no es posible tratar aquí en toda su complejidad, una vez más obligados por la extensión y el contexto.

Por otra parte la evolución tan rápida de estos cambios no ha dado quizás a la filosofía y a la filosofía de la ciencia y de la tecnología la distancia temporal tan necesaria para la adecuada reflexión. Los aspectos psicológicos, éticos y morales no parecen reflejarse aún con una profundidad adecuada en la bibliografía existente y aunque se consideran en este trabajo, podrían ser objeto de una mirada más en profundidad en otros posteriores.

⁶GPS, Galileo, Glonass, Beidou

⁷India, Japón

Capítulo 2

Antecedentes: la navegación celeste hasta finales del XIX

2.1. Desde la antigüedad hasta el siglo XVII

2.1.1. Navegación en la antigüedad

Anaximandro de Mileto, además de ser considerado como el inventor de la cartografía, puede ser considerado como el inventor de la astronomía matemática. En efecto, Anaximandro expuso en el siglo VI a.C. por primera vez la idea de que nuestro planeta es un cuerpo finito que flota en equilibrio estable sobre el espacio y fue uno de los fundadores de la teoría de las esferas⁸ al notar que las estrellas giran alrededor del polo celeste, ver figura 2.1.

El mérito del primer mapa rectangular parece corresponder a Demócrito, en torno al 450 a.C. que lo desarrolló en base a sus experiencias personales viajando por el mundo conocido. Demócrito concibió el mundo habitable como una vez y media más extenso en dirección Este-Oeste que en la dirección Norte-Sur⁹ una noción que dió lugar a los conceptos de latitud, de *latus* (ancho extenso) y longitud, de *longus* (largo).

Hiparco, astrónomo, geógrafo y matemático griego, está considerado el mayor observador astronómico de la antigüedad. Se le considera así mismo el fundador de la trigonometría, pero es quizás más famoso por su descubrimiento incidental de la precesión de los equinoccios¹⁰. Fue el primero del

⁸Popper, 1999, p. 29.

⁹Cotter, 1968, p. 180.

¹⁰Hiparco nació en Nicea y probablemente murió en la isla de Rodas, trabajando como astrónomo al menos entre el 162 y el 127 a.C. La forma achatada de la Tierra en sus polos y la atracción gravitatoria del Sol y de la Luna provocan un lentísimo balanceo en nuestro planeta durante su movimiento de traslación que se conoce con el nombre de precesión

que se conservan modelos cuantitativos y precisos del movimiento del Sol y la Luna, sirviéndose para ello de las observaciones acumuladas durante siglos por los babilonios y por Metón de Atenas (siglo V a.C.), entre otros, y se le atribuye la compilación del primer catálogo estelar completo del mundo occidental y, posiblemente, la invención del astrolabio y de la esfera armilar que utilizó durante la creación de gran parte del catálogo estelar. Hiparco empleó la declinación y la ascensión recta en su catálogo estelar. La declinación y la ascensión recta de la esfera celeste corresponden a la latitud y longitud en la esfera terrestre, ver la sección 6.1.3. Con el establecimiento de esta relación entre astronomía matemática y geografía, se produce el primer hito importante en la historia de la navegación científica. Otros descubrimientos notables de Hiparco fueron la determinación de la inclinación de la eclíptica, la duración del año tropical y la diferencia del año sideral, lo que le llevó a determinar la mencionada precesión de los equinoccios. Hiparco fue además el primero en sugerir un método astronómico para determinar la longitud, basada en los eclipses lunares¹¹

Ptolomeo vivió durante la primera parte del siglo segundo y se cree que la mayor parte de su vida residió en Alejandría o sus alrededores. Su tratado astronómico, llamado *Sintaxis Matemática* o *Sistema Matemático*, más tarde titulado *El Gran Tratado*, se tradujo al árabe en el siglo IX con el nombre de *Al-Magisti* o en castellano como *Almagesto* y en él Ptolomeo recopiló una gran cantidad de datos astronómicos, dando la localización exacta y la descripción de muchas estrellas y desarrolló un complejo y sutil sistema para explicar los movimientos de los planetas colocando a la Tierra en el centro del universo. Ptolomeo se acercó a la geografía a partir de la astronomía y así, recurre a una solución tomada de la misma y derivada de los trabajos de Eratóstenes, Hiparco y Marino de Tiro, consistente en trazar una red de meridianos y paralelos.

El problema de la determinación de la longitud de un lugar sobre la superficie terrestre e igualmente el problema asociado de fijar la ubicación arbitraria de un meridiano de referencia, aparecen ya explícitamente planteados en la otra gran obra de Ptolomeo, la *Geographia*¹². Mientras que la determinación de la latitud de un punto era un problema relativamente trivial para los griegos antiguos, véase la sección 2.1.3, el problema de la longitud presentaba una dificultad muy considerable, que no fue resuelta completamente hasta el

y tiene un sentido retrógrado. Este fenómeno fue descubierto por Hiparco al comparar observaciones realizadas por él, con otras anteriores de los caldeos y dedujo un cierto valor para esa variación. Pero fue Newton quien demostró que la precesión se debía a la atracción gravitatoria del Sol y la Luna sobre una Tierra rotante no esférica.

¹¹Seidelmann y Hohenkerk, 2020.

¹²Manso Porto, 2011.



Figura 2.1: Ilustración de Gregor Reisch en el *Margarita philosophica*, Friburgo, 1503. El atlante sostiene la esfera de las estrellas fijas Fuente: Bayerische Staats Bibliothek Münchener Digitalisierungs Zentrum http://daten.digitalisierungs-zentrum.de/bsb00012346/image_264.

siglo XVIII. Este problema de determinar la longitud es equivalente a determinar la diferencia horaria con respecto al meridiano de referencia, meridiano que Ptolomeo inicialmente situó de forma un tanto vaga atravesando las Islas Canarias ¹³.

Es sabido que Ptolomeo se quedó muy corto en su cálculo de la circunferencia de la Tierra ¹⁴ y además exageró la extensión hacia el este de Asia, de modo que, aunque situó las Canarias a unos siete grados demasiado al este, redujo mucho la distancia que tendría que recorrer un navegante entre

¹³Recuérdese que aproximadamente 15 grados de diferencia en longitud equivalen a una diferencia de una hora

¹⁴Sin embargo el astrónomo griego Eratóstenes, empleando observaciones del Sol y de las distancias conocidas entre Alejandría y Sirene (hoy Asuán), calculó la circunferencia terrestre con gran precisión, con un error de sólo unas 100 millas

Europa occidental y Asia oriental. La historia a la que dió lugar este error es bien conocida¹⁵. En 1474, Pablo Toscanelli, físico y cosmógrafo florentino, basándose en los cálculos de Ptolomeo, escribió al canónigo Fernando Martins, de Lisboa, una carta en la cual le hablaba «del breve camino que hay de aquí a las Indias, adonde nace la Especería, por el camino de la mar, más corto que aquel que vosotros hacéis para Guinea»¹⁶. Al conocer esta carta en 1479, Colón mantuvo correspondencia con Toscanelli y pensó en una ruta alternativa hacia las Molucas o Especiería navegando hacia el Oeste. Dado que la longitud de la Tierra desde Hispania hasta la India por el Este es más de la mitad de la circunferencia, como consecuencia, el mar desde Hispania hasta la India por Occidente ha de ser más corto y a una distancia manejable. A partir de la carta de Toscanelli, que no se conserva, Colón cuenta con una prueba cartográfica para preparar su proyecto descubridor y comercial y hacer los informes cartográficos a los monarcas primero a Juan II de Portugal, que rechazó el proyecto, y después a los Reyes Católicos¹⁷. La extensión del mundo desconocido era una cuestión de importancia crítica para Colón y no es de extrañar que Colón partiera de las Canarias en sus viajes.

2.1.2. La navegación a la estima y el comienzo de la navegación astronómica

La recuperación de la *Geographia* de Ptolomeo y su traducción al latín a principios del siglo XV constituye un hito en la historia de la cartografía. A finales del siglo XV la navegación sufre una transformación profunda. Hasta entonces se había realizado principalmente una navegación costera, orientándose por la costa visible o cercana.

El arte y la ciencia de navegar en altura se remontan al menos hasta la invención del compás magnético en la antigüedad. El pilotaje de altura se dividía en cuatro conceptos, longitud, latitud, rumbo y distancia recorrida. En los inicios del siglo XV sin embargo, la longitud no podía aún calcularse directamente, debiendo deducirse de los otros tres. La nueva navegación de altura o navegación astronómica se inicia en el Atlántico, por los portugueses, en el tercer cuarto del siglo XV, basada en la observación del Sol y considerando que en el hemisferio norte la estrella polar daba la latitud y en el hemisferio sur la cruz del sur, pero el cálculo de la longitud era más complicado.

Para el cálculo de la estima, el piloto calculaba el rumbo seguido por la

¹⁵Morison, 1942.

¹⁶Gandía, 1942.

¹⁷López Piñero, 1986.

nave y la distancia recorrida cada singladura, desde mediodía a mediodía, y procedía a anotarlos en la carta náutica. Para la determinación del rumbo se empleaba la brújula magnética, aunque era conocido que no apuntaba exactamente al polo geográfico terrestre. Se atribuye a Colón el descubrimiento de la declinación magnética, aunque fue Edmond Halley el primero que publicó un mapa en 1701 mostrando las isógonas, las líneas de declinación magnética constante, en el Atlántico¹⁸. Debido a que la variación de la aguja también variaba con el transcurso del tiempo, era necesario recurrir a varios métodos para determinar la declinación en cada punto terrestre. Se empleaban las llamadas agujas de marcar y las azimutales¹⁹, cuya sensibilidad variaba según el modelo empleado.

Otras perturbaciones afectaban a la lectura del rumbo, entre las que destacaban la acción de elementos metálicos de la nave, las interferencias mutuas entre las brújulas embarcadas o la corrección del abatimiento, ronza o guiñada de la nave, el ángulo que forma la quilla con la dirección de la velocidad. Este último solía corregirse observando el ángulo que dejaba la estela del barco con la línea de la dirección.

El instrumento generalmente aceptado en la época para calcular la velocidad de la nave era la corredera. La forma dada a la barquilla podía variar, intentando que una vez en el agua permaneciese lo más estable posible. La corredera tradicional española era una tablilla de madera con forma de arco gótico lastrada con plomo en su borde inferior. La corredera anglosajona tenía dos lados rectos y el lado inferior curvo. Por lo demás, su uso y funcionamiento eran iguales. Iba sujeta en las tres esquinas por tres cordeles que se juntaban a cierta distancia y que iban unidos al cordel de la corredera que iba enrollado en un carretel que se podía sujetar de forma que girara libremente, para medir la velocidad en nudos del buque en relación con el agua. A medida que el barco avanzaba se iba lanzando la cuerda y contando los nudos durante un cierto intervalo de tiempo determinado por una ampolleta o reloj de arena. La distancia exacta entre nudos se calculaba para cada ampolleta en particular. La duración de la ampolleta era de medio minuto más o menos por lo que la distancia entre nudos era una milla náutica dividido entre 120. Para una ampolleta de 30 segundos los nudos que estaban separados 1/120 de milla, y como 30 segundos es 1/120 de hora, se podía establecer fácilmente la velocidad a la hora en millas por hora.

Además de los errores debidos a la estabilidad de la barquilla o de la marcha del reloj de arena, un error muy importante era la determinación de la distancia entre nudos, ya que no había acuerdo internacional en lo que

¹⁸Broughton, 1995.

¹⁹Sellés García, 2000.

respectaba a la extensión de la milla náutica ²⁰.

Los barcos de vela navegando a la estima siguen una trayectoria en un ángulo constante con el viento y el piloto o timonel utiliza la brújula magnética para mantener el barco en un curso constante. En una carta hecha con una proyección Mercator, un camino de dirección constante de la brújula aparece como una línea recta, y en el agregado el viaje aparece como una serie de tramos en zig-zag, cada una de las cuales es un segmento de línea recta. Ahora bien, si la nave viajara realmente a lo largo de una serie de segmentos lineales sobre una superficie plana, sería cuestión de simple trigonometría calcular la posición de la nave en cualquier momento, dada la dirección y la longitud de cada segmento lineal. De hecho, esos cálculos se utilizaban para estimar la posición de la nave y proporcionaban aproximaciones razonables si la distancia total recorrida era como máximo de un par de cientos de millas.

Para viajes más largos o latitudes más altas, las aproximaciones eran peligrosamente inexactas. En realidad la trayectoria del barco que mantiene rumbo constante no es una línea recta sino una espiral loxodrómica sobre la superficie esférica del globo. La matemática para tener en cuenta los efectos del viaje a lo largo de una espiral loxodrómica fue desarrollada por Snell, Harriot, Wright y otros a finales del siglo XVI y principios del XVII, y consiste en multiplicar la relación entre el desplazamiento hacia el este (u oeste) y hacia el norte (o sur) de un tramo del viaje por la suma de Reimann de las secantes de las latitudes atravesadas²¹. Es digno de mención que esto se logró mucho antes de la invención del cálculo infinitesimal. El progreso hacia el norte (o el sur) se convierte en un cambio de latitud por la proporción de 1 minuto de arco de latitud por cada milla náutica de nordeste (o sur).

2.1.3. Cálculo de la latitud

La determinación de la latitud era relativamente sencilla y Ptolomeo ya había establecido en el *Almagesto* diferentes métodos: 1) La distancia de los polos del primer movimiento respecto al horizonte o la distancia del zenit desde el ecuador, medida a lo largo del meridiano; 2) para aquellas regiones en que el Sol llega al zenit, cuándo y cuán a menudo ocurre; 3) las relaciones entre las sombras y el gnomon en los mediodía solsticiales y equinocciales; 4) el tamaño de la diferencia entre el día más largo y el día más corto respecto al día equinoccial y todos los fenómenos que son estudiados al respecto, a los que también añade la dirección en que señala la sombra, al Norte o al Sur,

²⁰La milla náutica se define como la longitud del arco de círculo máximo sobre la esfera terrestre limitado por dos puntos que subtienden un ángulo de un minuto de arco en el centro de la Tierra

²¹Silverberg, 2005.

en cierto momento del año y las estrellas que son siempre visibles, las que no lo son nunca y las que salen y se ponen. En la *Geographia*, Ptolomeo utiliza fundamentalmente la elevación del polo y también la duración del día más largo, combinada con la dirección de la sombra del gnomon, para establecer 21 círculos paralelos al norte y 2 al sur del ecuador a los que denomina inclinaciones, indicando tanto su distancia en tiempo como en grados respecto al ecuador.²²

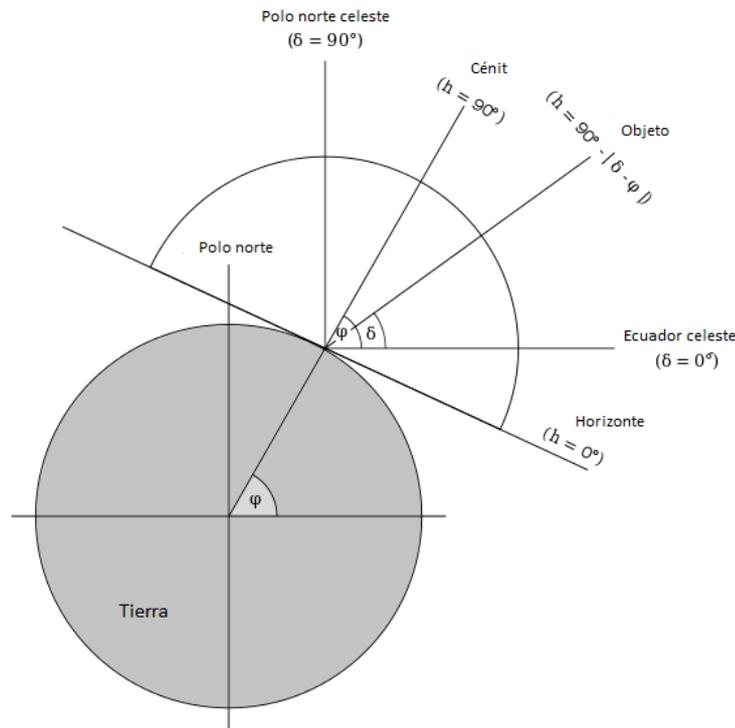


Figura 2.2: Método de la altura meridiana para calcular la latitud de un observador, siendo δ la declinación del astro en cuestión

El método más popular había pasado a ser el cálculo de la altura meridiana, que era aplicable a cualquier astro, tanto al Sol como a una estrella. Era necesario distinguir el horizonte para medir la altura, y la latitud φ resulta igual a una combinación de ángulos de la declinación del astro y su elevación:

$$\varphi = \delta - \zeta \quad (2.1)$$

donde δ es la declinación del astro en cuestión y ζ su distancia cenital. Con

²²Sanchez Navarro, 2001.

respecto a los signos de los distintos ángulos, δ era positiva al norte del ecuador, y ζ era positiva cuando la medición se realiza de cara al norte.

Cuando se usaba una estrella con declinación relativamente constante tanto en el tiempo como independiente de la longitud del buque, el método era relativamente sencillo. La estrella Polar o la Cruz del Sur eran usadas habitualmente²³. Sin embargo, si se empleaba el Sol, el método se complicaba, ya que había que considerar su cambio en declinación. La declinación del Sol varía a lo largo del año y con la longitud del buque, $\delta_S = \delta(L, t)$. Las tablas se daban tabuladas para un determinado meridiano de referencia, habitualmente Londres o Lisboa, lo que implicaba conocer o estimar la longitud de la nave. Además era habitual encontrar cuatro tablas, la primera para un año bisiesto y las otras tres para los tres años posteriores siguiendo la práctica iniciada por el portugués Pedro Nunes²⁴.

2.1.4. Los primeros instrumentos angulares

Para el cálculo de la altura h o su complemento ζ , la distancia cenital, se empleaba la ballestilla, ver figura 2.3, que había reemplazado al astrolabio desde el primer cuarto del siglo XVI²⁵. La ballestilla, adecuada para las estrellas, no permitía sin embargo observaciones por debajo de 20° y por encima de 60° . La ballestilla tuvo una amplia difusión debido a la facilidad de su construcción y manejo. En el caso del Sol, para evitar su observación directa, se empleaban variaciones del instrumento que permitían la observación de espaldas. Son conocidas por ejemplo la ballestilla con dos sonajas, una de ellas deslizante, y el llamado cuadrante de Davis.

El cuadrante de Davis consistía en un bastón graduado en el que se ha colocado un medio travesaño en forma de arco de círculo que podía deslizarse a lo largo del bastón. En el extremo delantero del bastón se colocaba una veleta de horizonte con una rendija a través de la cual se podía observar el horizonte. El bastón se mantenía en posición horizontal y el observador estaba de espaldas al sol, el medio travesaño se desplazaba a lo largo del bastón hasta una posición en la que el borde de su sombra chocaba con la veleta del horizonte y coincidía con el horizonte visto a través de la rendija de la veleta. El instrumento era útil para medir altitudes del sol inferiores a unos 45° . No fue sustituido para su uso en el mar hasta aproximadamente 1731, cuando se introdujo el cuadrante reflectante de Hadley. El cuadrante no podía ajustarse y, por lo tanto, era necesario que el usuario determinara de antemano su error instrumental. Para ello, se solía realizar observaciones de la altitud del

²³Cotter, 1968.

²⁴Cotter, 1968.

²⁵Stimson y Daniel, 1977.

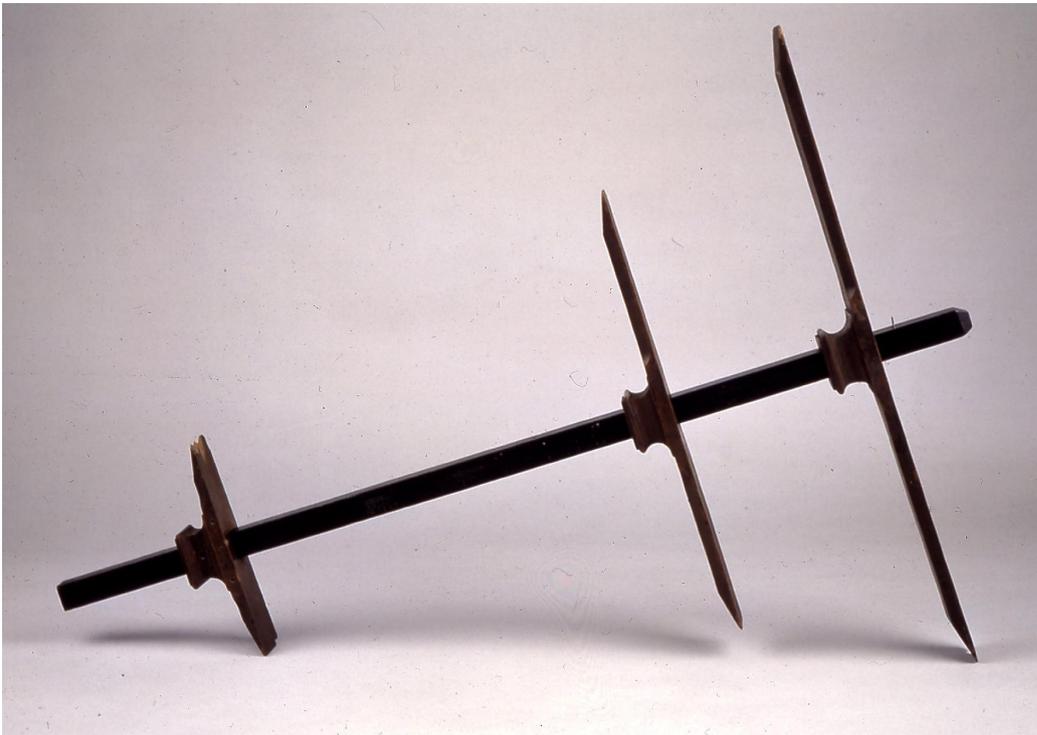


Figura 2.3: Ballestilla. Este instrumento comenzaron a usarlo los portugueses en el s. XVI para observar la altura angular del Sol y la Polar sobre el horizonte del mar. Fabricada en ébano en 1723, el ejemplar de la fotografía es el único que se conserva en España. Fuente: colección del museo naval de Madrid

meridiano en lugares de latitud conocida. Una vez descubierto el error, el observador lo aplicaba a todas las altitudes medidas con él. El cuadrante de Davis permitía dividirlo con gran exactitud, mediante la utilización de escalas diagonales, y fue el primero que combinó la imagen del Sol y el horizonte sin que se afectase por los movimientos de la nave, además de ser más apropiado para grandes alturas del Sol.

2.2. El desarrollo de la navegación científica

La navegación celeste en el mar puede fecharse con exactitud a partir de la invención, casi al mismo tiempo, del sextante y del cronómetro. Una urgente necesidad de mejorar la navegación dio lugar a los gemelos -el sextante y el

cronómetro- hacia 1734 ²⁶, ver figura 2.4. Dado que el único medio práctico para determinar la longitud requiere un dispositivo de cronometraje preciso, no hubo ningún medio para determinar la longitud en el mar hasta que Harrison, en 1735, construyó su cronómetro H1, que todavía está en funcionamiento en Greenwich, Inglaterra. El avance fue tan grande y la necesidad tan plenamente satisfecha que hacia 1800 los métodos de navegación celeste se estandarizaron.

La invención del octante, precursor del sextante, como nuevo instrumento de reflexión se atribuye a Hadley en 1731, ver figura 2.4, aunque pueden encontrarse antecedentes en diseños previos de Hooke y Newton²⁷. En este instrumento como es sabido la altura del astro resulta el doble del ángulo sobre la escala Vernier del sector circular. El sextante fue inventado casi simultáneamente, e independientemente, por Thomas Godfrey de Filadelfia y John Hadley de Inglaterra hacia 1733. Para complementar estos dos dispositivos de observación, se necesitaban tablas adecuadas y un mejor almanaque náutico. Hacia 1802, Bowditch ²⁸ proporcionó excelentes tablas náuticas, con lo que la navegación celeste se estandarizó y se hizo lo suficientemente precisa para satisfacer las necesidades del marino.

Las grandes naciones marítimas de Europa ofrecían periódicamente concursos para encontrar métodos que fuesen prácticos para calcular la longitud. La carrera por el comercio mundial y la supremacía marítima llevó a la monarquía española de Felipe II a ofrecer un premio por el descubrimiento de la longitud en el mar a finales de la década de 1590, al que seguiría, a principios del decenio de 1600, la secuencia de premios de la República Holandesa. La decisión del gobierno británico en 1714 para ofrecer un premio particularmente grande indicó la importancia que seguían teniendo los esfuerzos por abordar una problema de navegación que, de ser resuelto, tendría un impacto sustancial²⁹.

Aparte de la estimación grosera que puede ser calculada a la estima, los dos métodos principales para determinar la longitud son métodos astronómicos y métodos mecánicos. Los métodos astronómicos se basan en determinar el tiempo de un evento astronómico, como un eclipse, que se conozca para un meridiano en particular. Si se conoce el tiempo local en el que ocurre el evento, la longitud del observador, al este o al oeste del meridiano de referencia, puede obtenerse mediante la comparación del tiempo local y del

²⁶selles1994instrumentos

²⁷Barrie, 2014.

²⁸Nathaniel Bowditch, fue un matemático norteamericano, considerado como el fundador de la navegación marítima moderna. Su libro *The New American Practical Navigator* fue editado por primera vez en 1802

²⁹Johnson, 1989.



Figura 2.4: Octante modelo Hadley perteneciente a Antonio de Ulloa, naturalista, militar y escritor español y descubridor del platino, c 1740, colección del museo Naval de Madrid

tiempo registrado para el evento en el meridiano de referencia. El método mecánico incluye el uso de un cronómetro, cuyo error sea conocido, y que permite conocer la diferencia de tiempo entre el tiempo local y el tiempo en el meridiano de referencia, dando como resultado la diferencia en longitud del observador.

En 1514 Johannes Werner había sugerido un método para utilizar el mo-

vimiento lunar para la navegación celeste³⁰. Werner sugirió que deberían obtenerse las posiciones de las estrellas a lo largo de la trayectoria aparente lunar, así como las distancias relativas entre luna y el sol³¹. Con esta información recogida en forma de tablas, un navegante que conociese su hora local a través de la observación solar, podría comparar su observación astronómica con la tabla correspondiente y obtener así la diferencia horaria y por tanto de longitud, con respecto a un punto conocido. Cuando Werner propuso su método sin embargo, esta información no era bien conocida, y el movimiento observado de la luna parecía ser errático. Además, los navegantes no disponían de instrumentos precisos para poder medir la distancia entre la luna y otros objetos celestes desde un barco en movimiento.

Galileo en 1612 sugirió a Felipe III un método basado en los periodos orbitales de los satélites jovianos. Los eclipses de los satélites de Júpiter son muchísimo más frecuentes que los del Sol o la Luna, sea porque se pueden determinar con mucha mayor precisión que éstos o que los eclipses de estrellas por la Luna, sea porque las efemérides y tablas de los movimientos de los satélites son mucho más fáciles de elaborar que las tablas lunares. Sin embargo la imposibilidad de poder observar los satélites de Júpiter a simple vista y la necesidad de recurrir al telescopio, hacen que la propuesta se encuentre con diversos problemas prácticos a la hora de aplicarla a la navegación^{32 33}.

En 1674, el rey inglés Carlos II, que reinaba sobre la mayor flota comercial del mundo, fue influenciado por Moore y Wren para que estableciera un observatorio en beneficio de la navegación y, en particular, para que realizara observaciones minuciosas del movimiento de la Luna, de modo que pudieran elaborarse tablas lunares precisas con un año de antelación. El observatorio fue establecido en Greenwich en 1675. Flamsteed, que se convertiría en el primer astrónomo real, había declarado que las tablas lunares existentes eran casi inútiles y que las posiciones de las estrellas publicadas en los almanaques de la época eran erróneas, con lo que los navegantes podían obtener poco beneficio de ellas para encontrar la posición en el mar³⁴. La aparición de los

³⁰Silverberg, 2006.

³¹La luna recorre una distancia sobre el fondo de las estrellas fijas aproximadamente igual a su anchura cada hora. Durante las horas del día, la luna es visible aproximadamente la mitad de cada mes, cuando se acerca o aleja del Sol.

³²Sanchez Navarro, 2001.

³³El planteamiento de Galileo era optimista incluso respecto a la construcción de las efemérides, pues las tablas de los satélites de Júpiter no estuvieron disponibles hasta que las elaboró Cassini en 1668, siendo el director del observatorio astronómico parisino creado por Luis XIV. El método no era en general practicable debido a los movimientos del barco aunque si en los aterrajajes, aunque las observaciones de las lunas de Júpiter condujeron a Ole Roemer a un primer cálculo de la velocidad de la luz.

³⁴La principal tabla que contenían los primeros almanaques náuticos era una en la que

primeros almanaques náuticos está íntimamente relacionada con el problema de determinación de la longitud. Las tablas lunares fueron mejoradas hasta un grado suficiente para las necesidades de la navegación oceánica, en gran parte gracias a los esfuerzos de Mayer. El uso de las tablas de Mayer era engorroso y requería de numerosos cálculos. En 1767 para simplificar estos cálculos se publica en Inglaterra en primer almanaque náutico, recopilando efemérides astronómicas para el uso tanto de marinos como de astrónomos. Maskelyne, fue nombrado Astrónomo Real en 1765, y dirigió la publicación del primer Almanaque Náutico en 1765 para 1767.

El método de encontrar la longitud por medio de un reloj, que había sido sugerido por el astrónomo flamenco Frisius ya en 1530³⁵, fue perfeccionado³⁶ por John Harrison, un ingenioso fabricante de relojes de Yorkshire³⁷, más o menos al mismo tiempo que el método de encontrar la longitud por medio de la distancia lunar alcanzó cierto grado de perfección. A pesar de que se pensaba que serían los métodos astronómicos los que darían la solución al problema de la longitud, John Harrison construyó una serie de cronómetros que demostraron la posibilidad de emplear estos instrumentos para calcular

se daban las distancias angulares entre el centro de la Luna y ciertas estrellas fijas y el Sol con respecto a la hora de Greenwich. Midiendo el ángulo entre la Luna y una de las estrellas dadas o el Sol, y comparándolo después de calcular primero el ángulo entre el centro de la Luna y la estrella o el Sol en el centro de la Tierra (un proceso conocido como compensación de la distancia), se podía encontrar la diferencia entre la hora local y la hora de Greenwich por inspección. Esta diferencia de tiempo correspondía a la diferencia entre la longitud de Greenwich y la longitud del barco en el momento de la observación.

³⁵Sobel, 2005.

³⁶Hubo intentos anteriores de desarrollar un cronómetro marítimo viable, destacando los dos aparatos desarrollados por Huygens, quien escribió dos tratados al respecto, *Horologium Oscillatorium* en 1658 y *Kort Onderwys* en 1665. Los relojes de Huygens, desarrollados con el relojero Salomon Coster en La Haya, eliminaban el volante regulador de Galileo y su hijo, y lo sustituía por un péndulo suspendido libremente de un cordón o un hilo, muy aislado por tanto de las perturbaciones causadas por los distintos rodamientos. Estos cronómetros de péndulo sin embargo, sólo funcionaban correctamente con tiempo favorable. Huygen descubrió además que el movimiento circular del péndulo no es isócrono y que era necesario un movimiento en cicloide, que es como es sabido, una curva tautócrona (Landes, 2007). Para evitar este error circular, dado que no era posible construir un reloj cuyo péndulo describiese arcos iguales. Para solucionar estos inconvenientes del reloj de péndulo, Huygens introdujo el muelle regulador en espiral, aunque la paternidad de este invento no estuvo exenta de polémica con Hooke en el seno de la Royal Society (Hall, 1951)

³⁷Harrison no tenía educación formal. Hijo de carpintero, completó su primer reloj de péndulo, enteramente en madera en 1713, a los veinte años de edad. Su conocimiento de la madera pudo ser muy útil en sus desarrollos posteriores de relojes sin lubricación. Los intentos anteriores de cronómetros marítimos empleaban aceite para lubricar los engranajes, siendo las variaciones de viscosidad del aceite con la temperatura responsables en cierta medida de las inexactitudes de los relojes marítimos durante un largo viaje

la longitud en el mar³⁸. Un poco antes de morir en 1776 recibió la cantidad de 20,000 libras que se había ofrecido como premio para resolver el problema de la longitud por parte del *Board of Longitude*, la Comisión de Longitud³⁹. La precisión era crucial. En el Ecuador, la Tierra gira hacia el Este con respecto al Sol a unos 464 metros por segundo. Para que un cronómetro pudiese ser útil, no debería atrasar o adelantar más que unos pocos segundos a lo largo de un viaje trasatlántico. Tenía además que funcionar en un ambiente hostil, con vibraciones, aceleraciones y cambios de temperatura, sin posibilidades de tener un mantenimiento adecuado a bordo. Los péndulos estaban descartados, por lo que deberían emplearse otros mecanismos. Una diferencia de una hora equivale a quince grados de longitud. Sin embargo el conocimiento preciso de la hora en dos longitudes distintas no era posible con relojes de la época. En la cubierta de un barco este tipo de relojes se frenaban o aceleraban o dejaban de funcionar. Los cambios normales de temperatura encontrados durante el viaje cambiaban la viscosidad del aceite de lubricación y afectaban a la dilatación de las partes metálicas, con resultados desastrosos⁴⁰. También variaciones de presión barométrica o variaciones pequeñas en la gravedad terrestre afectaban al funcionamiento del cronómetro.

Con la introducción de métodos matemáticos relativamente complejos para encontrar la longitud en el mar creció la necesidad de mejorar la educación de los marineros en tierra⁴¹. En muchos puertos surgieron academias náuticas en las que los marineros podían recibir instrucción sobre cómo encontrar el punto fijo en el que se encontraba el barco. Numerosos problemas astronómicos se redujeron a complejas reglas y tablas que iban a poner a prueba la memoria de los marineros de los siglos XVII y XVIII. En particular, las reglas y los cálculos necesarios en el problema lunar para encontrar la longitud se consideraron muy tediosos y difíciles, y se hicieron muchos esfuerzos pa-

³⁸Sobel, 2005.

³⁹La historia de los cronómetros de Harrison es ciertamente fascinante y demuestra el éxito de combinar el genio y la tenacidad individual con el apoyo institucional y privado (Sobel, 2005). Harrison había preparado ciertos bocetos que presentó a Halley, miembro de la Comisión, en 1730. Halley, segundo astrónomo real tras Flamsteed, impresionado por los diseños de Harrison, lo puso en contacto con Graham, conocido relojero y fabricante de instrumentos científicos y miembro de la Royal Society. Graham le dió un préstamo personal a Harrison para que desarrollase el primer cronómetro H1, de 34 kilogramos en madera y latón, durante los siguientes cinco años. Harrison entregó su reloj a Graham en 1735, quien inmediatamente lo presentó a la Royal Society, comenzando un año después las pruebas con la marina británica (Baugh, 1978). Entre 1730 y 1759 Harrison construyó un total de cuatro cronómetros marinos, que mantenían su precisión incluso en latitudes lejanas y en fuerte oleaje

⁴⁰Landes, 2007.

⁴¹Sellés García y Lafuente García, 1985.

ra reducir el trabajo de cálculo. Los primeros cronómetros diseñados para encontrar la longitud en el mar eran costosos y poco fiables. Estos factores fueron los responsables de la larga popularidad del método lunar para encontrar la longitud. Hacia el final del siglo XIX, las mejoras en las técnicas de fabricación de cronómetros, que dieron lugar a una mayor fiabilidad y a una reducción del precio, supusieron el fin del método lunar, y las tablas lunares se tabularon por última vez en un almanaque náutico británico en el año 1906.

2.3. La navegación astronómica moderna en el siglo XIX

En el siglo XIX se introdujeron relativamente pocos cambios, aunque hay que reconocer el mérito de Sumner y St-Hilaire por sus valiosas contribuciones. A principios del siglo XIX, los cronómetros marinos eran lo suficientemente fiables y comenzaban a hacerse más baratos y accesibles⁴². Igualmente los sextantes y octantes eran precisos y fáciles de usar. La primera edición del *New American Practical Navigator* de Bowditch, considerado el fundador de la navegación marítima moderna, en 1802 corrigió la mayoría de los miles de errores en las tablas de navegación que habían sido recientemente publicadas⁴³.

El procedimiento para determinar el punto fijo de la posición del buque era sin embargo relativamente largo. En primer lugar era necesario determinar el mediodía verdadero local mediante la observación del Sol, principalmente mediante los métodos de las alturas absolutas o de las alturas correspondientes⁴⁴, para los que se necesitaba al menos un octante sencillo. Este método también podía aplicarse con otro astro, como una de las estrellas fijas o la Luna, cuya declinación también estaba tabulada convenientemente. Cuando el Sol se orienta hacia el este o el oeste su altitud, su declinación y su acimut pueden utilizarse para calcular su ángulo horario, a partir del cual puede hallarse la longitud del observador, siempre que éste disponga de un cronómetro del que se conozca el error de la hora universal. La longitud obtenida de una observación del Sol era así independiente de la latitud. La longitud obtenida a partir de una observación del Sol cuando su rumbo no es este u oeste estará en error si la latitud utilizada en el cálculo no es la verdadera latitud del barco. De ahí la importancia de utilizar una latitud lo más cercana po-

⁴²Silverberg, 2007.

⁴³Vanvaerenbergh y Ifland, 2003, p. 1.

⁴⁴Sellés García, 2000, p. 158 y ss.

sible a la verdadera, para calcular el ángulo horario del Sol a partir de una observación de la mañana. La latitud utilizada para resolver la longitud con el cronómetro a partir de una observación del Sol se obtenía generalmente a la estima por cálculo a partir de una posición previamente conocida y, por lo tanto, podía estar muy equivocada. En muchos casos, el error se determinaba a partir de la observación del Sol del mediodía, tras lo cual se volvía a resolver el problema cronométrico utilizando la latitud correcta.

A veces no era posible observar un astro en el meridiano. En ese caso la latitud podía obtenerse alternativamente mediante una doble observación, dos observaciones de la altitud de un cuerpo celestial, conociendo el intervalo de tiempo entre ambas. El navegante portugués Pedro Nunes fue el primero en proponer este método en su *Tratado da Sphera* en 1537⁴⁵, método mejorado posteriormente por el inglés Hues en 1594 y por el holandés Douwes en 1754 al incluir la publicación de los factores trigonométricos y las tablas logarítmicas necesarias para el cálculo de la latitud, y más tarde determinando la longitud mediante observaciones tomadas cuando el sol daba, lo más cerca posible, al Este o al Oeste ⁴⁶. Por otro lado, durante el intervalo entre medidas, la posición de la nave podía haber cambiado significativamente y las primeras estimaciones de la latitud ya no eran válidas, pero los últimos cálculos dependían sobre ellos. Así, un error en la Latitud obtenida también daría como resultado una longitud errónea.

2.3.1. El descubrimiento de Sumner

El descubrimiento de Sumner se hizo en 1837, y los detalles del mismo los incluyó en un famoso folleto sobre el tema, que se publicó por primera vez en Boston en 1843⁴⁷. El descubrimiento tuvo algo de accidental. Cuando Sumner estaba navegando desde Charleston, Carolina del Sur, con destino a Greenock, Escocia, a la entrada del canal de San Jorge entre Inglaterra e Irlanda, bajo condiciones climáticas desfavorables, el 17 de diciembre de 1837, las observaciones habían sido imposibles durante días, y la posición del barco sólo se conocía aproximadamente por estima. Cuando una mañana el Sol apareció a través de las nubes, Sumner tomó rápidamente una altitud.

⁴⁵Nunes, 2002.

⁴⁶Cuando la altura se tomaba alrededor del mediodía, el error en la longitud podría ser muy grande, porque el paralelo de la latitud y el círculo de alturas iguales – obtenidos al medir la altura – se interceptarían muy desfavorablemente, de modo que el error en la longitud puede ser considerablemente más grande que el error en latitud. Sin embargo, si se toma la altura cuando el objeto observado era este u oeste, un error en latitud implicaría solo un error menor en la longitud.

⁴⁷Vanvaerenbergh y Ifland, 2003.

Utilizó su latitud para calcular la longitud, lo que le situó más al este de lo esperado. Con la costa muy cercana, y, al no estar seguro del lugar del barco, Sumner calculó posibles posiciones con tres latitudes asumidas. Al trazarlas en la proyección Mercator, observó que todas estaban en línea recta⁴⁸, ver figura 2.5.

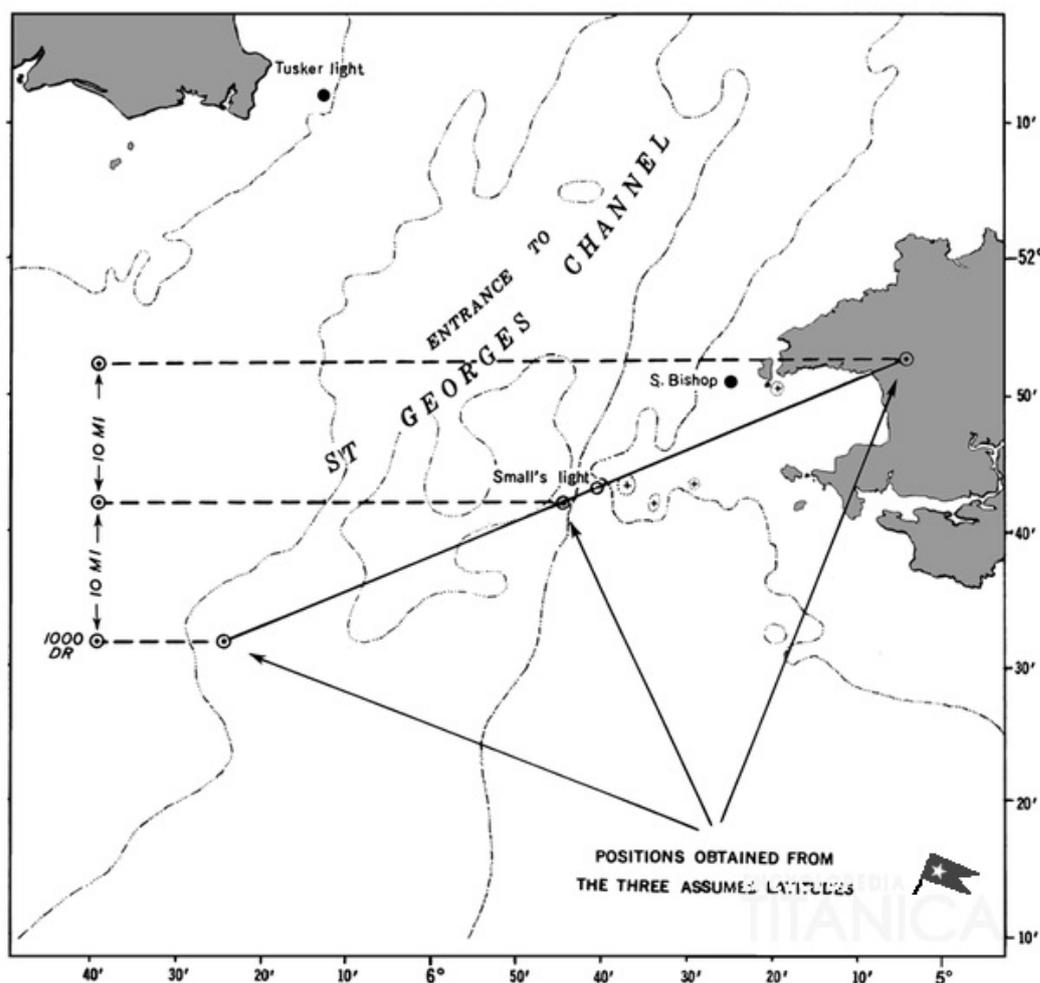


Figura 2.5: Línea de posición, tal y como fue obtenida por Sumner, tomada de <https://www.siranah.de/html/sail040t.htm>

La posición de la nave debe haber estado en una línea de igual altitud del sol durante el tiempo dado, y esta línea no formaba más que una pequeña parte de un círculo con un inmenso radio proyectado sobre la tierra, que

⁴⁸Oestmann, 2011.

tiene su centro directamente debajo del sol ⁴⁹. Así, el azimut del sol será perpendicular a la tangente del círculo en el punto de observación. Debido al inmenso radio del círculo del sol, un corto segmento del mismo podría asumirse como bastante recto. El hecho de que una sola observación de un cuerpo celeste definiera una línea en la que el observador debe situarse en algún lugar, le permitió a Sumner fijar el rumbo correcto. Así, al observar la altura de un astro de coordenadas ecuatoriales conocidas, podemos definir en la esfera terrestre una línea de posición circular llamada círculo de altura o recta de altura, lugar geométrico de los puntos de situación del barco. El error que se comete al sustituir el círculo de altura por un arco de loxodrómica es tanto menor cuanto menor es el radio del círculo, siendo por tanto mejor observar astros cuyas alturas no sean demasiado grandes.

El trazado en la proyección mercator de la recta de altura se facilita porque dichas rectas son normales a la dirección del azimut. El cálculo de éste resulta por tanto imprescindible.

El método de Sumner instruía al navegante para que tomara su latitud por cuenta, es decir, su latitud a la estima y seleccionara latitudes más altas y más bajas que la estimación, cuya medida fuera un número entero de grados. Para cada una de estas latitudes, el navegante tomaría la altitud observada del sol a partir de la lectura de su sextante, y la declinación solar a partir del almanaque. Estas tres cantidades se utilizan para determinar la hora aparente local. Utilizando la hora de Greenwich -o de París- del cronómetro, se calcularía la longitud para cada latitud supuesta. Estos puntos se conectan

⁴⁹El capitán Sumner reconoció y señaló que la línea de posición era en realidad un pequeño círculo centrado en la posición geográfica del sol. De hecho, había creado un sistema de coordenadas de pequeños círculos concéntricos, centrados en el sol en un instante determinado, que podía combinarse con un sistema similar de círculos, centrados en el sol en un momento diferente para localizar la posición de un barco en la superficie del océano. También se dio cuenta de que, localmente, la línea de posición aparecería como una línea recta en el mapa, siendo esa línea la tangente al círculo de igual iluminación, y perpendicular a la línea que apuntaba desde el observador a la posición geográfica del sol. Estando una mitad de la superficie esférica de la tierra iluminada por el sol en un instante dado, mientras que al mismo tiempo la porción opuesta está en la sombra, esa línea, que es el límite entre el hemisferio iluminado y el oscuro, es el llamado círculo de iluminación. Es un gran círculo, y su plano pasa por el centro de la tierra, dividiéndola en dos partes iguales, todos los lugares situados en el círculo de iluminación, al tener el centro del sol en el horizonte, tienen su altura igual a 0 grados, y aquel punto de la superficie de la tierra, próximo al sol, y que es el polo del círculo de iluminación, tiene el sol en el cenit; en consecuencia, en ese punto su altura es igual a 90 grados. Las alturas intermedias del sol pueden igualmente ser contadas en pequeños círculos, paralelos al círculo de iluminación; y que pueden ser llamados paralelos de igual altitud; ya que sirven al propósito de mostrar todos aquellos lugares en la superficie de la tierra, que tienen una altura igual del sol, en el mismo instante de tiempo; el polo, en el cual el sol está en el cenit, puede ser llamado el polo de iluminación, y todo el sistema de círculos, el sistema de círculos de iluminación.

con una línea recta, el paralelo de igual altura y el barco debe situarse sobre ella. El paralelo de igual altura es, por supuesto, un pequeño círculo y no una línea recta. Pero el radio de este pequeño círculo es el complemento de la altura solar, y en la mayoría de las latitudes el radio de este círculo es de miles de millas. La parte de este círculo en la escala del mapa será una línea recta. Dos observaciones de este tipo pueden proporcionar una posición fija si el barco no se ha movido en el intervalo. Si el barco se ha movido entre las observaciones, entonces si la primera línea se adelanta al momento de la segunda, basándose en el cálculo del cambio de posición del barco, se obtiene una posición fija. La máxima precisión se obtiene cuando las dos líneas se cruzan cerca de un ángulo de 90 grados, y la precisión se degrada si las líneas son casi paralelas⁵⁰. Lógicamente el ángulo entre las dos líneas se ve afectado por el paso del tiempo, el movimiento del sol en el cielo, y la distancia que el buque ha recorrido entre las observaciones.

Aparte del método geométrico que implicaba dibujar líneas en las cartas, la posición puede ser fijada matemáticamente por un método que Sumner también había ideado e incluido en su libro, más tarde llamado de *doble altura*. Si se hiciera otra observación del mismo cuerpo celeste después de un cambio apreciable en el azimut, se podrían dejar dos líneas de posición para obtener una fijación. Sin embargo, el procedimiento matemático ideado por Sumner era extremadamente engorroso e implicaba una inmensa cantidad de cálculos logarítmicos.

Tras el descubrimiento del método, éste ha sido la base de la navegación celestial hasta el día de hoy. Fue adoptado inmediatamente por la marina norteamericana así como por la Royal Navy. Henry Raper lo incluyó ya en la tercera edición de su famoso libro sobre navegación⁵¹. En las marinas civiles fue adaptado mucho más tarde, en Inglaterra en 1878 y en Países Bajos en 1882. En 1876 Sir William Thomson⁵² publicó sus *Tables for Facilitating Sumner's Methods at Sea*⁵³. Según su propio relato, Thomson fue introducido en el método por el Capitán Henry Augustus Moriarty a bordo del *H.M.S. Agamemnon* prestado por el Almirantazgo para poner el primer cable de telégrafo del Atlántico en 1858. Una tabla de métodos cortos propuesta por Lord Kelvin fue diseñada para llevar el método de Sumner a un uso más general. Sin embargo, las reglas de Thomson eran demasiado complejas, y por lo tanto no se hizo popular, pero formaron el punto de partida para una avalancha de tablas de método simplificados en las décadas siguientes, que

⁵⁰La navegación por satélite también se ve afectada por este fenómeno, que se conoce como *dilución de la precisión*

⁵¹Cotter, 1983.

⁵²Lord Kelvin, 1824-1907

⁵³Kelvin, 1886.

metrópoli a las múltiples colonias. Los científicos y marinos franceses eran muy activos en las ciencias de navegación y publicaban en *Revue Maritime et Coloniale* entre otras revistas científicas. En esta revista, Marq Saint-Hilaire publicó su método para encontrar la línea de posición mientras era capitán del buque escuela *Renommée*. El método se encuentra en dos artículos, el primero *Note sur la détermination du point*⁵⁴ en 1873 seguido por *Calcul du Point Observé*⁵⁵ en 1875, este último en dos partes.

El método de Saint-Hilaire es un descendiente directo del de Sumner, con algunas diferencias significativas⁵⁶. Tanto Sumner como Saint-Hilaire utilizan el triángulo de navegación formado por el polo celeste, la posición geográfica del sol y la posición del barco. Sumner utiliza la altitud solar medida, la declinación solar del almanaque y una latitud supuesta para el barco, a partir de los cálculos de navegación a estima, para calcular el ángulo en el polo celeste. Así Sumner mide o estima los tres lados del triángulo de la navegación. Dadas tres partes cualesquiera, lados o ángulos de los vértices de un triángulo esférico, se puede calcular cualquiera de las otras tres partes. Sumner opta por calcular el ángulo del vértice en el polo, que a través de un cronómetro, proporciona la longitud en la que debe situarse el barco para que el sol aparezca a la altitud observada, si la latitud estimada fuera correcta. A continuación, asume una segunda latitud, repite el cálculo para obtener una segunda longitud, traza la posición, latitud y longitud, en la carta marítima, las conecta con una línea recta y utiliza esa línea como línea de posición o círculo de igual altitud.

El método de St. Hilaire hace uso de la diferencia entre la altitud observada y la calculada con ayuda de una posición estimada. Para poder calcular la línea de posición según el método de St Hilaire, es necesario obtener la posición a la estima, o algún punto situado en sus cercanías⁵⁷ y calcular, para este punto, la altitud y el azimut del cuerpo celeste que se observe. El procedimiento puede resumirse como sigue⁵⁸, ver la figura 2.7:

1. Observar con el sextante la altitud de un cuerpo celeste conocido.
2. Anotar la hora exacta de la observación.

⁵⁴Saint-Hilaire, 1873.

⁵⁵Saint-Hilaire, 1875.

⁵⁶El método de Saint-Hilaire, fue ampliamente adoptado con la invención del avión y la necesidad de la navegación aeronáutica. La velocidad con la que un avión cambia de posición hizo que el uso de los métodos anteriores fuera poco práctico. Los métodos desarrollados por Saint-Hilaire siguieron siendo los principales métodos de navegación, tanto para los barcos como para los aviones, durante todo el siglo XX.

⁵⁷Weems et al. 1937.

⁵⁸Lyon, 1945.

3. Tomar del almanaque la declinación y el ángulo horario para el cuerpo observado a la hora central de Greenwich (GCT).
4. Aplicar la longitud asumida al ángulo horario de Greenwich para calcular el ángulo horario local.
5. Calcular la altura h y el azimut A_{Z_N} usando como argumentos la latitud estimada, el ángulo horario y la declinación.
6. Comparar la altitud asumida y la obtenida, para obtener la diferencia de altura, ΔH
7. Establecer la diferencia de altura según el azimut calculado y dibujar la línea de posición perpendicular por este punto

$$\cosh \cdot \operatorname{sen} A = \cos \delta \cdot \operatorname{sen} H \quad (2.2)$$

$$\operatorname{sen} h = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi A + \cos \delta \cdot \cos \phi \cos H \quad (2.3)$$

$$\cosh \cdot \cos A = -\operatorname{sen} \delta \cdot \cos \phi + \cos H \cdot \operatorname{sen} \phi \cdot \cos H \quad (2.4)$$

Si la altitud observada con el sextante coincide con la asumida, la diferencia de altitud es nula. Entonces, sólo es necesario trazar desde este punto una línea de rumbo según el azimut calculado. La perpendicular a esta línea que pase por el punto estimado será la línea de posición. Si la altitud observada es mayor que la calculada, entonces el observador está más cerca de la posición geográfica del cuerpo celeste que la posición asumida para el observador. En este caso, la línea de posición se desplaza a la posición geográfica del cuerpo celeste en una distancia en millas náuticas igual a la diferencia de altitudes en minutos de arco.

Para calcular la altura h y el azimut A_{Z_N} usando como argumentos la latitud estimada, el ángulo horario y la declinación, se empleaban diversas fórmulas. Resolviendo para las tres cantidades en el triángulo astronómico $\bar{\delta}$, complemento a la declinación de la estrella, $\bar{\phi}$ complemento a la latitud del observador y \bar{h} , complemento a la altura de la estrella, se obtiene una aplicación directa de la ley de los cosenos de trigonometría esférica:

$$\cos \bar{h} = \cos \bar{\delta} \cos \bar{\phi} + \operatorname{sen} \bar{\delta} \operatorname{sen} \bar{\phi} \cos t \quad (2.5)$$

A principios del siglo XX, antes de la llegada de la calculadora electrónica, el navegador tenía que realizar los cálculos a mano, con ayuda de tablas

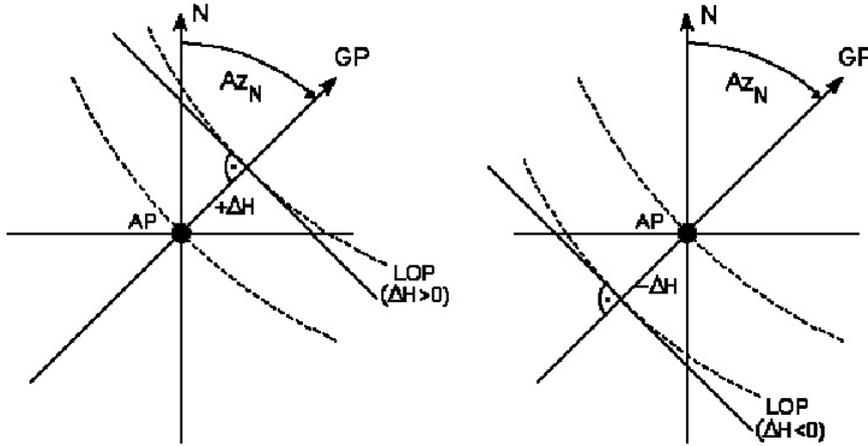


Figura 2.7: Método de St Hilaire, cuando hay diferencias de alturas del objeto celeste desde la posición observada y la estimada, tanto para diferencias de altitud positivas como negativas. AP es la posición estimada del observador, generalmente calculada a la estima. ΔH es la diferencia de alturas, GP es la posición geográfica del objeto celeste para el momento de cálculo, AZ_N es el azimut

numéricas. En general, los logaritmos podían utilizarse para convertir la multiplicación de valores trigonométricos en sumas. Sin embargo, la ley de los cosenos, ecuación 2.5, no permite su conversión a logaritmos directamente, dado que no hay fórmula para el logaritmo de la suma de dos elementos, y por tanto el lado derecho de la ecuación no se simplifica al tomar logaritmos. A veces el triángulo astronómico se dividía en dos triángulos rectos para aplicar las reglas de Napier en vez de la ley de los cosenos. Sin embargo este método daba problemas si el valor de \bar{h} era pequeño.

El navegador generalmente aplicaba la fórmula del *semiverseno*⁵⁹ ⁶⁰, que se obtiene aplicando la definición del semiverseno a la fórmula del coseno,

$$hav\bar{h} = hav(\phi - \delta) + \cos\phi\cos\delta havt \quad (2.6)$$

Con los tres lados del triángulo así calculados, el cálculo del azimut Z o

⁵⁹Van Brummelen, 2012, p. 186 y ss.

⁶⁰El *verseno* se define como $vers\theta = 1 - \cos\theta$, de donde $vers\theta = 2\sin^2\frac{\theta}{2}$. Dividiendo entre 2 se obtiene el *semiverseno* $hav\theta$, tabulado por James Andrew en 1805 y muy utilizado entre los marinos. Sus valores son siempre positivos y más precisos que el coseno para manejar valores de ángulos pequeños

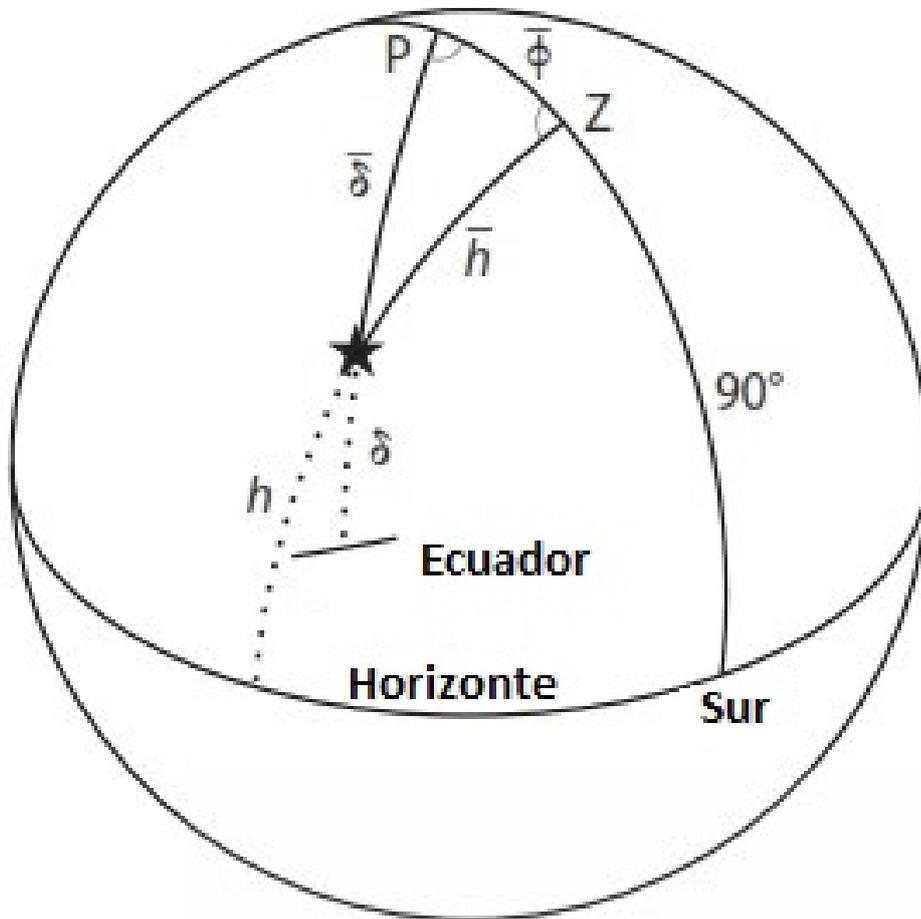


Figura 2.8: El conocido como triángulo astronómico, ha de resolverse mediante trigonometría esférica. El triángulo astronómico se obtiene al conectar el objeto celeste observado, el polo norte P y el cenit Z . El ángulo en P es el ángulo horario local del objeto en cuestión. Para resolver el triángulo por el método de St Hilaire se tienen tres cantidades, el ángulo horario local t , la declinación del astro δ y al menos una aproximación a la latitud local ϕ

A_{Z_N} se obtiene directamente al aplicar la ley de los senos:

$$\frac{\text{sen}\bar{h}}{\text{sen}t} = \frac{\text{sen}\bar{\delta}}{\text{sen}Z} \quad (2.7)$$

Por su parte, para comparar la altitud asumida y la obtenida, para obtener la diferencia de altura, ΔH , se hace uso del hecho de que la línea de vista

al objeto celeste desde la posición asumida y la verdadera son esencialmente paralelas, y que por tanto es la diferencia en posición en la superficie de la tierra lo que causa esta diferencia de alturas, ver figura 2.9.

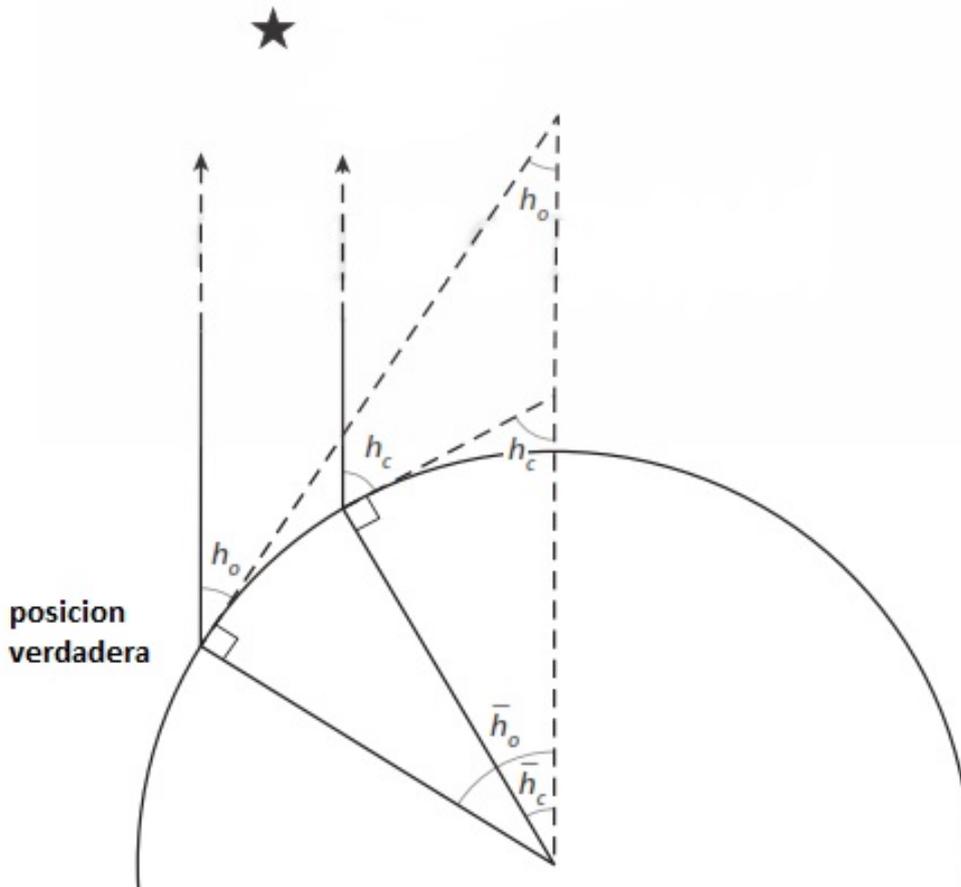


Figura 2.9: Método de St Hilaire. Una vez calculada la línea de posición, perpendicular a la línea de azimut, debemos desplazarnos una distancia en millas náuticas igual a la diferencia de alturas $\Delta H = h_c - h_o$ medida en minutos de arco por 60.

Si se calculan dos líneas de posición como las de la figura 2.7, asumiendo que no hay errores, la posición del observador estará en su intersección. Si hay tres líneas de posición, lo normal es que definan un triángulo, dentro del cual estará la posición del observador. Para calcular cierto número de líneas de posición, es necesario realizar observaciones casi simultáneas de cuerpos celestes distintos.

Cuanto más cerca están de la perpendicular las líneas de posición entre sí,

mayor será la precisión en el cálculo de la posición del observador. Cuando las estrellas están visibles, pueden seleccionarse las distintas estrellas para que se cumpla esta condición. No obstante durante el día, el Sol es normalmente el único cuerpo celestial disponible para las observaciones ⁶¹. En observaciones marítimas, lo normal es tomar dos observaciones a distintas horas del día. La primera línea se desplaza paralelamente a sí misma una distancia igual a la distancia recorrida entre observaciones, calculada a la estima, siendo la intersección con la segunda línea la posición estimada.

Saint-Hilaire también busca la línea de posición como Sumner, pero en lugar de estimar los tres lados del triángulo, estima dos lados y un ángulo. Saint-Hilaire utiliza la estimaciones para calcular una primera iteración de la latitud y la longitud del barco. La longitud estimada proporciona el ángulo del vértice en el polo celeste. La declinación solar del almanaque proporciona la longitud del lado que conecta el polo con la posición solar. La estimación de la latitud del barco proporciona el lado que une el polo con la posición estimada del barco. Conociendo estas tres partes, Saint-Hilaire calcula dos magnitudes, en lugar de una, como hace Sumner: el ángulo cenital y el lado que conecta la posición estimada del barco con la posición geográfica solar. El ángulo cenital es el ángulo del vértice en el barco, y mide la dirección del norte de la posición geográfica solar, vista desde el barco. El complemento del lado entre el barco y la posición geográfica del sol es la altitud del sol sobre el horizonte cuando se ve desde la posición estimada del barco.

La altura del sol se mide con el sextante y tras las correcciones habituales por paralaje, refracción, etc., se compara con la altitud calculada. La diferencia de alturas se emplea para corregir la estimación en la posición del barco. Si la altitud observada es mayor que la calculada, el observador está más cerca de la posición geográfica del sol de lo esperado, y la posición estimada se desplaza en dirección al sol una distancia de una milla náutica por cada minuto de arco de discrepancia entre las altitudes calculadas y observadas. Si la altitud observada es menor que la calculada, nos movemos en la dirección opuesta, alejándonos del sol. El nuevo punto está ahora a la distancia correcta del sol. Si el radio es pequeño, es decir el barco y la posición geográfica del sol están muy cerca, se dibuja un círculo de radio adecuado, igual al complemento de la altitud solar centrado en la posición geográfica solar. Este es el círculo de altitudes iguales. Si el radio es grande como suele ser habitual, una línea recta que pasa por la estimación mejorada de la posición del barco y es perpendicular a la dirección desde la estimación original de la posición del barco hasta la posición geográfica solar es la línea de posición. Dos o más

⁶¹En ciertas ocasiones la Luna, Venus y Júpiter son visibles durante el día y pueden utilizarse para calcular líneas de posición adicionales que corten a la del sol.

de estas líneas de posición proporcionan la posición del barco en el globo. En cambio, St Hilaire divide el triángulo oblicuo en dos triángulos rectos dejando caer una línea perpendicular desde el vértice en la posición geográfica del sol hasta el lado opuesto y utilizando las reglas de Napier para resolver triángulos esféricos rectos.

La clara ventaja del método de Marcq St Hilaire sobre los antiguos métodos de navegación por línea de posición reside en el hecho de que el método es aplicable independientemente del rumbo del objeto observado. En el método de Sumner, el navegante tiene que discriminar si el cuerpo observado está cerca del círculo vertical primario, puede trabajar su vista utilizando el llamado "método de la longitud"; pero si el cuerpo está cerca del meridiano, este método se cae, y la latitud por el método ex-meridiano puede ser utilizado en su lugar. Ahora bien, el menor de los usos del método de Marcq St Hilaire es su aplicación a la construcción de tablas de navegación simplificadas.

2.3.3. Los almanaques marinos en el siglo XIX

Durante el siglo XIX se alcanza el perfeccionamiento de los almanaques marítimos. El desarrollo de la cosmología y el mejor entendimiento del movimiento de los astros con el desarrollo de la cosmología física⁶², hizo posible la introducción de cálculos avanzados en los almanaques. Las respectivas oficinas siguen siendo responsables de publicar los almanaques, pero añaden a sus funciones investigar las teorías subyacentes y no limitarse únicamente a la astronomía descriptiva. Se discuten los casos británico, español y americano como los más significativos de este siglo, el británico por tradición y el español y el americano como casos contrapuestos de declive y de auge de las respectivas oficinas.

2.3.3.1. Reino Unido

En los primeros años del siglo XIX Gran Bretaña estaba en guerra con Francia. La paz del tratado de Amiens de 1802 volvió a romperse en la primavera y se reanudaron las hostilidades. Un año más tarde Napoleón se coronó emperador. El astrónomo real a cargo del observatorio real era John Pond, el sexto en el cargo. Uno de sus maestros fue William Wales, matemático a bordo del *H.M.S. Resolution* capitaneado por James Cook, donde había realizado numerosas observaciones de longitud con el cronómetro marítimo K1 de Larcum Kendall⁶³, durante la segunda circunavehación en 1772-1775.

⁶²Madrid Casado, 2018.

⁶³En 1765 Kendall fue uno de los seis expertos seleccionados por la Junta de Longitud para presenciar el funcionamiento del H-4 de John Harrison. Posteriormente, fue elegido

Aunque fue admitido en el Trinity College, Pond vivió durante algunos años de su juventud en España para recuperarse de su mala salud, y nunca llegó a graduarse⁶⁴. Pond mantuvo su interés en la astronomía y construyó varios telescopios en su residencias, detectando y publicando errores en los resultados de las observaciones de Greenwich. Sus observaciones ciertamente llamaron la atención del astrónomo real Maskelyne, que le propuso para sustituirle en el cargo⁶⁵.

Los instrumentos de medición de círculo completo se hicieron posibles y populares tras el desarrollo de la máquina divisora a finales del siglo XVIII. Maskelyne, el astrónomo real de la época, solicitó por primera vez un círculo mural para el Observatorio en 1792⁶⁶, donde antes hubo algunos sectores y un cuadrante mural⁶⁷. El interés se renovó a principios del siglo XIX cuando John Pond realizó mediciones desde su casa en Somerset demostrando la inexactitud del aparato actual del Observatorio.

Con ayuda de este instrumento, 2.10, se catalogó la ascensión recta de 36 estrellas importantes. Además se disolvió el *Board of Longitude* en 1828 por considerarse este problema ya resuelto, y sus archivos se transfirieron al Observatorio real.

En 1835 George Biddell Airy aceptó la posición de astrónomo Real tras la muerte de Pond. Airy era titular de la cátedra Lucasian, la misma que ocupó Isaac Newton.

En 1821, Alexis Bouvard había publicado unas tablas astronómicas de la órbita de Urano, en las que se hacían predicciones de las posiciones futuras basadas en las leyes del movimiento y la gravitación de Newton. Las observaciones posteriores revelaron desviaciones sustanciales respecto a las tablas, lo que llevó a Bouvard a plantear la hipótesis de algún cuerpo perturbador. John Couch Adams se enteró de estas irregularidades cuando aún era estudiante y se convenció de la hipótesis de la perturbación. Adams creyó que podía utilizar los datos observados sobre Urano y la ley de gravitación de Newton para deducir la masa, la posición y la órbita del cuerpo perturbador⁶⁸. El 13 de febrero de 1844, James Challis, director del Observatorio de Cambridge, se puso en contacto con el astrónomo real George Biddell Airy en

para hacer una copia del mismo, conocida como K1

⁶⁴Matthew et al. 2004.

⁶⁵Howse, 1989.

⁶⁶Un círculo mural es un telescopio montado en un marco circular que luego se monta en una pared alineada de norte a sur. El telescopio se sujeta al círculo y ambos pivotan en el centro del mismo, mientras que la circunferencia del círculo lleva una escala de 0 a 360 grados. Este instrumento permite al observador medir la altura angular de la estrella que está observando.

⁶⁷Laurie, 1960.

⁶⁸Smart, 1946.

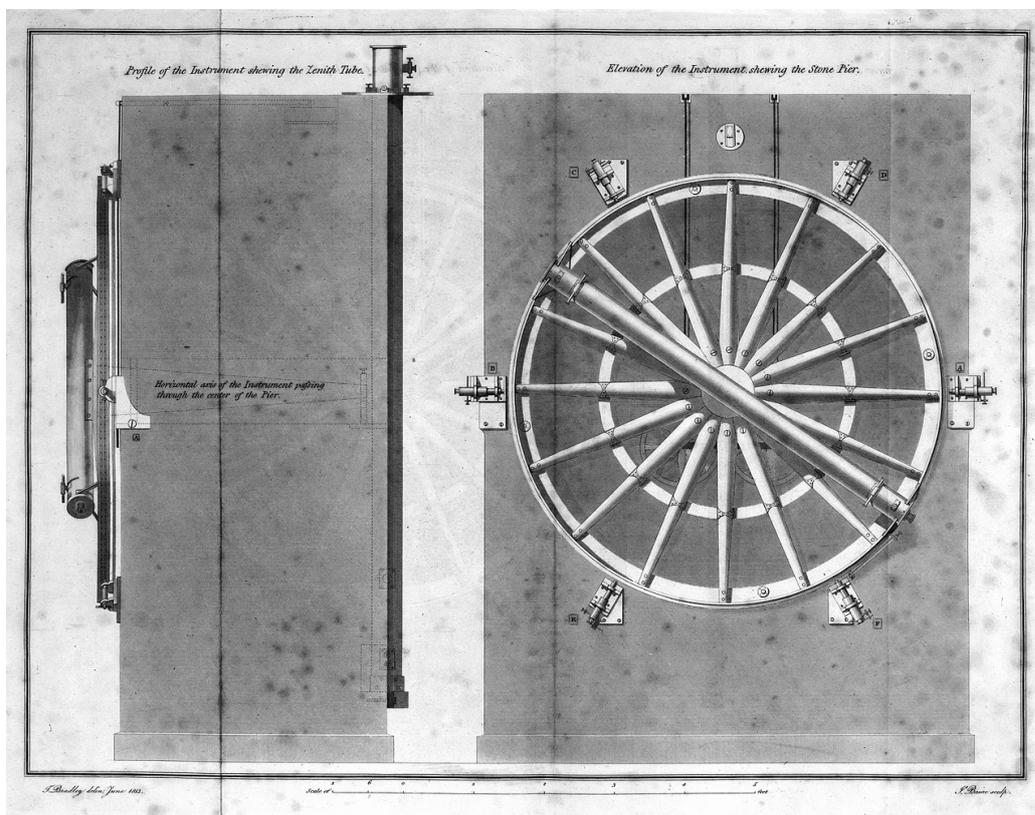


Figura 2.10: Este círculo mural de 2 metros se instaló por primera vez en el Observatorio en 1812. Este círculo mural, el primero del Observatorio, se encargó a Edward Troughton y se instaló poco después de que Pond se convirtiera en el sucesor de Maskelyne. El telescopio se sujeta al círculo tanto en el extremo del cristal del objeto como en el extremo del ojo. El cristal del objeto tiene una apertura de 102 mm (4 pulgadas). La longitud del tubo es la misma que el diámetro del círculo, 1,83m (6 pies). El soporte está formado por un círculo de 6 pies girado sobre un eje cónico. El círculo se leía con 6 micrómetros espaciados a intervalos alrededor del círculo.

el Observatorio Real de Greenwich y le pidió datos sobre la posición de Urano para Adams. Sin duda, Adams realizó algunos cálculos el 18 de septiembre de 1845. Mientras tanto, el 10 de noviembre de 1845, Urbain Le Verrier presentó a la Académie des sciences de París una memoria sobre Urano y demostró que la teoría preexistente no daba cuenta de su movimiento. Sin conocer el trabajo de Adams, intentó una investigación similar, y el 1 de junio de 1846, en una segunda memoria presentada en una reunión pública de la Académie, dio la posición, pero no la masa ni la órbita, del cuerpo perturbador pro-

puesto. Le Verrier situó a Neptuno a menos de un grado de su posición de descubrimiento. Al recibir en Inglaterra la noticia de la predicción de junio de Le Verrier, George Airy reconoció inmediatamente la similitud de las soluciones de Le Verrier y de Adams. Hasta ese momento, el trabajo de Adams había sido poco más que una curiosidad, pero la confirmación independiente de Le Verrier impulsó a Airy a organizar un intento secreto de encontrar el planeta. En una reunión de julio de 1846 de la Junta de Visitantes del Observatorio de Greenwich, con Challis y Sir John Herschel presentes, Airy sugirió que Challis buscara urgentemente el planeta con el telescopio ecuatorial de 11,25 pulgadas de Cambridge. La búsqueda se inició por un método laborioso el 29 de julio. Adams continuó trabajando en el problema, proporcionando al equipo británico seis soluciones en 1845 y 1846 que hicieron que Challis buscara en la parte equivocada del cielo. Sólo después de que se anunciara el descubrimiento de Neptuno en París y Berlín, se supo que Neptuno había sido observado el 8 y el 12 de agosto, pero como Challis carecía de un mapa estelar actualizado, no fue reconocido como planeta. Le Verrier no sabía que su confirmación pública de los cálculos privados de Adams había puesto en marcha una búsqueda británica del supuesto planeta. El 31 de agosto, Le Verrier presentó una tercera memoria, dando ahora la masa y la órbita del nuevo cuerpo. Al no haber tenido éxito en sus esfuerzos por interesar a ningún astrónomo francés en el problema, Le Verrier finalmente envió sus resultados por correo a Johann Gottfried Galle en el Observatorio de Berlín. Galle recibió la carta de Le Verrier el 23 de septiembre e inmediatamente se puso a trabajar en la observación de la región sugerida por Le Verrier. El estudiante de Galle, Heinrich Louis d'Arrest, sugirió que una carta del cielo recientemente dibujada, en la región de la ubicación predicha por Le Verrier, podría compararse con el cielo actual para buscar el desplazamiento característico de un planeta, en contraposición a una estrella estacionaria.

Neptuno fue descubierto justo después de la medianoche, tras menos de una hora de búsqueda y a menos de 1 grado de la posición que había predicho Le Verrier, una coincidencia notable. El telescopio del descubrimiento era un refractor acromático de montaje ecuatorial de la empresa Merz und Mahler de Joseph Fraunhofer⁶⁹.

La responsabilidad de crear el almanaque marítimo se transfirió a una oficina especializada, la *Nautical Almanac Office* con sede en Londres⁷⁰. Se reformó el almanaque introduciendo las tablas lunares del astrónomo danés Andreas Hansen y las tablas solares y planetarias de Le Verrier. Posteriormente se dividió el almanaque en dos partes, la parte I para la navegación

⁶⁹Smith, 1989.

⁷⁰Ratcliff, 2015, p. 13.

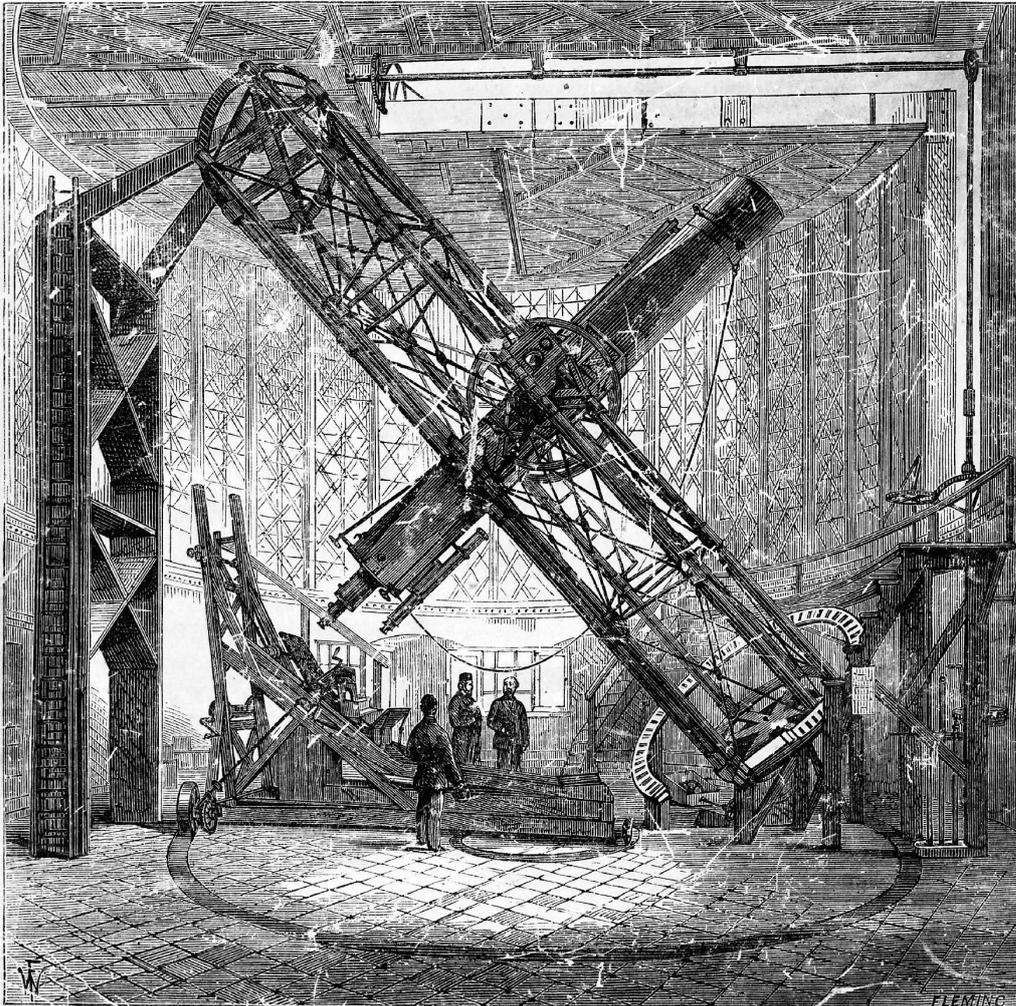


Figura 2.11: Gran telescopio ecuatorial en su cúpula del Royal Observatory Greenwich. El fallo de los astrónomos ingleses en descubrir el planeta Neptuno en 1846 demostró la necesidad de instalar un instrumento mas moderno. A diferencia de los telescopios fijos de otras partes del Observatorio, el Gran Telescopio Ecuatorial puede girar de este a oeste para mantenerse en movimiento en sincronía con las estrellas. Está alineado con el eje de la Tierra y se mueve en paralelo al ecuador celeste, de ahí su nombre.

en el mar, la parte II mucho más extensa, con la precisión requerida por los astrónomos. A partir de 1907 se suprimió la sección que permitía calcular la longitud mediante el método de las distancias lunares, por considerarse que la longitud podía medirse con la suficiente precisión mediante cronómetros

marinos⁷¹.

2.3.3.2. España

Los marinos españoles del siglo XVIII dependían principalmente de las publicaciones de Inglaterra y Francia. Cada una de ellas estaba referenciada a su propio meridiano, distintos del Observatorio de Cádiz, origen de nuestra cartografía. Mediante resolución real de Carlos IV en 1790, se ordenó la publicación de efemérides astronómicas referenciadas al meridiano de Cádiz.

Así, entre las misiones primigenias del Observatorio Real de Cádiz, fundado por Jorge Juan, estuvo el proporcionar efemérides precisas para uso de los navegantes. El *Almanaque Náutico y Efemérides Astronómicas* españolas se publica por primera vez como documento separado en 1791, continuándose su publicación sin interrupción desde entonces.

Durante el siglo XIX, se distinguen dos épocas fundamentales⁷²:

- Desde 1792 a 1854, se publica como *Almanaque Náutico y Efemérides Astronómicas*, conteniendo información tanto para navegación como puramente astronómica.
- Desde 1855 a 1911, donde se denomina *Almanaque Náutico* con más énfasis en la navegación y mayor número de posiciones aparentes de estrellas. A partir de 1905 se suprimen las distancias lunares, como ocurrió en Estados Unidos.

El almanaque español seguía la estructura del inglés. En las efemérides se incluían las posiciones del Sol, cada mediodía, y de la Luna, cada 12 horas y de su declinación cada 6 horas. Los lugres de los planetas Venus, Marte, Júpiter y Saturno cada 5 días, Mercurio cada 3 días y Herschel cada 10 días. Neptuno no era observable sin telescopio y no se descubrió hasta 1846. Las distancias lunares al Sol y a nueve estrellas brillantes se dan cada 9 horas⁷³.

Como calculadores se propone que, aunque sería ideal que fuesen astrónomos, no parece conveniente, pues se consideró que un astrónomo formado acabaría por desdeñar un trabajo rutinario que nada nuevo le podría aportar. Tampoco, a su juicio, sería propio de un oficial instruido. Debe buscarse, pues, a «sujetos que, con sólo ligeras nociones de astronomía, presenten gran soltura en el cálculo y conocimiento de las matemáticas»⁷⁴. A dichos sujetos, que deberían ser cuatro, del Cuerpo de Brigadas de Artillería de Marina o del

⁷¹Seidelmann y Hohenkerk, 2020, p. 181.

⁷²Coira y Moratalla, 2004.

⁷³Lafuente García y Sellés García, 1988.

⁷⁴Lafuente García y Sellés García, 1988.

de Pilotos, se les darían las lecciones convenientes para completar su formación astronómica hasta el grado que se estimase necesario. De este modo, poco a poco los oficiales irían descargando en ellos sus tareas, hasta acabar por cederles la totalidad del trabajo⁷⁵. Cabe contrastar esta baja consideración por los calculadores españoles con la posición de los calculadores americanos, todos ellos civiles, por ejemplo Gould, Newcomb o Mitchell, todos ellos llegarían a ser famosos astrónomos, o Wright que sería un famoso matemático y filósofo⁷⁶.

En 1794 todo ya todo se calcula directamente, salvo las distancias lunares. El meridiano de referencia se cambió en 1801 con el cambio del observatorio de Cádiz a la Isla del León. La situación de la Oficina a comienzos de la segunda década del siglo XIX era desesperada y, probablemente, hubiese desaparecido de no ser por la llegada a Cádiz de algunos matemáticos huyendo de los franceses, que colaboraron temporalmente como calculadores.

Tras la guerra de independencia, se iniciaron gestiones para adquirir nuevos instrumentos, encomendándose a José Cayetano Bernales la tarea de efectuar los contactos y cerrar un trato con el fabricante de instrumentos Troughton y administrar los recursos que el artesano fuese exigiendo por anticipado. Bernales informaba que habría que buscar otro artesano que tuviese menos encargos y recomendaba a Thomas Jones, acreditado discípulo de Troughton, que prometía concluir el círculo en dos años. La propuesta fue aceptada en abril de 1819, siendo preciso comenzar las obras del muro que acogería el instrumento. Sin embargo Bernales se arruinó y el presupuesto asignado al proyecto se perdió.

Entre 1830 y 1843 se adquirieron un círculo mural, un anteojo de pasos y un péndulo magistral, fabricados por el mencionado Thomas Jones, y que fueron la base para mantener el meridiano de san Fernando hasta 1907 como la referencia para la cartografía náutica en España.

Hasta 1864 no se dispuso en España de un círculo meridiano similar al de Airy, fabricado por Troughton⁷⁷, instrumento que requirió para su instalación de una remodelación completa del edificio de observaciones. El círculo meridiano comenzó a utilizarse de forma sistemática a partir de 1870 para las observaciones meridianas del almanaque náutico español que determinaban la ascensión recta y la declinación de unos 200 objetos estelares. Este instrumento fue el principal para la astronomía meridiana hasta 1953, cuando fue sustituido por un círculo meridiano Grubb Parsons⁷⁸.

⁷⁵Lafuente García y Sellés García, 1988, p. 375.

⁷⁶Seidelmann y Hohenkerk, 2020, p. 184.

⁷⁷González González, 2004.

⁷⁸El Airy de Greenwich estuvo en servicio hasta 1933

2.3.3.3. Estados Unidos

La creación del almanaque náutico americano en 1849 tuvo sus propios condicionantes. Una primera pregunta, igual que en el caso español, es por qué los americanos requerían su propio almanaque cuando los ingleses lo estaban publicando desde 1767. El superintendente del observatorio naval, Maury, con el apoyo del secretario de la marina, Mason, fueron los principales impulsores de su creación, por razones basadas en patriotismo y reducir su dependencia del extranjero.

La oficina del almanaque náutico se creó como una entidad separada del observatorio nacional, e incluso se situó en Cambridge, cuando el observatorio estaba en Washinton DC. Se esgrimió como razón que el trabajo matemático de la oficina difería del del observatorio, necesitando datos experimentales del mismo pero no su presencia física en el observatorio. Uno de los primeros elementos que hubo que decidir fue la cuestión del meridiano de referencia. la idea de un meridiano americano fue apoyada por los principales científicos norteamericanos de la época, Bach, Joseph Henry e incluso el propio Maury. El Congreso en 1850 adoptó una solución de compromiso. Se adoptó un meridiano americano que pasaba por Washington para astronomía y geografía, mientras que para navegación de mantuvo la referencia de Greenwich. Como resultado el almanaque norteamericano tenía una forma peculiar, con un aparte dedicada a los astrónomos y otra a los navegantes. Las efemérides para el meridiano de Greenwich daban las efemérides para el Sol, la Luna y los planetas, junto con las distancias lunares. Las efemérides para el meridiano de Washington daban la posición de las estrellas brillantes principales, el Sol, la Luna, los planetas mayores y otros fenómenos como eclipses, ocultaciones o el movimiento de los satélites de Júpiter.

El primer director fue el teniente Davis, cuya visión era avanzar en lo que era el principal objetivo de la astronomía, investigar las teorías subyacentes y no limitarse únicamente a la astronomía descriptiva. Era pues entendida como una actividad que debía contribuir al desarrollo de la astronomía y no meramente limitarse a ser una herramienta para la navegación, compensando así a los calculadores por su labor ingrata ⁷⁹. Así por ejemplo una de las primeras actividades a las que se dedicaron cuatro calculadores fue obtener unas nuevas tablas para el planeta Mercurio basadas en la nueva teoría de Le Verrier. Davis quería no sólo producir un almanaque sino revisar las teorías de los planetas en los que estaba basado, incluido el recientemente descubierto Neptuno. En 1852 había 12 calculadores trabajando, incluyendo

⁷⁹A largo plazo los marinos acabaron por desvincularse de las preocupaciones de los astrónomos de posición y se atuvieron a procedimientos más practicables (Sellés García, 2000, p. 29).

el matemático de Harvard Perice o la astrónoma Maria Mitchell, ver figura 2.12. Cada calculador se encargaba de una parte específica del trabajo, y los salarios anuales oscilaban de 300 (el sueldo anual de un jornalero en el campo) a 1500 dólares americanos dependiendo de su experiencia. Algunos de los calculadores se convertirían en astrónomos famosos, como Gould, Newcomb y Mitchell, otros como Wright fueron renombrados filósofos y matemáticos, y otros como Winlock llegarían a ser directores de la oficina.



Figura 2.12: Maria Mitchell, astrónoma estadounidense y pionera de los derechos de la mujer, representada aquí en un retrato de H. Dassell de 1851. En 1848, la Academia Americana de las Artes y las Ciencias la eligió como primera mujer miembro. La Asociación para el Avance de la Ciencia hizo lo mismo en 1850. En 1849, la Oficina del Almanaque Náutico de EE.UU. le ofreció un puesto de trabajo como calculadora de tablas de posiciones del planeta Venus.

La oficina americana redujo los errores de la posición lunar que acarrea el almanaque británico, y por extensión el español, francés o alemán, que empleaban las tablas británicas. En términos prácticos, esto suponía de 15 a 20 millas náuticas de error en la determinación de la longitud en el mar. La primera edición se publicó en 1853.

Con la llegada de la guerra civil americana, varios miembros de la plantilla se pasaron al bando sudista y Newcomb se hizo cargo de la oficina. Los calculadores realizaban el trabajo desde su casa, mientras que los ocupantes

permanentes eran Newcomb y dos ayudantes.

Newcomb se planteó reformar completamente el sistema teórico y las bases de cálculo de las efemérides. Su trabajo se extiende desde el estudio del tránsito de Mercurio y Venus, la velocidad de la luz, la constante de nutación, el movimiento lunar y en general la revisión de las constantes astronómicas, elementos de las órbitas planetarias y la producción de tablas de la Luna, el Sol, y los planetas basadas en los nuevos datos. Todo ello con fondos del gobierno norteamericano, a pesar de que la mayoría de los estudios no tenían aplicación práctica inmediata.

Newcomb empleó el método basado en la Mecánica celeste de Laplace, especialmente el tercer volumen, que concibió obtener expresiones algebraicas para la posición de los planetas en cualquier instante, dada su longitud, latitud y radio vector como una función del tiempo. Este método requería conocer seis de los siete elementos orbitales, que debían obtenerse de las observaciones. Incluso cuando estos elementos estaban determinados, la órbita no se obtiene como una expresión algebraica cerrada, sino como una serie infinita de términos matemáticos.

Este método fue empleado por Delauney en París, y Hansen en Gotha, en el estudio de la Luna. Lindenau y Bouvard crearon tablas que fueron utilizadas durante la primera mitad del XIX, y Le Verrier llevó a cabo la reconstrucción de las tablas planetarias. Winlock completó las tablas para Mercurio y Hill, también de la oficina americana, llevó a cabo las de Venus. Winlock pretendió en todo momento uniformizar el cálculo de las efemérides de los astros. Su ayudante Hill se centró en las matemáticas que describen el problema de los tres cuerpos y después estudió la perturbación ejercida por los planetas Júpiter y Saturno en la órbita de la Luna alrededor de la Tierra. Esta tarea era especialmente compleja, el estudio del movimiento de Júpiter y Saturno, que debido a sus grandes masas y relativa proximidad causaban mayores perturbaciones que en el caso de otros planetas.

El patrocinio por parte de la Marina y el Gobierno norteamericano de todo este trabajo es en gran medida sorprendente y digno de admiración, debido al poco valor que tenía para aplicaciones prácticas inmediatas. Además Winlock reconocía que las tablas existentes no eran inadecuadas para los requisitos de navegación, excepto quizás las de la Luna.

Newcomb publicó en 1895 sus resultados bajo el título *The Elements of the Four Inner Planets and the Fundamental Constants of Astronomy*⁸⁰, que se completó en 1899 añadiendo las tablas correspondientes a Urano y Neptuno.

⁸⁰Newcomb, 1895.

2.3.4. La cooperación internacional

En 1896 ocurrió un hecho significativo. La conferencia astronómica de París de 1896. El director de la oficina británica, Arthur Downing, fue uno de los principales instigadores de esta conferencia, que se convocó el lunes 18 de mayo de 1896 en el Palais de l'Institut, Salle des seances del Bureau des longitudes. La conferencia se ocupó principalmente del cálculo de los lugares aparentes de las estrellas y de la necesidad de establecer un estándar internacional para las constantes astronómicas. Sin embargo, se aprovechó la presencia simultánea de los directores de la mayoría de las efemérides nacionales y de los directores de los principales observatorios nacionales para dar a la conferencia un alcance más amplio.

La conferencia recomendó la introducción del valor de Newcomb de las constantes de precesión y aberración. También recomendaron que los cambios en las constantes astronómicas entraran en vigor a partir del año 1901. Así, el cambio y la unificación comenzaron con el siglo XX.

Las teorías de Newcomb para los planetas interiores se utilizaron durante casi un siglo, hasta que fueron superadas por las efemérides generadas con las modernas técnicas de integración del Jet Propulsion Laboratory en el Almanaque Astronómico de 1984.

2.3.5. Establecimiento del meridiano de Greenwich como referencia universal

Durante siglos, astrónomos y geógrafos emplearon primeros meridianos diferentes según su época o su país. Ptolomeo utilizó un meridiano situado medio grado al oeste de Canarias. Siglos después, los árabes prefirieron hacer pasar su primer meridiano por el Estrecho de Gibraltar. Durante el siglo XIII, época de Alfonso X el Sabio y de las conocidas Tablas Alfonsinas, el meridiano de origen para astrónomos y navegantes fue el de Toledo.

Al inicio de la Edad Moderna, los enfrentamientos entre portugueses y españoles por cuestiones territoriales, derivadas de las grandes navegaciones y descubrimientos de la época, llevaron al establecimiento de la llamada línea de demarcación, que fue utilizada en la práctica como un verdadero meridiano cero. La necesidad de precisión en la determinación de la longitud de las tierras del Mar Océano al oeste de Europa fue enfatizada por la bula del Papa Alejandro VI de 1493 que establecía la línea de demarcación entre los descubrimientos españoles y portugueses a 100 leguas al oeste de las Azores y las Islas de Cabo Verde. Tras las protestas de Portugal, se desplazó de acuerdo con las disposiciones del Tratado de Tordesillas entre España y Portugal a un meridiano de 370 grados al oeste de las islas de Cabo Verde.

Ya a mediados de siglo XVI, Mercator había abandonado el primer meridiano ptolemaico en favor de un meridiano basado en el punto en el que la brújula no mostraba ninguna variación. Esta línea no estaba ciertamente establecida. En el mapa de Europa de Mercator de 1554, el primer meridiano sigue estando situado en la isla de Hierro.

Muchos cartógrafos hicieron pasar el nuevo meridiano principal por las Azores, como hizo Hondius en su globo terráqueo de 1601, "porque allí la aguja de la brújula apunta al norte", como anotó en una inscripción del globo.

Los franceses, un siglo más tarde, comenzaron a elaborar sus cartas náuticas respecto al meridiano que pasa por la parte más occidental de la Isla de El Hierro, un meridiano que, con los cálculos de la época, estaba situado exactamente a 20 grados al oeste del que pasa por el Observatorio de París⁸¹. De esta forma, sin ser el Meridiano Cero, París se convertía en el verdadero meridiano de referencia.

Mientras tanto, a partir de 1675, los británicos hicieron pasar su primer meridiano por el recién creado Observatorio Real de Greenwich. En la segunda mitad del siglo XVIII, España decidió seguir el ejemplo británico y comenzó a establecer su primer meridiano en Cádiz, donde había sido fundado el Real Observatorio de la Marina en 1753⁸².

Durante el siglo XVIII, cada nación continuó utilizando su propio meridiano para cuestiones geográficas y para los mapas terrestres. En lo que se refiere a la navegación, el auge del comercio internacional y la influencia de la armada británica hizo que el Meridiano de Greenwich fuese pronto el más utilizado en las cartas náuticas de todo el mundo, siendo preferido porque a él estaban referidas las efemérides astronómicas publicadas en Gran Bretaña, que eran usadas en sus cálculos por gran parte de los navegantes de todo el mundo.

No obstante, otros países con tradición marítima, como España, Portugal o Francia, continuaron utilizando en su cartografía náutica los meridianos de sus observatorios de referencia. En el caso concreto de España, durante todo el siglo XIX los meridianos de origen usados por los marinos serían el Meridiano de Cádiz y más adelante el de San Fernando.

Cada país utilizaba su propio meridiano como referencia hasta la Conferencia Internacional en Washington en Octubre de 1884. El meridiano que atraviesa el telescopio Airy en Greenwich fue adoptado como el meridiano inicial para la longitud. La longitud se medía en dos direcciones hasta 180 grados, la longitud hacia el este siendo positiva y hacia el oeste negativa.

⁸¹Washburn, 1982.

⁸²González González, 2017.

Diez años más tarde, España, al igual que otros países europeos, aún no se había decidido a llevar a cabo unas reformas cuyos representantes habían aceptado en la Conferencia de Washington. Tampoco se había adoptado en nuestro país el sistema de los husos horarios según el cual España quedaba incluida, para el cómputo de las horas locales, en la llamada Hora de Greenwich.

En los últimos años del siglo XIX todavía era considerada en España la hora oficial como aquella correspondiente al meridiano de cada localidad, es decir, no había una hora oficial común para todo el territorio nacional que pudiese ser utilizada como hora local española. Únicamente los ferrocarriles tenían unificados sus horarios según la hora del Meridiano de Madrid. No sería hasta 1901 cuando se decidiese definitivamente el establecimiento de la hora oficial española de acuerdo con la del Meridiano de Greenwich. Unos años más tarde, en abril de 1907, se adoptó el Meridiano de Greenwich como primer meridiano para usos navales. Poco después, el Ministro de Marina ordenó a la Dirección de Hidrografía que todas las cartas náuticas grabadas a partir de entonces utilizasen el Meridiano de Greenwich como origen de longitudes. Esta misma disposición oficial ordenó que el Almanaque Náutico para 1910 fuese calculado utilizando Greenwich, y no San Fernando, como meridiano de referencia, y que los cronómetros de la Armada fueran arreglados a la hora del Meridiano de Greenwich.

La declinación y la ascensión recta dan la posición de una estrella de la misma manera que la latitud y la longitud dan la posición de un lugar en la Tierra. Los círculos de tránsito son instrumentos de precisión diseñados específicamente para medir estas dos coordenadas. También pueden utilizarse, y generalmente se utilizan, para determinar la hora local. El Círculo de Tránsito de Airy (ATC) lleva el nombre de su diseñador, George Airy, el séptimo Astrónomo Real. Ransomes y May, de Ipswich, se encargaron de la ingeniería y Troughton y Simms, de Londres, de la óptica. El instrumento, al igual que los que sustituyó, estaba montado para moverse sólo en el plano del meridiano. El tubo del telescopio, de casi tres metros de longitud, se apoya en dos enormes pilares de piedra, uno al este y otro al oeste. La primera observación publicada se realizó en 1851 y la última en 1954.

Cuando el Círculo de Tránsito de Airy entró en funcionamiento en 1851, redefinió el Meridiano de Greenwich y posteriormente llegó a definir también el Primer Meridiano del Mundo. Se utilizó para determinar la hora media de Greenwich hasta 1927. La hora media de Greenwich se convirtió en hora legal en Gran Bretaña en 1880 y se adoptó en principio como base de la hora universal en 1884, cuando, en la Conferencia Internacional del Meridiano en Washington, se acordó que el día universal "...debe comenzar para todo el mundo en el momento de la medianoche media del Primer Meridiano

inicial”⁸³.

Algunas de las estrellas más brillantes, cuyas posiciones se habían afinado mediante observaciones repetidas durante un largo periodo de tiempo, se utilizaban como estrellas reloj para determinar los errores del reloj de tránsito y, por tanto, la hora real sobre el terreno. Esto se hacía comparando los tiempos de tránsito observados con los teóricos. En 1851, se mantuvieron bajo observación unas 67 estrellas de reloj para este fin. El reloj, que había sido fabricado unos años antes por William Hardy, estaba regulado en tiempo sideral. A partir de este reloj se determinó finalmente la hora solar media de Greenwich, es decir, la hora media de Greenwich.

El meridiano del Círculo de Tránsito de Airy, al igual que el de los anteriores instrumentos de tránsito de Greenwich, se estableció a partir de las observaciones de las estrellas circumpolares - estrellas que nunca salen ni se ponen. stas estrellas están siempre presentes en el cielo y transitan por el meridiano dos veces en lugar de una cada día. Cuando el telescopio está correctamente alineado, el intervalo medido entre los tránsitos sucesivos de cualquier estrella circumpolar es constante. El intervalo entre tránsitos sucesivos del Sol es unos cuatro minutos más largo que el intervalo entre tránsitos similares de otras estrellas. Esto se debe a que, al mismo tiempo que la Tierra gira sobre su eje, también orbita alrededor del Sol, avanzando aproximadamente 1° alrededor de su órbita con cada vuelta completa. Por lo tanto, entre un tránsito del Sol -al mediodía- y el siguiente, la Tierra tiene que girar un ángulo de unos 361° en lugar de los 360° necesarios para las demás estrellas, lo que explica los 4 minutos adicionales ⁸⁴.

Debido a que la relación entre los meridianos locales en países distantes y Greenwich no podía determinarse con precisión, muchos países continuaron empleando su propio meridiano para las posiciones geográficas y el meridiano

⁸³Todas las estrellas se mueven por el cielo de forma similar al Sol y, al igual que éste, culminan, o alcanzan su punto más alto, cuando transitan, o cruzan, el meridiano. Como la Tierra gira a un ritmo constante, cada estrella cruza el meridiano del telescopio a la misma hora cada día. Siempre que un instrumento de tránsito estuviera alineado con precisión con el meridiano, la ascensión recta de una estrella podía obtenerse directamente a partir del momento del tránsito. Se registraba como un tiempo, o ángulo horario, en lugar de en grados. La declinación se calculaba a partir de la medición de lo que los astrónomos denominan distancia cenital (ZD), es decir, el ángulo entre la estrella, el observador y el cenit, el punto verticalmente elevado.

⁸⁴El tiempo medido por las estrellas se llama tiempo sidéreo. El tiempo medido por el Sol se llama tiempo solar. La cantidad extra que la Tierra tiene que girar varía muy ligeramente de un día a otro como resultado tanto de la órbita elíptica de la Tierra como de la inclinación de su eje. El intervalo exacto entre los sucesivos tránsitos del Sol varía de forma periódica a lo largo del año; el más largo es unos 51 segundos mayor que el más corto, siendo la duración media de 24 horas solares medias. Debido a esta variación en la duración del día natural, la hora "media" se utiliza para fines civiles.

de Greenwich para la navegación. Con el paso de los años con mejor determinación de las distancias y la cooperación internacional, el meridiano de Greenwich fue adaptado como la referencia internacional para las longitudes y escalas temporales.



Figura 2.13: En 1884 se celebró en Washington la Conferencia Internacional del Meridiano, con representantes de 25 países. En ella se estableció de forma oficial que fuese Greenwich el lugar del meridiano primario. Por parte de España asistieron Juan Valera, como jefe de la delegación y los oficiales navales Emilio Ruiz del Arbol y Juan Pastorin. Fuente AP.

En contraste con la latitud, el establecimiento de una referencia para la longitud fue una decisión política. Desde 1884, el meridiano de Greenwich fue aceptado como una referencia universal, y se ha mantenido hasta la actualidad siendo confirmado por los modernos sistemas de navegación por satélite⁸⁵. La elección de Greenwich se decidió en el congreso de 1884 en Washington, donde representantes científicos se amalgamaron con miembros de los

⁸⁵En 1891 Chandler descubrió la variación de las latitudes geográficas de los observatorios astronómicos, que se debe al movimiento del eje de rotación terrestre con respecto a la superficie de la Tierra, tal y como Euler había predicho.. Además desde 1984 la localización

distintos cuerpos diplomáticos, y siendo invitados sólo países que mantenían buenas relaciones con Estados Unidos, por lo que el resultado final parecía ya condicionado . Mientras los franceses defendieron una localización neutral, como el Hierro, los ingleses apostaron por un meridiano que atravesase un observatorio nacional consolidado. Hay que destacar que en 1884 sólo Gran Bretaña, Estados Unidos y Canadá se regían por el meridiano de Greenwich. La postura española en el congreso abogó finalmente por el meridiano de Greenwich como solución de compromiso siempre que Inglaterra y los Estados Unidos acepten por su parte el sistema métrico”⁸⁶.

del meridiano de Greenwich se ha movido al cambiarse desde coordenadas astronómicas a coordenadas geodésicas. Un receptor GPS situado en el telescopio Airy indicaría una posición 102 metros al este.

⁸⁶Doble Gutiérrez, 2008.

Capítulo 3

Primera parte del siglo XX: la navegación aérea

El 17 de diciembre de 1903, Orville y Wilbur Wright culminaron cuatro años de investigación y esfuerzos de diseño con un vuelo de 35 metros y 12 segundos en Kitty Hawk, Carolina del Norte, el primer vuelo con motor en una máquina más pesada que el aire. Antes de eso, la gente sólo había volado en globos y planeadores. La primera persona que voló como pasajero fue Leon Delagrange, que partió con el piloto francés Henri Farman desde un prado a las afueras de París en 1908. La llegada de la aviación supuso una auténtica revolución en los métodos e instrumental de navegación. Las grandes velocidades y los progresivamente mayores alcances supusieron un reto para los navegantes. Se modificaron ingeniosamente los sextantes marinos para su uso aeronáutico. En paralelo se desarrolló la radionavegación, a partir de la telegrafía sin hilos inventada por Marconi en 1895, para crear auténticas macroestructuras intangibles que se extendían a lo largo del océano y que permitían guiar a los aviones con precisión. La navegación autónoma, principalmente inercial y doppler, se desarrolló durante la primera parte del siglo XX.

3.1. Navegación marítima a principios de siglo

La práctica de la navegación marítima en 1900 no era muy diferente de la de 1800, con algunas mejoras. Se utilizaba el mismo sextante con la división del limbo tipo vernier, ver figura 3.1, con desarrollos moderados. Existían tablas de cálculo más precisas y en general había una comprensión más clara del método de la línea de posición. A principios de este siglo se utilizaban en

los barcos más grandes el mencionado sextante de nonio y de modo estándar tres cronómetros, cuidadosamente comparados. Además se empleaban a bordo relojes con dos husos horarios, que daban la hora media de Greenwich por lectura directa. Los almanaques náuticos utilizaban el tiempo astronómico y seguían incluyendo la información relativa a las distancias lunares. La obra *American Practical Navigator*, de Bowditch, era una referencia estándar, si bien incluía tablas de ya más de un siglo de antigüedad.

Durante el comienzo del pasado siglo XX, la aplicación de los principios electrónicos y en concreto la radio a las necesidades del marino, dió lugar a cambios rápidos y significativos en el arte de la navegación práctica. La radio permitió mejoras aún más significativas en la navegación marítima, bien por la difusión electromagnética de las señales horarias, bien por técnicas de radio localización llamadas *radiogoniometría*⁸⁷.

La difusión electromagnética de la señal horaria, utilizada por primera vez en 1903⁸⁸, mejoró el cronometraje de las observaciones. Progresivamente los tres cronómetros de abordo se redujeron a uno y éste se utilizaba normalmente sólo como comprobación, ya que el reloj de navegación se corregía mediante las señales horarias de radio y se ajustaba al segundo exacto de la hora media de Greenwich. El cronometraje de las observaciones podía considerarse entonces como un problema totalmente resuelto.

La radiogoniometría, introducida en 1911, ayudaba al navegante, sobre todo en las cercanías de la costa con mal tiempo⁸⁹.

⁸⁷Cotter, 1968.

⁸⁸Guglielmo Marconi suele ser reconocido como el inventor de la radio, con una impresionante lista de logros. En 1895 utilizó un transmisor de chispa para enviar señales de radio a una distancia de más de una milla. En 1899, Marconi ya había transmitido señales a través del Canal de la Mancha y en 1901, a través del Océano Atlántico. Ya en 1898, un fabricante de instrumentos ópticos e inventor llamado Sir Howard Grubb se dirigió a la *Royal Dublin Society* y propuso el concepto de un reloj controlado por radio. La primera señal horaria por radio, enviada por código telegráfico, fue emitida en septiembre de 1903 por la Marina de los Estados Unidos. La mayoría de las fuentes mencionan Navesink, Nueva Jersey, como el lugar de esta emisión, pero el reloj de referencia se encontraba en el Observatorio Naval de los Estados Unidos en Washington DC. Las primeras emisiones regulares de la hora comenzaron el 9 de agosto de 1904 desde el Astillero Naval de Boston. Sin embargo quizás la más conocida de las primeras estaciones de señales horarias estaba en París, operada por la Oficina Francesa de la Longitud, que lanzaba sus señales desde lo alto de la Torre Eiffel. La Torre Eiffel, hoy uno de los monumentos más famosos del mundo, habría sido probablemente demolida por su falta de apoyo popular si no hubiera demostrado su utilidad como torre de radio.

⁸⁹Los futuros sistemas de navegación hiperbólica, que se introdujeron progresivamente, como el Decca Navigator, el Consol y el Loran, permitieron al navegante fijar la posición del buque cuando está fuera de la vista de tierra con una precisión previamente imposible. Los sistemas de navegación inercial y doppler también se desarrollaron en los años setenta para complementar los sistemas de radioayuda.



Figura 3.1: Sextante de vernier, diseñado por Jesse Ramsden, donde puede apreciarse el tornillo tangente y la escala vernier. Colección de la Brown University, Rhode Island, EEUU.

3.2. La llegada de la aviación

El Flyer I de los hermanos Wright, ver figura 3.2 fue la primera aeronave capaz de vuelo sostenido siendo más pesada que el aire, despegando el 17 de Diciembre de 1903 desde Kitty Hawk, Carolina del Norte. En las primeras etapas de la aviación, el esfuerzo del piloto estaba centrado en los problemas de despegue, mantener el avión en el aire y aterrizar. Con el desarrollo de la aerodinámica, la mejora de las estructuras de los aviones y el desarrollo de los motores refrigerados por aire, el avión se vuelve más seguro de operar y el piloto puede dedicar mas tiempo al problema de la navegación,⁹⁰.

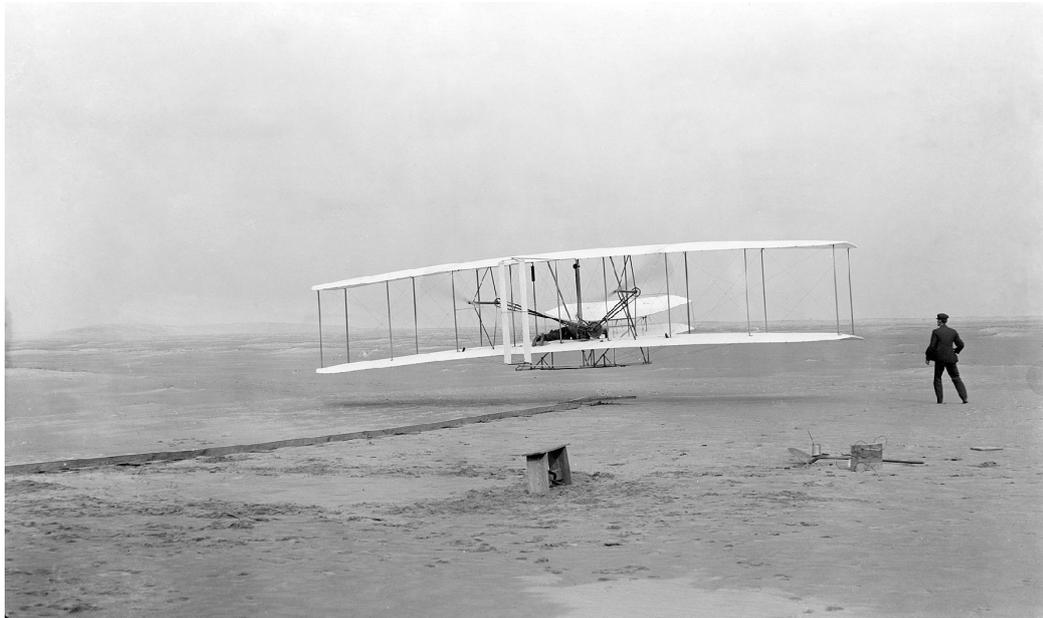


Figura 3.2: El Flyer se basó en la experiencia de los Wright en las pruebas de planeadores en Kitty Hawk entre 1900 y 1902. Su último planeador, el Glider de 1902, condujo directamente al diseño del Wright Flyer. El Wright Flyer tenía una configuración de biplano canard, con una envergadura de 12,29 m, una superficie alar de 47 m² y una longitud de 6,43 m. Los Wright construyeron el avión en 1903 utilizando madera de abeto y fresno para la estructura. El motor era un ligero motor de gasolina de 12 caballos (9 kilovatios), que pesaba 82 kg, con un depósito de combustible de 3,8 l. Una transmisión por cadena accionaba dos hélices que giraban en direcciones opuestas.

Rápidamente se notó que los métodos existentes para el mar, aunque

⁹⁰Quizás más correctamente debería ser denominada como *avigation*, de *avis*, pájaro y *agere*, mover o dirigir

correctos en principio, eran demasiado lentos para poder utilizarse en el aire⁹¹. En el aire conociendo la deriva del viento, era posible la navegación por estima⁹², aunque sólo era válida para distancias pequeñas.

Los principales métodos de navegación desarrollados para la aviación a principios del siglo XX fueron la navegación por radioayudas y por métodos celestes⁹³. En la navegación por radioayudas, o radiogoniometría, el avión determina su posición por medio de líneas de posición determinadas por las características direccionales de las ondas de radio. La navegación celestial, como en el caso marítimo, es el arte de determinar la posición por medio de la observación de los astros, el Sol, la luna, los planetas y ciertas estrellas. En condiciones de baja visibilidad, niebla o nubes espesas, únicamente la navegación por radioayudas era viable.

La proyección mercator era la preferida por los marinos en las latitudes medias, pero provoca grandes distorsiones a altas latitudes, haciendo que por ejemplo Groenlandia aparezca del tamaño de África. Los navegadores aéreos evitaban la proyección Mercator, por las grandes distorsiones que provocan cuando volaban cerca del polo norte. Las proyecciones Mercator del ejército empleaban una línea de longitud local destinada a minimizar las distorsiones en el área local, lo que permitía emplear una rejilla basada en el sistema métrico directamente sobre el mapa para calcular las distancias.

A medida que los métodos de navegación marina se racionalizaban para la navegación aérea, las innovaciones fueron adoptadas posteriormente por los marineros. Así, podría afirmarse que a partir de principios del siglo XX, las posteriores mejoras en la navegación marítima, desde sistemas inerciales a navegación por satélite, tienen su origen en satisfacer requisitos propios de la navegación aérea.

⁹¹Weems et al. 1937.

⁹²Cuando se vuela muy alto el mar siempre parece completamente plano, no dando suficiente información sobre la fuerza del viento por simple observación visual. Por ello era necesario volar a baja altitud, unos 200 metros, y repetir muchas veces las observaciones para calcular la deriva. Para una persona familiarizada con el mar, como los oficiales de la Marina, la simple observación visual a esta pequeña altura de vuelo proporcionaba una idea de la dirección y fuerza del viento con cierta precisión. Se desarrollaron no obstante mecanismos ingeniosos, como bolas con potasio y otros elementos que generaban humo al impactar con la superficie del mar y permitían así observar la dirección del viento y tener una idea del valor de la deriva. En general, la navegación estimada también se realizaba de forma similar a la que se hacía en los barcos, y se registraba gráficamente en la tarjeta por la que navegaba la tripulación (Ayliffe, 2001)

⁹³En la segunda mitad del siglo se ven complementados por la navegación inercial, doppler y la navegación por satélite

3.3. Métodos de cálculo astronómicos

Cuando se vuela sobre tierra firme, el horizonte visible no tiene valor práctico, debido a las variaciones en su elevación. Sólo cuando se sobrevuela a baja altitud el océano, el horizonte marino puede utilizarse para las observaciones. En los inicios de la aviación, empleando un sextante marino, era necesario descender periódicamente el avión a unos 30 metros de altitud durante un corto tiempo necesario para observar las alturas de los astros.

Pronto se decidió que el instrumento a utilizar en la navegación aérea debía ser un sextante corregido, que permitiera observar el horizonte marino además de un horizonte artificial. Un horizonte artificial es un horizonte celestial verdadero ⁹⁴ obtenido con ayuda de algún medio mecánico.

Como se verá en la sección 3.3.1, en la navegación aérea se emplearon inicialmente medios ópticos, como la burbuja que se incluyó en los sextantes. El vernier del antiguo sextante marino dió paso gradualmente al tambor micro-métrico, y se desarrolló el sextante de burbuja incorporando además un dispositivo de cálculo automático de medias para la navegación aérea. También se publicaron tablas especiales respondiendo a las necesidades del navegante. Estas tablas aceleraron y simplifican en gran medida el proceso de reducir la observación a la posición. El almanaque náutico también sufrió cambios radicales al incorporar las características del almanaque aéreo.

La posición exacta de un objeto celeste, en función de su declinación y su ángulo horario de Greenwich, pueden obtenerse del almanaque en cualquier instante de tiempo. Esta posición puede trazarse en una carta aérea como latitud y longitud. Un círculo con esta posición como centro, y con radio igual a la distancia del observador a esta posición obtenida con el sextante ⁹⁵ será el círculo de posición del observador. Si se observan dos objetos, la intersección de los círculos determinará la posición del observador (más precisamente dos posiciones, aunque una es generalmente descartable con rapidez). Dado que las distancias estelares son grandes, el círculo de posición será muy grande y cabe aproximarse por una línea recta en las proximidades del observador.

Todos los métodos de interés para determinar la línea de posición del observador están basados en el método de St. Hilaire, ver la sección 2.3.2, que hace uso de la diferencia entre la altitud observada y la calculada con

⁹⁴El horizonte celestial es el círculo máximo de la esfera celestial que es perpendicular a la línea cénit-nadir del observador y que pasa por el centro de la tierra. Difiere del horizonte visible, que es la línea que aparece para el observador como la intersección del cielo y la tierra, por dos motivos: la elevación del observador con respecto al nivel del mar, y la posición del observador que no está en el centro de la tierra. Este último efecto da lugar a la paralaje.

⁹⁵ 90° menos la altitud observada

ayuda de una posición estimada. Para poder calcular la línea de posición según el método de St Hilaire, es necesario obtener la posición a la estima, o algún punto situado en sus cercanías⁹⁶ y calcular, para este punto, la altitud y el azimut del cuerpo celeste que se observe. Si se calculan dos líneas de posición como las de la figura 2.7, asumiendo que no hay errores, la posición del observador estará en su intersección. Si hay tres líneas de posición, lo normal es que definan un triángulo, dentro del cual estará la posición del observador.

Cuanto más cerca están de la perpendicular las líneas de posición entre sí, mayor será la precisión en el cálculo de la posición del observador. Cuando las estrellas están visibles, pueden seleccionarse las distintas estrellas para que se cumpla esta condición. No obstante durante el día, el Sol es normalmente el único cuerpo celestial disponible para las observaciones⁹⁷. En observaciones marítimas, lo normal era tomar dos observaciones a distintas horas del día, pero esto no era posible en el aire. Por tanto la primera línea se desplazaba paralelamente a sí misma una distancia igual a la distancia recorrida entre observaciones, calculada a la estima, siendo la intersección con la segunda línea la posición estimada.

En el aire sin embargo, este sistema no es práctico, ya que la alta velocidad del avión y la influencia de los vientos, hacen que sea imposible estimar con precisión la distancia recorrida. En navegación aérea se utiliza normalmente una única línea de posición. Considerando el caso en el que la línea de posición es paralela al rumbo del avión, su distancia desde esta línea, calculada mediante la estima, le dará al navegador una indicación de la precisión de sus cálculos de estima, y quizás alertarle de un cambio de rumbo o de la intensidad del viento. De modo similar, si su línea de posición es perpendicular al rumbo, el navegador puede determinar la distancia que ha recorrido. En este último caso, el rumbo estimado puede utilizarse como otra línea de posición, y su intersección con la línea de posición astronómica le dará al navegador la posición aproximada de la aeronave.

3.3.1. Historia del sextante aéreo

Los navegantes aéreos demandaban de los constructores instrumentos más apropiados, y con un diseño específico distinto al de los empleados por los navegantes marinos, ineficaces en el aire.

Los navegadores marítimos emplean la línea del horizonte del mar como línea de referencia. El navegador aéreo no puede depender del horizonte

⁹⁶Weems et al. 1937.

⁹⁷En ciertas ocasiones la luna, venus y Júpiter son visibles durante el día y pueden utilizarse para calcular líneas de posición adicionales que corten a la del Sol.

marítimo. Puede que la mayoría del vuelo transcurra sobre tierra, donde el horizonte marítimo no está disponible. Incluso si transcurre sobre el océano, si el avión se encuentra a cierta altitud, no es posible distinguir el cielo del mar, sin establecerse una línea de división clara. Incluso si el horizonte puede distinguirse con claridad, es necesario corregir por la altura del ojo, lo que no siempre puede hacerse con la suficiente precisión. Así pues, la principal carencia del sextante para la aviación es la necesidad de una línea de horizonte, ya que los aviones vuelan con frecuencia muy por encima de esta línea y, en algunas circunstancias, las nubes la ocultan. Dentro de las necesidades inmediatas conocidas, en lugar de inventar algo nuevo, el camino fue adaptar las herramientas de navegación marítima para que fueran igualmente precisas para la navegación aérea. Además, como el avión vuela a gran velocidad y el combustible es limitado, estas operaciones debían ser rápidas. La cuestión principal era la definición de un horizonte artificial como línea de referencia para medir la altitud de los cuerpos celestes⁹⁸.

Con un sextante estándar, el observador miraba a través del ocular y hacía coincidir la imagen de un cuerpo celeste con el horizonte real; con el sextante aéreo, el observador hacía coincidir la imagen celeste con un horizonte artificial.

En realidad el problema de determinar el horizonte en condiciones de baja visibilidad o en tierra ya se había planteado con anterioridad. En la década de los años 30 del siglo XVIII comenzaron a desarrollarse horizontes artificiales para utilizar con los cuadrantes de la época⁹⁹.

El horizonte artificial de mercurio, muy popular entre exploradores y cartógrafos, ver figura 3.3, no podía utilizarse sin embargo en aplicaciones marítimas debido al cabeceo y balanceo del barco.

Durante algún tiempo los pilotos de los aeróstatos, de finales del siglo XIX, intentaron utilizar los sextantes marinos convencionales, pero su necesidad de instrumentos con horizonte artificial pronto llegó a ser evidente¹⁰⁰. En los sextantes utilizados en los aeróstatos, ver figura 3.4, el concepto óptico es el de reflejar la imagen de un pequeño nivel de burbuja situado en la línea de visión de forma que la burbuja y el cuerpo celeste se puedan visionar simultáneamente.

Para desarrollar un sextante de aviación con su propio horizonte, se siguie-

⁹⁸Warner, 2005.

⁹⁹Bugallo Siegel y Pascual Albarracín, 2007.

¹⁰⁰Antes de la invención del horizonte artificial, el cálculo de la posición por la observación de los cuerpos celestes requería el conocimiento de la altitud del avión, por ejemplo por la observación del aneroide o por la sombra aparente de las alas del avión sobre el mar, cuyo tamaño era conocido. Los navegantes llevaban tablas especiales, para ayudar a medir la altitud del avión Barata et al. 2009.



Figura 3.3: Quintante, parte de un equipo de explorador y cartógrafo de tres piezas de Carey of Pall Mall, Londres, de 1880. El instrumento es un quintante o pentante porque incluye una quinta parte de un círculo, capaz de medir ángulos de hasta 170 grados; montado en un soporte de aluminio plegable. Alrededor de la base se pueden ver las partes del horizonte artificial del baño de mercurio. El mercurio se vertía desde la botella de hierro en la cubeta para formar una superficie horizontal brillante que captara el reflejo del cuerpo celeste. La carpa de cristal triangular se colocaba sobre la cubeta para evitar que el viento perturbara la superficie.)

ron tres diseños distintos¹⁰¹: un horizonte giroscópico, un horizonte pendular y un horizonte de burbuja.

En 1915, en la estación aeronaval de Pensacola, se ensayó un sextante equipado con un horizonte artificial de péndulo. Se reportó que dicho péndulo era insatisfactorio para su uso en aeronaves, pero se conjeturó que un sextante con un horizonte artificial estabilizado mediante un giróscopo podría ser aceptable¹⁰².

En los sextantes giroscópicos, ver figura 3.5, un espejo giratorio, montado en la parte superior de un giróscopo accionado por aire, refleja una imagen del cuerpo celeste en la línea de visada, mejor que con el antiguo horizonte artificial de mercurio.

¹⁰¹Weems et al. 1937.

¹⁰²Hilding Beij, 1924.



Figura 3.4: Octante para globo o aerostato tipo Cary-Porter. En realidad, este instrumento sólo puede medir hasta 90 grados y, de hecho, ni siquiera es un sextante, sino técnicamente un *clinómetro*. Sin embargo, se utilizaba para las observaciones astronómicas y puede considerarse como el predecesor del sextante de burbuja. El telescopio tiene un espejo que mira hacia un pequeño nivel de burbuja montado en el limbo del índice. De este modo se puede determinar el ángulo vertical con respecto a la horizontal. Al igual que un sextante de tambor, este instrumento tiene un borde dentado, así como un micrómetro y una abrazadera de liberación rápida. En la parte superior del telescopio hay un juego de filtros. El instrumento se puede iluminar para usarlo de noche y lleva una pila en el mango. Además de un botón, el mango también tiene un potenciómetro para ajustar la cantidad de luz. Fuente: National Air and Space Museum.

Los diseños giroscópicos son mecánicamente complejos, mientras que los pendulares no tuvieron mucha aceptación. Principalmente se utilizaron los de burbuja por su simplicidad. Cabe destacar sin embargo, que todos estos diseños se ven afectados por las aceleraciones del avión, y no únicamente por la gravedad. Las aceleraciones pueden causar errores de decenas de millas en la posición, por lo que el avión ha de volarse en vuelo nivelado y en equilibrio durante las observaciones. Lógicamente cualquier determinación experimental de la vertical en una plataforma móvil está sujeta al principio de equivalencia de Einstein, la gravedad y la aceleración son indistinguibles



Figura 3.5: Sextante giroscópico, fabricado en Francia después de la primera guerra mundial. Fuente: Museo nacional del Aire y del Espacio, Francia.

en un sistema cerrado¹⁰³. En cualquier caso, los errores debidos a las aceleraciones del avión, que hacen que el sextante aéreo sea menos preciso que el marino, se compensa en cierta medida por la posibilidad de hacer observaciones de forma más regular y la posibilidad de hacer medias frecuentes. El sextante de burbuja sólo puede ser usado en vuelo nivelado en línea recta en condiciones de relativa calma, incluso estando sujeto a las aceleraciones de Coriolis.

Durante la noche, el cálculo del rumbo del avión y de la deriva causada por los vientos se complica, la navegación por referencia a las estrellas se convierte en la mejor opción para determinar la posición del avión.

La primera navegación celeste en el aire se realizaba en cabinas abiertas. Los instrumentos eran difíciles de manejar cuando el aire pasaba a 160 kilómetros por hora ¹⁰⁴.

¹⁰³MacKenzie, 1993, p. 66-67.

¹⁰⁴Los aviones presurizados de principios de los años 40 ya tenían cúpulas de observa-

Los sextantes aeronáuticos de la primera generación tenían un nivel de burbuja para ayudar al navegante a localizar el horizonte en condiciones de niebla o de nubosidad. Un primer ejemplo¹⁰⁵ fue un sextante Brandis con telescopio de burbuja Willson, ver figura 3.6. Robert Willson era profesor de astronomía en la Universidad de Harvard y había diseñado un sextante de burbuja de este tipo para uso náutico en la década de 1890, y una versión mejorada para uso aeronáutico en 1910.



Figura 3.6: Fabricado por Brandis & Sons Inc. Un sextante marítimo con un accesorio de burbuja especial en el ocular para ayudar a establecer un horizonte en uso aeronáutico, alrededor de 1919. Fuente: National Air and Space Museum.

La Sección de Instrumentos Aeronáuticos (AIS) de la Oficina Nacional de Normalización se creó en 1918 y se encargó de recopilar, evaluar y desarrollar instrumentos para uso estadounidense. Ernst G Fischer fue durante mucho tiempo jefe de la división de instrumentos del US Coast & Geodetic Survey y diseñó y patentó un sextante aéreo a principios de la década de 1920. Incluía un horizonte artificial de péndulo. Fischer también diseñó una palanca de

ción para la navegación. Posteriormente, para eliminar los problemas causados por estas cúpulas, se introdujeron los instrumentos periscopicos.

¹⁰⁵Warner, 2005.

liberación rápida para el micrómetro de un sextante que se mantuvo en uso durante muchos años.

Desde 1921, la AIS trabaja en un sextante de avión mejorado, que tenía un espejo giratorio que giraba mediante un tornillo sin fin y una rueda convenientemente graduada en lugar de la gran escala dividida que se utilizaba en los sextantes marinos, un método para variar el tamaño de la burbuja para compensar los cambios de temperatura, y la iluminación eléctrica de la burbuja y las escalas para su uso en condiciones de oscuridad. Keuffel & Esser fabricó el prototipo. Este sextante para aviones AIS fue diseñado para la Oficina de Aeronáutica de la Marina y se basó, en gran parte, en los instrumentos que habían sido diseñados en el Royal Air Establishment (RAE) de Farnborough y utilizados por la Real Fuerza Aérea Británica. Lionel Burton Booth y William Sidney Smith, ambos de la RAE, obtuvieron una patente británica para el instrumento británico en 1919, y Booth obtuvo una patente estadounidense en 1921. Franklin L Hunt y Karl H Beij, ambos de la AIS, solicitaron una patente estadounidense para un instrumento similar en 1921. Hunt era un físico doctorado del MIT que había sido enviado a Europa en 1918 para examinar y recopilar instrumentos europeos para la Oficina. Beij era un topógrafo licenciado por el Trinity College que pronto escribiría un famoso informe sobre "Métodos astronómicos en la navegación aérea" para el Comité Consultivo Nacional de Aeronáutica,¹⁰⁶. El AIS comenzó a discutir su sextante de burbuja mejorado en septiembre de 1923. Los trabajos se precipitaron en enero de 1924, ya que la Marina esperaba utilizar este instrumento para el vuelo polar del *Shenandoah*, el primer dirigible rígido de helio construido en Estados Unidos. El sextante se entregó en julio, pero el *Shenandoah* se perdió en una tormenta antes de que pudiera realizarse el vuelo al Ártico.

Un nuevo diseño europeo del sextante consideraba dos tubos de nivel de burbuja, uno para mantener el sextante horizontal y el otro para mantener el sextante vertical. Este sextante de horizonte artificial fue diseñado por el marino y futuro almirante portugués Coutinho. Entre el 30 de marzo y el 17 de junio de 1922, Gago Coutinho y Sacadura Cabral volaron con su hidroplano desde Lisboa a Rio de Janeiro en el primer vuelo que cruzó el Atlántico Sur, ver figura 3.7. La gran distancia que separa Guinea de Recife en Brasil era muy superior al radio de acción de la aeronave, por lo que fue necesario repostar desde un barco en medio del Atlántico Sur, cerca del archipiélago Fernando de Noroña situado a 545 kilómetros de Recife. La crítica tarea para navegar a ese preciso punto fue llevada a cabo utilizando el sextante aeronáutico que Coutinho desarrolló a partir de un sextante marino

¹⁰⁶Hilding Beij, 1924.

utilizado por los navegantes portugueses desde hacia mas de 300 años¹⁰⁷.

Sobre todo, Coutinho y Cabral trataron de demostrar que la navegación aérea podía realizarse con la misma precisión que la marítima, utilizando sextantes y otros dispositivos astronómicos disponibles. La magistral lección de los portugueses no parece que la asimilaran sus contemporáneos con suficiente celeridad. En 1927, Lindbergh, cruzó el Atlántico Norte, de Nueva York a París, en un vuelo excepcional, equipado con brújulas, cronómetros y derivómetros, pero sin hacer uso de la navegación astronómica.

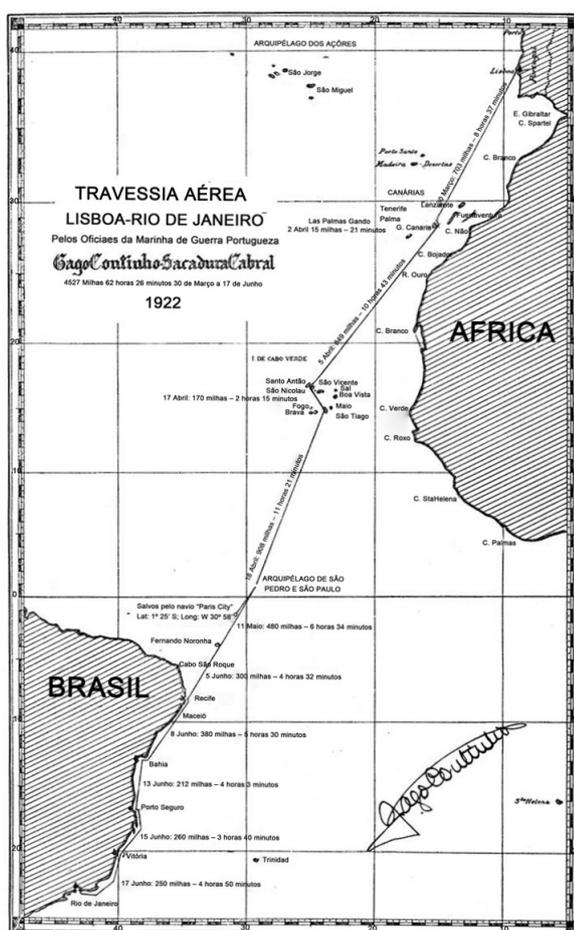


Figura 3.7: En 1922, Countinho dirigió la primera travesía aérea del Atlántico Sur, desde Lisboa hasta Río de Janeiro , pasando por Cabo Verde, junto con el comandante Sacadura Cabral, al que había conocido en Mozambique.

El sistema de Gago Coutinho fue una innovación genial que facilitó enormemente la práctica de las observaciones y mejoró el rigor de las lecturas.

¹⁰⁷Silva et al. 2016.

Utilizaban además un nivel cuyo radio de curvatura era exactamente igual a la distancia entre el ojo del observador y la imagen virtual de la burbuja en el espejo auxiliar. De resultas de esta sutileza geométrica las oscilaciones angulares del sextante debidas al movimiento de la aeronave eran iguales a las desviaciones angulares de la burbuja. La lectura de la altura del astro no estaba afectada por esas oscilaciones, mientras se mantuviese la imagen coincidente con la burbuja, sin sujeción a cualquier otra referencia fija. Este sextante también permitía efectuar observaciones sobre el horizonte del mar¹⁰⁸. En 1929, el Capitan Wittenman navegó con el Graf Zeppelin alrededor del mundo utilizando un sextante de Coutinho.

Un nuevo diseño americano, promovido por Richard Evelyn Byrd ¹⁰⁹, tenía el nivel de burbuja montado en el marco del sextante cerca de los filtros para el cristal del horizonte, en el lado opuesto al telescopio. Byrd era un graduado de la Academia Naval de 1912 que comandaba dos estaciones aeronáuticas navales en Nueva Escocia en 1918 y que apoyaba el plan de la Armada de hacer volar grandes aviones a través del Atlántico. En 1919, cuando se le asignó la tarea de adquirir instrumentos de navegación para los

¹⁰⁸Bugallo Siegel y Pascual Albarracín, 2007.

¹⁰⁹Byrd fue un oficial naval y explorador norteamericano. En 1925, Byrd comandó una unidad de vuelo naval que asistió a una expedición estadounidense al Ártico. Esto le inspiró para hacer un intento privado de sobrevolar el Polo Norte. El 9 de mayo de 1926, Byrd, actuando como navegante, y Floyd Bennett, como piloto, realizaron lo que, según ellos, fue el primer vuelo sobre el Polo Norte. Despegaron de Spits Bergen, Noruega, en un Fokker trimotor. Varias horas después, rodearon el Polo Norte. Consiguieron volver sanos y salvos, con un total de 15 horas y 57 minutos de vuelo. Se les concedió la Medalla de Honor del Congreso de Estados Unidos y fueron aclamados como héroes nacionales. Sin embargo, casi inmediatamente, la hazaña se vio envuelta en una polémica que duró décadas ya que la velocidad de su avión lo hacía físicamente incapaz de llegar al Polo Norte y regresar en el tiempo que habían volado. Además, las anotaciones del diario de vuelo de Byrd, descubiertas sólo en 1996, parecen indicar que el avión estuvo quizás a 240 km del Polo Norte en el momento más cercano. En contraste, el vuelo posterior de Byrd al Polo Sur fue un completo triunfo. En 1929, Byrd y tres compañeros despegaron de su base antártica, Little America, en el avión, fuertemente cargado, que procedió hacia el Polo. A las 21:00 horas ya habían subido a 9.000 pies, pero todavía estaban a 2.000 pies por debajo de la altura necesaria para alcanzar la meseta polar. Mientras el avión luchaba por ganar la altitud necesaria, se deshicieron del exceso de suministros y equipos. Finalmente, lo consiguieron. Las observaciones sobre la meseta les mostraron a sólo 50 millas del Polo y poco después de la medianoche del 29 de noviembre, el avión *Floyd Bennett*, bautizado así en honor al antiguo piloto recientemente fallecido, voló sobre el Polo Sur. Continuaron unas millas más allá del Polo y luego a la derecha y a la izquierda para compensar cualquier posible error de navegación. Byrd dejó caer una pequeña bandera americana y luego inició el regreso. Aterrizaron en Little America a las 10:10 horas del 29 de noviembre, habiendo cubierto una distancia de 1.560 millas, en 18 horas y 41 minutos. Cuando Byrd regresó a los EE.UU. en 1930, se le otorgaron otros honores y premios, incluido el ascenso al rango de contralmirante.

hidroaviones Navy-Curtiss que viajarían de Long Island a Inglaterra, Byrd eligió sextantes hechos según su diseño. El 28 de abril de 1919, se suministraron al Observatorio Naval Norteamericano, por petición de Byrd, niveles de burbuja como accesorios para los sextantes de navegación. De ese modo se dispondría de un horizonte artificial para las observaciones astronómicas tanto de los navíos en condiciones meteorológicas adversas como desde las aeronaves. Los ejemplos posteriores del sextante Byrd estaban equipados con una palanca de liberación rápida tipo Fischer, un tornillo tangente con un tambor micrométrico que leía hasta medio minuto, y bombillas eléctricas para iluminar el nivel y la escala.

La Pioneer Instrument Company¹¹⁰ adquirió el control de Brandis en 1922 y contrató a Victor Carbonara, un ingeniero italiano. Carbonara se dio cuenta de que los navegantes aéreos nunca medían ángulos superiores a 90°, por lo que podían utilizar un octante en lugar de un sextante. Y si el octante tuviera un micrómetro en lugar de un nonio, podría reducirse su tamaño. Brandis introdujo su primer octante aéreo (el modelo 206, ver figura 3.8) en 1925.

Otro sextante de burbuja, diseñados por Noel Davis¹¹¹ y Lawrence Radford, y desarrollado por Keuffel & Esser, tenía una óptica cerrada y una escala externa dividida, y estaba construido de manera que el observador miraba hacia abajo en el ocular en un ángulo de unos 45°. Davis y Radford presentaron una solicitud de patente para su sextante en febrero de 1927, ver figura 3.9. Davis murió dos meses después, tras estrellarse el avión en el que esperaba realizar el primer vuelo sin escalas a través del Atlántico, de Nueva York a París, y en el que esperaba navegar utilizando su modelo de sextante.

La empresa Keuffel & Esser recibió un contrato de la Marina americana para producir varios de estos instrumentos, que dió lugar a finales de 1927 al sextante modelo *Darad*, que podía usarse con o sin horizonte artificial. La Oficina de Aeronáutica de la Marina publicó una nota técnica sobre el Darad (que conocía como Mark II, Mod 1) a principios de 1928. Keuffel & Esser introdujo una nueva versión del DARAD (designación de la Marina Mark II, Mod 2, y designación del Ejército A-3) en 1929. Este era más ligero y compacto que el original, y de mejor calidad óptica. Sin embargo, su construcción era complicada. En 1932 Keuffel & Esser había introducido un nuevo modelo (designación de la Armada Mark IV, Mod 1) que era aún más compacto, con la escala dividida trasladada al interior junto con el tren óptico.

Como la burbuja estaba llena de un hidrocarburo líquido que tendía a

¹¹⁰Warner, 2005.

¹¹¹Noel Davis era un graduado de la Academia Naval que, tras recibir otros títulos de la escuela aeronáutica de la Marina en Pensacola y de la Facultad de Derecho de Harvard, fue puesto a cargo de todos los vuelos de la reserva naval en 1922.

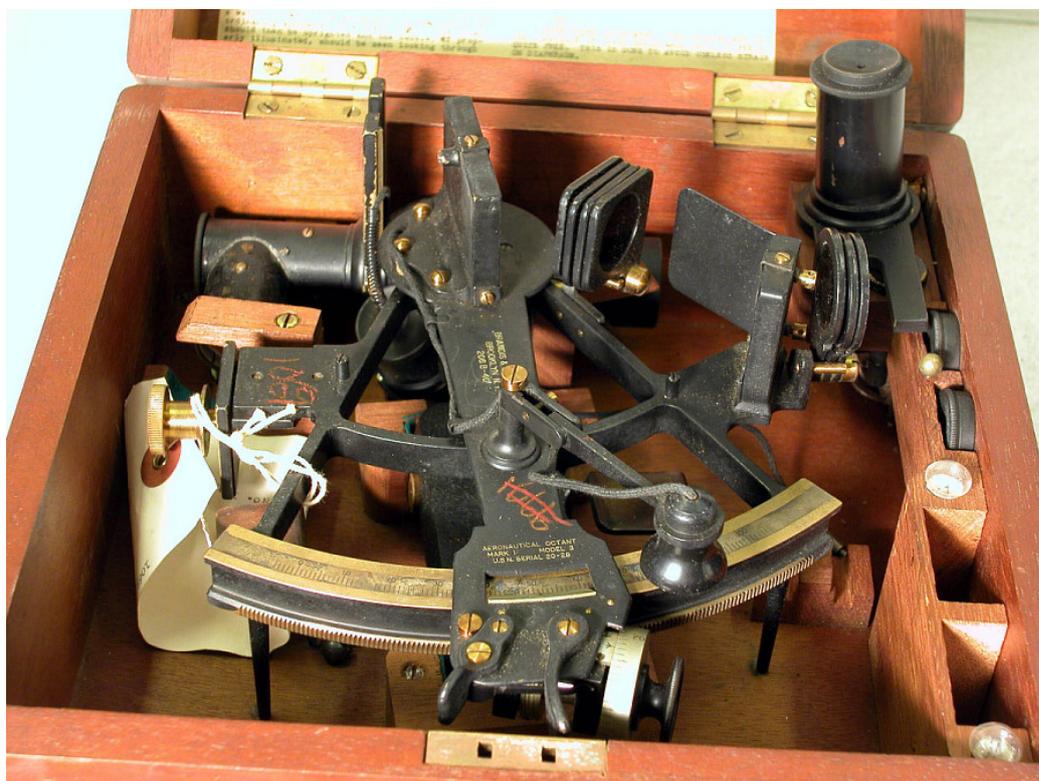


Figura 3.8: Octante modelo Brandis 206, del National Air and Space Museum, EEUU. Obsérvese el micrómetro de tambor en vez del nonius de diseños anteriores. Este diseño estaba equipado con un telescopio de burbuja, una palanca de liberación rápida Fischer, un micrómetro de tambor y una iluminación eléctrica para la burbuja y el arco dividido.

expandirse y contraerse con los cambios de temperatura, Hunt y Beij patentaron un medio para compensar los cambios de temperatura que afectan a la burbuja de nivelación. Beij también patentó una versión más ergonómica que tenía filtros para reducir el resplandor de la luz solar y una luz eléctrica para iluminar por la noche.

En 1937 se introdujo un método mejorado de iluminación de las burbujas y una almohadilla de marcado incorporada. En 1938 se introdujo una célula de burbuja mejorada en los sextantes de Bausch & Lomb. El ejército estadounidense comenzó a probar los sextantes de burbuja de Bausch & Lomb alrededor de 1935, los aprobó para su uso en el servicio y les dio la designación A-6 ¹¹².

¹¹²Japón encargó 60 de estos instrumentos en 1937 -hecho que Bausch & Lomb anunció con orgullo- y es posible que utilizara algunos de ellos en Pearl Harbor.

Jan. 14, 1930.

L. RADFORD ET AL

1,743,979

SEXTANT

Filed Feb. 12, 1927

5 Sheets-Sheet 1

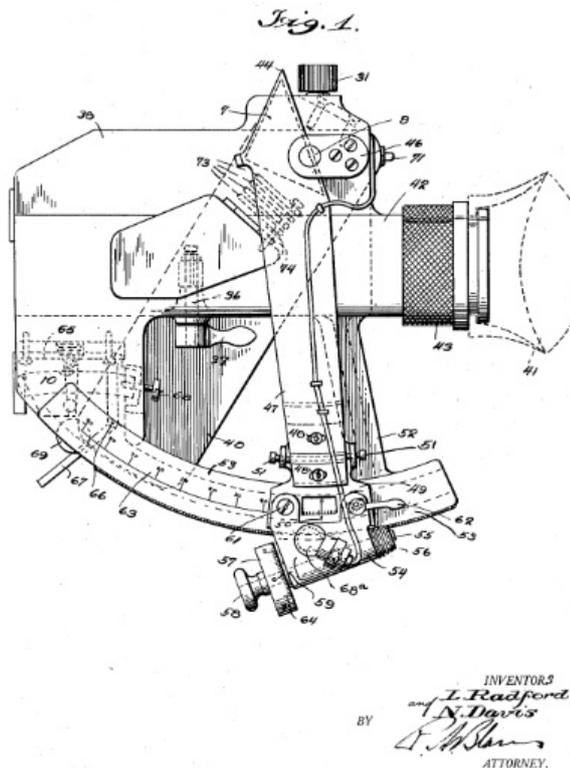


Figura 3.9: Patente de Davis y Radford para sextante aeronáutico, solicitada en 1927. Davis y el desconocido Lawrence Radford presentaron una solicitud de patente para un sextante de avión con óptica cerrada y una escala externa dividida. Fuente: USPTO

La Pioneer Instrument Co. se unió al mercado en 1931 con un sextante compacto y ligero diseñado en gran parte por Victor Carbonara, mencionado anteriormente en relación con Brandis. Este instrumento tenía prismas en lugar de espejos en su tren óptico. La cámara de burbujas estaba colocada en el recorrido óptico y se iluminaba fácilmente con la luz ambiente. La esfera se iluminaba con pintura radioluminiscente, lo que evitaba la necesidad de utilizar pilas y luz eléctrica. El ocular era giratorio en torno al eje vertical, de modo que el navegante podía tomar fácilmente vistas hacia atrás y hacia delante. Charles y Anne Lindbergh utilizaron un sextante Pioneer en 1933 cuando volaron el *Tingmissartog* a través y alrededor del Atlántico,



Figura 3.10: Sextante de burbuja modelo A de Bausch and Lomb. Los sextantes aeronáuticos de segunda generación eran mucho más aerodinámicos, ligeros y fáciles de manejar. H. K. Beij, de la Oficina Nacional de Estándares, diseñó éste y muchos otros para la Marina de Estados Unidos. Fuente: National Air and Space Museum, Smithsonian Institution.

inspeccionando las rutas aéreas para Pan American Airways, ver figura 3.11. Probablemente se volvió a utilizar cuando navegó en el malogrado vuelo de Amelia Earhart en 1937.

A mediados de la década de 1930, tras descubrir que la turbulencia del aire y la inestabilidad de las aeronaves hacían que las observaciones individuales fueran poco fiables, los aviadores promediaban habitualmente varias observaciones realizadas en rápida sucesión. El siguiente paso obvio era mecanizar el proceso¹¹³. El capitán Julius Hellweg, superintendente del Observatorio

¹¹³Hagger, 1952.



Figura 3.11: Octante de aviación marca Pioneer modelo 342. Charles y Anne Lindbergh utilizaron este instrumento en 1933 cuando inspeccionaron las rutas aéreas a través y alrededor del Atlántico para Pan American Airways. Anne había estudiado recientemente navegación celeste, y las notas del reverso son probablemente de su mano. Los números de serie indican que éste era el tercer ejemplar del modelo 342, y el tercero fabricado para la Marina en 1931. Colección del National Museum of American History

Naval, diseñó un promediador mecánico para sextantes marinos, y Thurlow, otro aviador del ejército, diseñó otro para sextantes aéreos. Bausch & Lomb recibió un contrato del Ejército para un sextante promediador a principios de 1937: el modelo A-6-A era un A-6 equipado con un promediador Thurlow que podía manejar ocho lecturas consecutivas. Las modificaciones posteriores dieron lugar al A-8 y al A-8A, instrumentos que Bausch & Lomb produjo en gran número durante la segunda guerra mundial. El ejército también proporcionó fondos para que Pioneer pudiera equipar su sextante aéreo con un promediador Thurlow. Thurlow recibió los dos primeros ejemplares en julio de 1938, justo unas horas antes de que él y Howard Hughes despegaran en

su vuelo récord alrededor del mundo, y fue capaz de obtener fijaciones de posición extremadamente precisas a pesar del aire turbulento.

Bausch & Lomb también produjo un modelo experimental del sextante promediador de integración continua diseñado por el capitán Paul Gray de Pan American Airways. Era robusto y compacto, y fácil de equilibrar, y daba menos problemas que cualquier otro sextante. Disponía de una luz eléctrica para la iluminación estándar y de radioluminiscencia para la iluminación de baja intensidad. También contaba con un dispositivo de mediana que era sencillo y autoexplicativo. El dispositivo de mediana era un mecanismo totalmente mecánico que determinaba la mediana en lugar del promedio aritmético de varias observaciones.

Cabe destacar que los alemanes ya habían adoptado mecanismos integradores en sextantes de burbuja aéreos, concretamente en el modelo Sold KM2, que también se utilizaba en los famosos submarinos U-boat ¹¹⁴. Además, los diseños alemanes realizaban la integración matemática de medidas tomadas durante dos o tres minutos, y no simplemente la media, para evitar que las medidas finales se vieran afectadas por las frecuencias propias del movimiento del avión o del submarino, por ejemplo de cabeceo o balanceo. Un desarrollo marino ligeramente posterior, el sextante Kreisel, incorporaba un giróscopo en vez de una burbuja, aislado mecánicamente del sextante, ya que el líquido de la burbuja oscilaba fuertemente con los movimientos del barco.

Mientras el ejército estadounidense se preparaba para la entrada en la guerra, la Pioneer Instrument, ahora una división de Bendix Aviation, fabricaba sextantes de burbuja para la Marina y el Ejército. Ambos eran modificaciones del sextante que Pioneer había introducido en 1931, ver figura 3.11. El Mark III y IV de la Armada tenía un mecanismo que promediaba las observaciones y los tiempos en que se realizaban, y que había sido diseñado por el teniente comandante Ira Hobbs de la Fábrica de Aeronaves Navales. Las observaciones se registraban en un cilindro giratorio cubierto con un papel sensible a la presión, ver figura 3.12. Estos instrumentos eran pesados, por lo que se diseñaron para ser suspendidos de un brazo instalado en el centro de la cúpula de observación. Muchos de ellos seguían utilizándose en la década de 1960.

Cuando se introdujeron los aviones presurizados ¹¹⁵ se hizo necesario ins-

¹¹⁴Los submarinos emergían por la noche para realizar observaciones de las estrellas, luna y los planetas, pero el horizonte no se apreciaba generalmente de noche, de ahí la idea de utilizar sextantes de burbuja aéreos

¹¹⁵En 1937, el Cuerpo Aéreo del Ejército de Estados Unidos comenzó a realizar vuelos de investigación en un Lockheed Electra modificado. El XC-35 fue el primer avión construido con una cabina presurizada. El fuselaje se diseñó con una sección transversal circular para eliminar los puntos de tensión cuando el fuselaje se expandía bajo presión. Las aberturas se

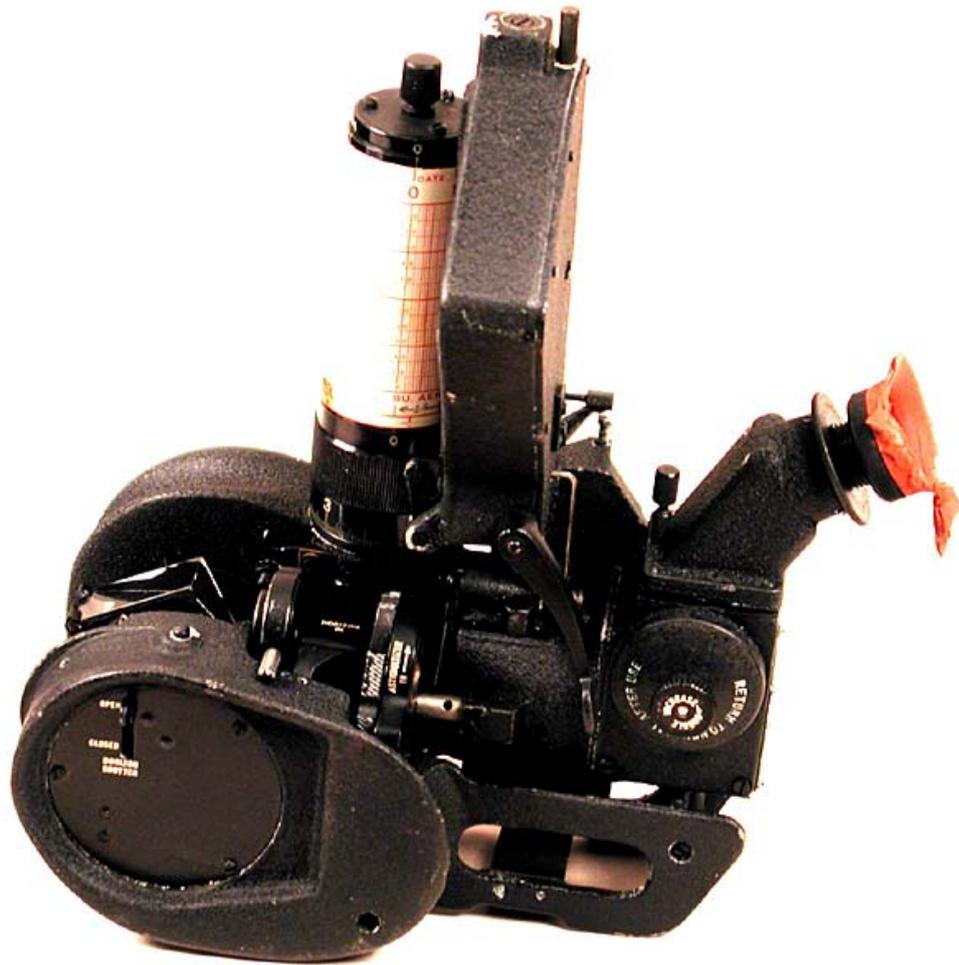


Figura 3.12: Octante Mark IV. El octante de burbuja Mark IV contaba con un mecanismo diseñado por Hobbs, de la Fábrica de Aeronaves Navales, que promediaba las observaciones junto con las tiempos en que fueron realizadas. También contaba con un novedoso método de iluminación de la burbuja diseñado por Gregory Rylsky, un ingeniero empleado por Pioneer. Esta configuración se introdujo en 1941 y se mantuvo en uso durante toda la guerra. Colección del National Museum of American History

sellaron para evitar la salida de aire. Las ventanas se redujeron en tamaño y se reforzaron, y la cabina interior se convirtió en una cápsula de presión. En 1937, el XC-35 le valió al Cuerpo Aéreo el Trofeo Collier al desarrollo más significativo del año. Dos años más tarde, Boeing presentó un diseño al Cuerpo Aéreo para un bombardero de largo alcance, el B-29

troducir cúpulas transparentes para la navegación astronómica. Con una cabina presurizada y una cúpula de observación transparente, los navegantes podían realizar observaciones con seguridad y comodidad. El inconveniente era la necesidad de corregir la refracción de la cúpula en los cálculos, y la interferencia de la cúpula con la aerodinámica del avión. Reconociendo que un periscopio eliminaría estos problemas, Thurlow, Burka y otro colega patentaron un sextante periscópico en 1941¹¹⁶, ver figura 3.13 para un ejemplo.



Figura 3.13: Sextante periscópico en un avión comercial Vickers VC-10. Fuente BOAC.

La empresa Kollsman Instrument Company dominó el campo de los sextantes aéreos desde finales de la década de 1940 hasta que la introducción del GPS en la década de 1980 hizo que los sextantes quedaran prácticamente obsoletos. Fabricaban instrumentos manuales y periscópicos¹¹⁷, algunos con horizontes artificiales de espejo colgante y otros con burbujas. Paul Kollsman era un ingeniero inmigrante de Alemania que trabajó brevemente para la Pioneer Instrument Co., estableció su propia empresa en Brooklyn en 1928

Superfortress, que tendría compartimentos presurizados para la tripulación. Y en 1940, el 307 Stratoliner de Boeing comenzó a hacer volar a los pasajeros en cabina presurizada.

¹¹⁶Withington, 1948.

¹¹⁷Withington, 1948.

y convenció a Victor Carbonara y a Charles Colvin de Pioneer para que se unieran a esta empresa. La empresa se convirtió en la División de Instrumentos Kollsman de en 1940, y en la Kollsman Instrument Corporation una década después. Kollsman presentó su primer sextante para aviones en 1948, señalando con orgullo que tanto Pan American Airways como KLM habían instalado estos instrumentos en sus aviones transoceánicos. Este instrumento utilizaba un espejo colgante y una montura periscópica diseñada por Carbonara. También contaba con un integrador que producía una media móvil continua sobre cualquier periodo de observación de hasta dos minutos. Esto se basaba en el integrador de bola, que había sido patentado por Richard Deimel ¹¹⁸ y William A Black, y asignado a la General Time Instrument Corp.

El sextante A-12, ver figura 3.14 fue diseñado con la ayuda de Weems justo antes de la Segunda Guerra Mundial y fabricado por Ed Link. Representaba una nueva generación de sextantes promediadores que compensaban el balanceo del holandés ¹¹⁹ de los aviones tomando múltiples observaciones y calculando una media sin necesidad de cálculos manuales. El sextante de burbuja Link fue diseñado para satisfacer la necesidad urgente de un sextante de burbuja de bajo precio que sea preciso y fácil de usar. Pesa menos de un kilo y es mecánicamente sencillo y robusto. El vernier es más difícil de leer que el tambor micrométrico utilizado en algunos sextantes, pero esta desventaja se ve contrarrestada por el hecho de que sólo se requiere una lectura para una serie y por el hecho de que el coste es mucho más barato que otros tipos de sextantes.

La demanda militar fue un factor clave que impulsó el desarrollo y la producción de estos instrumentos. Esta demanda comenzó en la Primera Guerra Mundial y aumentó de forma constante en los años de entreguerras¹²⁰. Durante este periodo, en el que la tecnología aún no era de importancia crítica, el ejército proporcionó el empleo estable y otros recursos con los que los innovadores con talento pudieron desarrollar nuevas ideas, probar los instrumentos a medida que estaban disponibles y proporcionar información que contribuyó a su rediseño¹²¹. A principios de 1940, empresas como Bausch &

¹¹⁸Deimal era un profesor de ingeniería mecánica en el Stevens Institute of Technology que, durante la guerra, fue consultor de Sperry Gyroscope y de Fairchild Aviation, y director de investigación en la General Time Instrument Corp.

¹¹⁹El balanceo holandés se produce de forma natural en muchos aviones. El balanceo del holandés es una serie de giros fuera de fase, cuando el avión gira en una dirección y da bandazos en la otra. Su nombre proviene del movimiento de una técnica clásica de patinaje holandés.

¹²⁰Ifland, 1998.

¹²¹Warner, 2005.



Figura 3.14: Sextante de burbuja modelo Link A12. Es un sextante anterior a la Segunda Guerra Mundial fabricado por la Link Aviation Co. Fue utilizado por los militares y las aerolíneas hasta finales de la década de 1940, y fue el último de una línea de sextantes para aviones cuyo diseño fue influenciado por el uso en aviones de cabina abierta. Fuente: National Air and Space Museum, Smithsonian Institution.

Lomb no comenzaría la producción hasta recibir un gran pedido del Departamento de Guerra. Cuando el ejército estadounidense comenzó a prepararse para la Segunda Guerra Mundial, se enfrentó al reto de obtener instrumentos adecuados en cantidades suficientes.

En marzo de 1941, nueve meses antes de Pearl Harbor, el ejército americano estableció las especificaciones y comenzó a fomentar la fabricación de sextantes aéreos pequeños y ligeros equipados con un promediador. Cuando Bausch & Lomb y Pioneer no pudieron satisfacer la demanda, se animó a otras empresas a entrar en el mercado. Para mejorar aún más la situación, una conferencia de navegación militar celebrada en Fort Worth en mayo de 1943 recomendó la estandarización de los sextantes y enumeró las características deseadas. En este sentido, los instrumentos Bausch & Lomb y Pioneer de mediados de los años 30, fiables y ergonómicamente satisfactorios, eran claramente mejores que los instrumentos de los años 20, toscos y propensos a errores. El Ejército reconoció que la calidad de un sextante aéreo se juzga-

ba mejor por su rendimiento real. El coste puede haber sido un factor, pero para el ejército y para las aerolíneas comerciales con rutas transoceánicas, el coste era trivial comparado con el valor de la aeronave, la tripulación, el armamento, la carga y los pasajeros que el instrumento estaba diseñado para proteger. Por último, dado que la facilidad de fabricación afectaba al resultado final, los fabricantes se esforzaban por diseñar sextantes que no exigieran las habilidades especiales de un fabricante de instrumentos de precisión. Los retos de desarrollo se produjeron tanto en el proceso de fabricación como en el diseño básico.

La historia del sextante aéreo plantea cuestiones como cuál es la identidad nacional de una tecnología que tan evoluciona rápidamente. Los inventores obtienen patentes en varios países y los derechos de estas patentes se licencian de forma cruzada.

Otro aspecto es la obsolescencia tecnológica. Los sextantes para aviones siempre se han utilizado junto con las brújulas, los medidores de velocidad y de deriva, los altímetros, las calculadoras, la radio y, con el tiempo, otras ayudas electrónicas, y el desarrollo de estas diversas tecnologías de navegación progresó más o menos al mismo ritmo. Así, a medida que el sextante de los aviones mejoraba, se volvía cada vez más irrelevante como finalmente ocurrió.

3.3.2. Errores en los sextantes de burbuja

Desgraciadamente, en toda observación con sextante realizada desde un avión se producen errores considerables¹²². El almanaque aéreo contiene correcciones específicas para estos errores que deben aplicarse a la altitud calculada del avión. La exactitud de la navegación celeste depende de la aplicación minuciosa de estas correcciones, junto con las técnicas de observación adecuadas. Aunque algunos de ellos ya son conocidos desde la introducción de los elementos de reflexión en el siglo XVIII, los errores de la observación con sextante pueden en general clasificarse en cuatro grupos: paralaje, refracción, aceleración, Coriolis e instrumento.

- Error de paralaje. El paralaje en altitud es la diferencia entre la altitud de un cuerpo sobre un horizonte de burbuja en la superficie de la tierra y su altitud calculada sobre el horizonte celeste en el centro de la tierra.
- Corrección de paralaje para la Luna. La Luna está tan cerca de la tierra que sus rayos de luz no son paralelos. El paralaje de la Luna puede ser tan grande como 1° por lo que, al observar la Luna, se debe aplicar una corrección de paralaje a la altitud del avión. Esta corrección varía con

¹²²Hagger, 1952.

la altitud y con la distancia de la Luna a la Tierra. La corrección varía de un día a otro porque la distancia de la Luna a la Tierra varía. Las correcciones para el paralaje de la Luna en altitud se dan en las páginas diarias del Almanaque Aéreo y siempre se añaden, algebraicamente, a las altitudes del sextante.

- Corrección semidiamétrica. La corrección semidiamétrica se encuentra en las páginas diarias del Almanaque Aéreo. Se aplicará cuando se observe al limbo superior o inferior de la luna o del sol
- Error de refracción atmosférica. Otro factor a tener en cuenta es la refracción atmosférica. La refracción de la luz de un cuerpo celeste al atravesar la atmósfera provoca un error en la observación con sextante. Cuando la luz de un cuerpo celeste pasa del vacío casi perfecto del espacio exterior a la atmósfera, se refracta de manera que el cuerpo aparece un poco más alto sobre el horizonte de lo que realmente está. Cuanto más alto esté el cuerpo sobre el horizonte, menor será la cantidad de refracción y, en consecuencia, menor será la corrección por refracción. Además, cuanto mayor sea la altitud del avión, menos densa será la capa de atmósfera entre el cuerpo y el observador; por lo tanto, menor será la refracción ¹²³.
- Error de aceleración. Actualmente, el único dato de referencia práctico y continuamente disponible para la definición de la verdadera vertical es la dirección del campo gravitatorio de la tierra. La definición de esta vertical establece el horizonte artificial. También es fundamental que las fuerzas causadas por la gravedad no puedan separarse de las causadas por las aceleraciones dentro del sextante. Un nivel o burbuja centrada en el sextante indica la verdadera vertical sólo cuando el instrumento está en reposo o se mueve a velocidad constante en línea recta. Cualquier fuerza exterior afecta al líquido en la cámara de la burbuja y, en

¹²³La tabla de corrección apropiada para la refracción atmosférica figura en la contraportada de los cuatro libros utilizados para los cálculos celestes, a saber, el Almanaque Aéreo y cada uno de los tres volúmenes de la Publicación n^o 249. Contiene las Tablas de Reducción de la Vista para la Navegación Aérea publicadas en tres volúmenes. El volumen I, utilizado tanto por el navegante marino como por el aéreo, contiene los valores de altitud y acimut de siete estrellas seleccionadas para los rangos completos de latitud y ángulo horario de Aries. Estas siete estrellas representan la mejor selección para la observación en cualquier posición y hora, y proporcionan los datos para el preajuste de los instrumentos antes de la observación y para la reducción de la vista después. Los volúmenes II y III cubren las latitudes 0-40 y 39-89, respectivamente, y son utilizados principalmente por el navegante aéreo junto con las observaciones de los cuerpos celestes para calcular la posición geográfica del observador.

consecuencia, desplaza la burbuja. Cuando el sextante se mueve en una trayectoria curva (Coriolis, cambios de rumbo, línea de rumbo, etc.), o con velocidad variable, el cenit indicado por la burbuja se desplaza de la vertical verdadera. Esto presenta un falso horizonte artificial por encima del cual se mide la altitud del cuerpo celeste. Como el horizonte utilizado es falso, la altitud medida desde él es errónea. Por lo tanto, la precisión de las observaciones celestes está directamente relacionada con los cambios en la trayectoria y la velocidad de la aeronave.

- Aceleración de Coriolis ¹²⁴. El sextante de burbuja indica la vertical verdadera sólo cuando el instrumento está en reposo o se mueve a una velocidad constante en una línea recta como se percibe en el espacio. Si la tierra estuviera inmóvil, esta trayectoria recta en el espacio sería también una trayectoria recta sobre la superficie de la tierra; a la inversa, una trayectoria recta sobre la tierra inmóvil sería también una trayectoria recta en el espacio. Cuando el avión vuela por una trayectoria curva en el espacio hacia la izquierda, el fluido de la cámara de burbujas se desvía hacia la derecha, y la burbuja se desvía hacia la izquierda de la trayectoria del avión sobre la tierra. Cuando el avión sigue una trayectoria curva en el espacio hacia la derecha, ocurre lo contrario. La aceleración de Coriolis es directamente proporcional a la velocidad en línea recta, directamente proporcional a la velocidad angular de la tierra, directamente proporcional al seno de la latitud y en ángulo recto con la dirección de vuelo.
- Errores de instrumento, como por ejemplo los errores en el horizonte artificial, generalmente constantes.

3.3.3. Métodos de cálculo reducidos

Con la llegada de los barcos de vapor, y eventualmente de los aviones, la necesidad de métodos más rápidos se hizo urgente. El punto de inflexión se produjo cuando se comprendió que la posición estimada no tenía por qué ser la posición de cálculo, sino que podía ser una posición estimada seleccionada

¹²⁴Cualquier cuerpo en movimiento libre que se desplace a una velocidad constante por encima de la Tierra está sujeto a una fuerza aparente que desvía su trayectoria hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Esta fuerza aparente, y la aceleración resultante, fueron descubiertas por primera vez poco antes de mediados del siglo XIX por Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843) y formuladas cuantitativamente por William Ferrel (1817- 1891). La aceleración se conoce como aceleración o fuerza de Coriolis, o simplemente, Coriolis, y se expresa en la ley de Ferrel.

de forma que se pudieran sustituir los cálculos por búsquedas en tablas¹²⁵.

Se desarrollaron tablas de cálculo rápido de rectas de altura, que registraban las soluciones del triángulo de navegación para un número finito pero bastante grande de posibilidades. Se denominaron tablas de cálculo rápido de rectas de altura o tablas de reducción de la vista y se desarrollaron en los años comprendidos entre 1920 y el estallido de la Segunda Guerra Mundial.

Hay dos grados de libertad en el algoritmo que hacen posible el diseño de tablas de reducción de la vista: la elección de la latitud supuesta y la elección de la longitud supuesta. Para reducir el número de tablas necesarias, la latitud supuesta se limitó a un número entero de grados, mientras que la longitud supuesta se eligió de forma que el ángulo horario local, el vértice del triángulo de navegación en el polo - la diferencia de longitud entre el barco y la posición geográfica del sol, fuera un número entero de grados. El lado correspondiente al complemento de la declinación solar no puede ser obligado a tomar un valor determinado.

La tabla enumera los valores que son números enteros de grados, pero proporciona ayudas para interpolar los valores de la tabla para los valores intermedios de la declinación. Para utilizar estas tablas, el navegante resta su longitud estimada de la posición geográfica del sol, después de modificar primero su longitud supuesta para que tenga el mismo número de minutos y segundos de arco que el lugar geométrico solar. Esta diferencia es el ángulo horario local, en grados enteros.

A continuación, el navegante introduce en las tablas del Almanaque Aéreo o publicación similar la declinación del objeto celeste al grado más cercano y la latitud al grado más cercano de la posición estimada. Estas tres cantidades identifican una página, una fila y una columna en las tablas.

La altitud calculada y el ángulo cenital se leen en las tablas y se realiza una interpolación para la parte fraccionada de la declinación de los objetos celestes. Luego se sigue la práctica habitual para obtener el círculo de altitudes iguales a partir de la posición supuesta, el ángulo cenital y la diferencia entre la altitud solar calculada y la observada.

Aunque el método de reducción de la vista dará prácticamente la misma línea de posición, no da una estimación tan buena de dónde estamos en esa curva de posición como el método de St Hilaire, ya que la posición asumida no se eligió para ser la mejor estimación, sino que se eligió para ajustarse a los resultados pretabulados¹²⁶. Con la llegada de las calculadoras electrónicas, no es necesario hacer este compromiso, y de hecho hacen las tablas completamente innecesarias.

¹²⁵Sadler, 1972.

¹²⁶Everitt, 1931.

3.3.4. El almanaque aéreo

En Estados Unidos, el interés por producir un volumen adaptado a las necesidades de los navegantes de aeronaves comenzó a finales de la década de 1920. Este interés se tradujo en la producción del Suplemento Aeronáutico de septiembre de 1929 a diciembre de 1930; el Suplemento de 1931; el Almanaque Náutico revisado de 1932; el Almanaque Aéreo de 1933; y el Almanaque Náutico revisado de 1934 y 1936. Pero a pesar de la publicación de los almanaques aéreos alemán (1935), francés (1936) y británico (1937), los estadounidenses no produjeron un volumen anual regular durante la década de 1930¹²⁷.

En 1940, como parte de los esfuerzos estadounidenses en la Segunda Guerra Mundial, la Oficina del Almanaque Náutico recibió permiso para aumentar su personal y producir un almanaque aéreo especialmente diseñado para la flota aérea estadounidense. La oficina entregó el nuevo Almanaque Aéreo en 1941, y se ha publicado regularmente desde entonces. Este nuevo libro presentaba los datos en una sola hoja por día, con gran parte de los datos dados en intervalos de 10 minutos apropiados para los pilotos. Una hoja por día era una gran comodidad para los pilotos porque las páginas individuales se podían quitar y llevar en los vuelos.

Otros elementos especiales que se añadieron fueron los diagramas del cielo, las cartas de búsqueda de estrellas para los sextantes periscópicos, las cartas de visibilidad de la Luna para las altas latitudes y una lista de los husos horarios utilizados por varios países.

En 1953 se unificaron los almanaques aéreos británico y estadounidense, de modo que los contenidos son idénticos aunque se publiquen por separado. La notación cambió de Hora Civil de Greenwich (GCT) a Hora Media de Greenwich (GMT).

En España se publica el almanaque náutico con suplemento para la Navegación Aérea.

3.3.5. Uso de sextantes en viajes espaciales

El sextante marino convencional es un dispositivo para medir el ángulo entre un cuerpo celeste y el horizonte marino. En el sextante de burbuja con su horizonte artificial, el horizonte marino real y el cuerpo de interés se ven en la vista telescópica del sextante marino. Esta característica lo adapta de forma natural a la tarea de avistamiento de la navegación espacial de determinar el ángulo entre las líneas de visión de dos objetos celestes.

¹²⁷Seidelmann y Hohenkerk, 2020.

Durante los primeros vuelos espaciales se utilizó un sextante diseñado especialmente para esos fines. En el espacio no existe el concepto horizontal ni vertical. Por ello, el instrumento fue diseñado para medir los ángulos entre los bordes de la tierra o el ángulo entre los cuerpos celestes para determinar la posición de la nave en el espacio.



Figura 3.15: El sextante del Apolo se utilizó en la órbita terrestre y lunar, así como en el trayecto entre la Tierra y la Luna. Desempeñaba diferentes funciones en cada uno de esos contextos: en órbita alrededor de la Tierra o de la Luna, el sextante podía utilizarse para calcular la altitud y la posición de la nave; mientras que en tránsito entre la Tierra y la Luna, podía utilizarse para calcular la actitud (orientación), la posición y la velocidad de la nave. Una actitud adecuada durante el vuelo de ida y vuelta a la Luna era fundamental para realizar correcciones de rumbo y quemados precisos para llegar a la Luna e insertar correctamente la nave en la órbita lunar deseada. Fuente: NASA.

A bordo del Apolo, el sistema desarrollado por Charles Draper ¹²⁸ en el *Massachusetts Institute of Technology Instrumentation Laboratory* estaba

¹²⁸Draper es una figura pionera en la ingeniería aeroespacial, contribuyó al guiado inercial

basado en un ordenador, una plataforma inercial e instrumentos ópticos¹²⁹. El sistema tenía dos líneas de vista, una fija, orientada hacia el borde de la Tierra o la Luna, y otra móvil hacia una estrella. El ángulo entre los dos se alimentaba directamente a la computadora de vuelo que lo utilizaba en el cálculo del vector de posición de la nave y comprobar si la órbita seguida era la correcta. Si no era así, deberían corregir la trayectoria de la nave. Las medidas del sistema óptico se utilizaban también para corregir la deriva del sistema inercial, comprobar el apuntamiento correcto de la aeronave antes de la ignición de los motores en el espacio. Para corregir la deriva de la plataforma inercial, era únicamente necesario apuntar el sextante a dos estrellas conocidas, donde la computadora de a bordo conocía cuánto debería ser el valor del ángulo frente al medido, y efectuaba el alineamiento necesario¹³⁰. En la memoria de la computadora del Apollo se introdujeron 37 estrellas, distribuidas de modo uniforme por el firmamento. Algunas de ellas eran muy poco brillantes, debido a que las estrellas brillantes no se distribuyen de manera uniforme en la bóveda celeste y se primaba que se pudiese encontrar una estrella para orientarse independientemente de la actitud de la nave.

Aunque aún faltan años para las misiones tripuladas a la Luna o incluso a Marte, parece probable que los futuros astronautas que viajen a estos destinos hagan bien en llevar un sextante, dada la precisión, la facilidad de uso y el valor de este dispositivo, además de cualquier otra tecnología que lleven consigo.

de misiles balísticos y al programa espacial Apolo con sus conocimientos sobre sistemas de guiado. En 1932, Draper, como profesor de aeronáutica en el MIT, fundó un laboratorio de enseñanza para desarrollar la instrumentación necesaria para el seguimiento, el control y la navegación de los aviones. El laboratorio fue rebautizado en honor a su fundador en 1970 y siguió formando parte del MIT hasta 1973, cuando se convirtió en una fundación independiente de investigación y desarrollo, sin ánimo de lucro. El laboratorio contribuyó al desarrollo de sensores inerciales, software y otros sistemas para el guiado, la navegación y el control de aviones comerciales y militares, submarinos, misiles estratégicos y tácticos, naves espaciales, la estación espacial internacional, drones y vehículos sin tripulación.

¹²⁹Woods, 2011.

¹³⁰Con el abaratamiento de las computadoras y su integración en todo tipo de aparatos, este concepto de alineamiento simplemente apuntando a dos estrellas es ahora familiar para los astrónomos aficionados que usan un telescopio electrónico, más de cincuenta años después de que fuese implementado por la NASA en el Apollo

3.4. Interludio: la navegación en los grandes raids

Los grandes raids que ocurrieron en torno a la segunda década del siglo pasado demuestran la rápida evolución de los sistemas de navegación. A medida que las características de las aeronaves permitían vuelos de mayor autonomía, la necesidad de sistemas de navegación más precisos se hizo perentoria.

El año 1919 se caracterizó por un buen número de raids protagonizados por italianos, franceses, ingleses y norteamericanos. El primer cruce del atlántico sin paradas fue realizado en 1919 por los británicos Alcock y Brown a bordo de un Vickers Vimy de la primera guerra mundial. El instrumento de navegación principal a bordo fue un sextante marino modificado, en el que se incorporó ya un nivel de burbuja tipo Abney, pero con el que únicamente pudieron tomar tres observaciones en un vuelo de 72 horas¹³¹.

El ya mencionado primer vuelo sobre el atlántico sur de Coutinho en 1922, contaba con un sextante diseñado por el futuro almirante. También tenían tablas reducidas especialmente preparadas para conocer su posición a partir de observaciones y un calculador gráfico para conocer su deriva¹³². Coutinho tuvo buen tiempo durante todo el vuelo y afirmó conocer su posición en todo momento de modo continuo con un error de 4 o 5 millas, sobrevolando intencionadamente por ejemplo las rocas de san Pedro y Pablo, meros islotes en medio del océano. Fue un ejemplo de navegación eficiente¹³³.

Cabe mencionar aquí la gran hazaña de la aviación española en estos años. El hidroavión tipo Dornier Wall, bautizado como *Plus Ultra*, despegó en enero de 1926 rumbo a Buenos Aires desde palos de Moguer, el mismo lugar desde donde partió Cristobal Colón. Completó el vuelo en 59 horas y 30 minutos. El objetivo del raid, en siete etapas, no sólo era batir el récord del mundo de distancia recorrida por escalas, sino además abrir una línea de correo veloz a través del Atlántico. El equipo de navegación mencionado en la memoria incluía las brújulas, radio y un radiogoniómetro con sus antenas, derivómetro y botes de humo con potasio para observar la deriva. El comandante aviador Ramón Franco llevaba a bordo un sextante de precisión, y en varias ocasiones tomó alturas del sol al mediodía, para determinar la latitud, pero Franco, que era un experto piloto, con los derivómetros navegaba con precisión a la estima, ayudado con las tablas de deriva que había confeccionado previamente. Sin embargo el radiogoniómetro les salvó en más de una

¹³¹Hayward, 2009.

¹³²Silva et al. 2016.

¹³³Weems et al. 1937.

ocasión, como en la llegada a Cabo Verde con baja visibilidad. De no ser por este instrumento, lo más probable es que hubiesen pasado por encima del archipiélago y no hubiesen podido repostar. El Plus Ultra, ver figura 3.16, fue un pionero de la navegación con la ayuda de las ondas de radio sobre el Atlántico Sur.



Figura 3.16: El 22 de enero de 1926, el Plus Ultra acuatizaba en Buenos Aires, ante la sorpresa de miles de porteños. Fuente: AP Press.

Tanto el vuelo de Coutinho como el del Plus Ultra demostraron la utilidad de estos dos sistemas de navegación aérea, la astronómica y la radioeléctrica. En la carrera Dole desde San Francisco a Honolulu en 1927, el navegador Davis usó una combinación de radio y navegación celestial para llegar a su destino. En 1933 los Lindbergh cruzaron el atlántico sur también con una combinación de navegación a la estima, radio y navegación celestial.

3.5. Historia de la radionavegación

La instalación generalizada de sistemas de radionavegación -iniciada tímidamente en la década de 1910 pero muy acelerada en la de 1940- tuvo un profundo impacto en la organización de las redes de transporte, las reivindicaciones territoriales nacionales e incluso la distinción geográfica básica entre la tierra y el agua. Los sistemas de radionavegación, como muchos otros artefactos intangibles, no sólo tienen una política, sino que también comparten una lógica geográfica y temporal particular. Rastrear los flujos y reflujos

históricos de esta lógica es crucial para entender la aparición de nuevas formas de poder geográfico en el siglo XX que se extienden a la navegación por satélite.

El primer impacto de la radio en la navegación, como ya se ha comentado, fue el proveer a los aviones de información horaria de precisión, para complementar y actualizar a los sistemas de abordaje empleados por los navegadores. La Marina norteamericana instaló en 1913 en Virginia unas grandes antenas que emitían el GMT a través de la radio en alta frecuencia, que se podía emplear para calibrar los cronómetros de abordaje en barcos y aviones situados a grandes distancias. El fenómeno de reflexión de la ionosfera, introducía retrasos variables, que los marinos y aviadores aprendieron a calcular.

Una segunda aplicación más innovadora de la señal de radio fue utilizarla como una extensión de la navegación clásica, y particularmente de los faros marinos. Una estación de radio emitiendo desde un punto fijo puede utilizarse como un faro en tierra para un vehículo móvil. Si se dota al vehículo de una antena de lazo, un radiogoniómetro, y haciéndola girar hasta que la señal casi desaparezca, puede encontrarse la dirección en la que se encuentra el emisor. Estos sistemas, predecesores de los sistemas VOR¹³⁴, permitieron establecer rutas aéreas de larga distancia si bien consistentes en tramos rectos de una estación a otra, resultando en tiempos de vuelo más largos, pero ganándose en fiabilidad a un coste razonablemente bajo.

Como se verá, el papel de la radionavegación en la construcción de un nuevo tipo de geografía transnacional se caracteriza más por la integración espacial de la tierra, el aire y el océano, que por una integración cultural o económica entre países. De hecho, hubo una dinámica histórica en forma de alineación espacial y política a gran escala que tuvo lugar en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial entre una colección heterogénea de grupos de usuarios de la radionavegación, cada uno de los cuales perseguía sus propias soluciones tecnológicas. En la década de 1960 ya existía una infraestructura electromagnética robusta y transnacional. Podemos decir que el mayor contraste no es entre la época actual de los satélites y la anterior a ellos, sino entre la lógica radiofónica de los años 30 y la era de los sistemas de cuadrículas que cruzan las fronteras, que comenzó a principios de los años 40.

¹³⁴Tras la segunda guerra mundial, se desarrollaron los sistemas VOR, acrónimo de Very High Frequency Omnidirectional Range, emisores radio localizados en puntos fijos en tierra a lo largo de las principales rutas aéreas. El VOR permanece en uso en la actualidad.

3.5.1. Modelos iniciales europeo y americano

Antes de la Segunda Guerra Mundial, había dos enfoques principales para la radionavegación. Los viajes aéreos en Estados Unidos se basaban en un sistema punto a punto llamado *Radio Range*, mientras que la navegación en Europa utilizaba un sistema de detección de la dirección¹³⁵, o *Radio Direction Finding, D/F*. Se puede decir que no se trata sólo de soluciones tecnológicas diferentes, sino también de formas distintas de entender la física de las ondas de radio¹³⁶.

La radiogoniometría creaba trayectorias estables que se veían explícitamente como una especie de ferrocarril aéreo, con el establecimiento de aerovías, mientras que la D/F tenía mucho en común con la lógica náutica de los faros. La materialización de estas dos analogías -el ferrocarril y el faro- implicaban diferentes objetivos prácticos y diferentes formas de hacer de la aviación una industria civil estable y fiable.

El periodo de entreguerras se caracterizó, pues, por dos concepciones muy opuestas de la organización del espacio por radio. Los Estados Unidos estaban atravesados por haces de luz similares a los del ferrocarril que definían rutas estables como parte de un proyecto de consolidación nacional, mientras que Europa Occidental estaba salpicada de faros que permitían una navegación flexible a través de las fronteras internacionales. Las dos estrategias radioeléctricas de Estados Unidos y Europa participaban así en dos proyectos políticos y geográficos muy diferentes. El *Radio Range*, de tipo ferroviario, era un proyecto de consolidación territorial, de servicios domésticos. En cambio, el D/F, de tipo faro, formaba parte de un amplio debate sobre la coordinación internacional y los límites de la soberanía, más en consonancia con la fragmentación de los estados europeos. Eran respuestas a diferentes geografías políticas, diferentes estrategias de apoyo estatal e incluso diferentes tipos de aviones. A finales de la década de 1930 había indicios de que esta clara distinción podría desaparecer gradualmente.

Donde quiera que apareciera el *Radio Range*, se invocaba la metáfora del ferrocarril para subrayar la importancia de las instalaciones terrestres; su aplicación más directa era la idea de una vía aérea. El argumento implícito era que el servicio aéreo regular no era tan sencillo como volar del punto A al punto B, sino que requería vías estables compuestas por elementos como radiofaros, reflectores giratorios, instalaciones meteorológicas, aeródromos de emergencia, puestos de reabastecimiento y estaciones de telegrafía inalámbrica. En consecuencia, la política de la analogía del ferrocarril se alineó con el patrocinio estatal del apoyo en tierra y los intentos gubernamentales explíci-

¹³⁵Murphy y Wolfe, 1926.

¹³⁶Rankin, 2014.

tos de establecer nuevos vínculos comerciales y administrativos. En Francia, por ejemplo, los expertos en aviación tomaron prestado el vocabulario del ferrocarril al argumentar a favor del apoyo estatal para las señales, los servicios meteorológicos y la adquisición de terrenos. A la hora de hacer recuentos del progreso de la aviación en diversos países, la unidad de comparación habitual era, siguiendo la tradición del ferrocarril, los kilómetros de vías aéreas. La vía aérea, en otras palabras, era a estos efectos una construcción física. Ajustando la potencia y la orientación de las transmisiones direccionales¹³⁷, se tenían zonas de equiseñal que podían apuntarse en casi cualquier dirección. Se podían encadenar múltiples haces para formar una vía aérea estable, con cada antena situada normalmente cerca de un aeródromo.

El Radio Alcance fue un proyecto nacionalizador. Su desarrollo fue patrocinado en su totalidad por el gobierno de Estados Unidos, y el objetivo era crear una red nacional de vías aéreas para los servicios internos, especialmente el correo aéreo y la aviación militar nacional. Fue diseñado en la década de 1920 por ingenieros de la Oficina Nacional de Estándares y del Cuerpo Aéreo del Ejército, con financiación procedente primero del Servicio Aéreo del Ejército y luego del Departamento de Comercio. Una de las principales características del Radio Range era que el único equipo necesario en el avión era un simple receptor de radio; ni siquiera se necesitaba un transmisor. Esto era especialmente importante a mediados de la década de 1920, ya que el reparto del correo aéreo -el primer uso civil importante de la aviación en Estados Unidos después de la Primera Guerra Mundial- estaba pasando de ser operado directamente por el gobierno a ser volado por contrato, y los aviones privados utilizados eran generalmente pequeños y baratos. El Radio Range fue así una forma de subvencionar estas rutas: sus diseñadores explicaron que la complejidad y el coste están en el aparato en tierra mantenido por el Gobierno.

Este equilibrio entre lo público y lo privado volvió a seguir de cerca el precedente del ferrocarril, ya que en ambos casos se utilizó el correo para hacer más viable económicamente el servicio de pasajeros. Como servicio gubernamental y estrategia de consolidación nacional, el Radio Range tuvo un éxito notable, y la red de Radio Range definió la aviación estadounidense durante décadas. Se instaló por primera vez en las líneas aéreas hacia 1929, empezando por la Transcontinental. En 1933 había ochenta y dos estaciones de Radio Range en funcionamiento, ver figura 3.17; a finales de la década había más de 250 que cubrían Estados Unidos, con rutas que a menudo seguían de cerca las líneas ferroviarias existentes. En su punto álgido, hacia 1950, la red incluía casi 400 estaciones, la última de las cuales no se apagó

¹³⁷Murphy y Wolfe, 1926.

hasta 1974. Pero incluso cuando el propio Radio Range quedó obsoleto y fue sustituido gradualmente por su sucesor, el más flexible y fiable sistema VHF Omni-Range, VOR, el control del tráfico aéreo estadounidense continuó estructurado como una red lineal de rutas de radio estables.

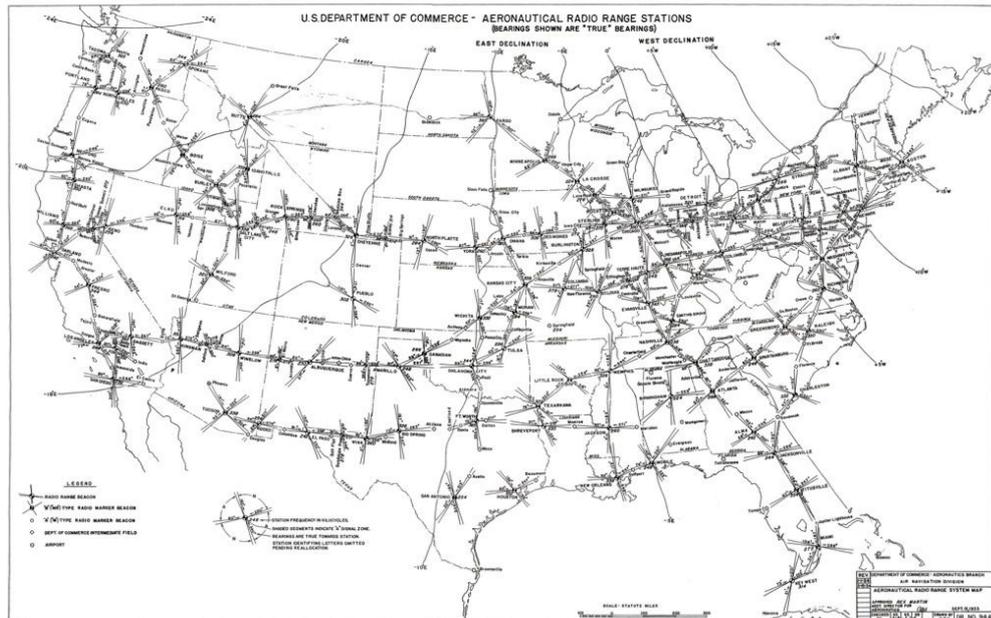


Figura 3.17: A mediados de la década de 1930, el gobierno estadounidense estableció una red de torres de radio de navegación aérea en todo el país, a lo largo de rutas aéreas muy transitadas, las aerovías. El mapa de arriba muestra la extensión del sistema en 1933. Se ideó un sistema que permitía a un piloto navegar con bastante precisión a lo largo de un estrecho "haz", utilizando sólo un receptor de radio básico para escuchar sonidos simples - a través de un altavoz o auriculares- para obtener pistas de localización y orientación. Fuente: US Department of Commerce.

Como su nombre indica, los equipos de radiogoniometría simplemente indican la dirección de una fuente de radio; funcionan aprovechando las propiedades de recepción direccional de ciertos tipos de antenas. Con una antena de anillo, por ejemplo, la señal de una fuente de radio distante será mayor cuando la antena esté alineada de canto con la transmisión y será mínima cuando el anillo abierto esté orientado hacia la fuente; la dirección se puede encontrar simplemente girando la antena, ver figura 3.18.

En el caso de los aviones, este principio se convirtió en un sistema de navegación mediante la creación de una red de estaciones radiogoniométricas

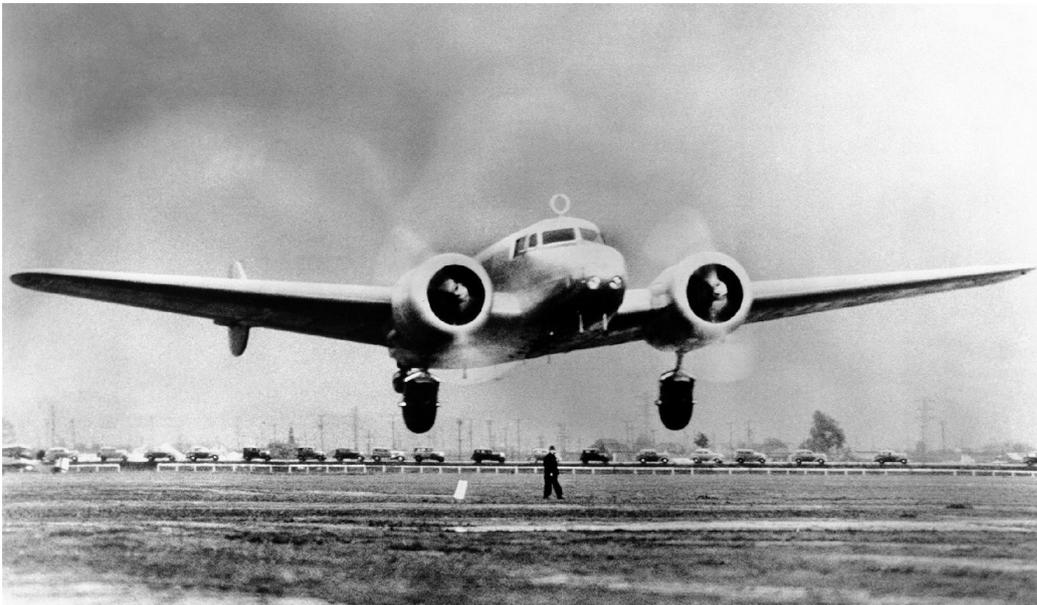


Figura 3.18: Avión Lockheed *Electra* 10E. Pilotado por Amelia Earhart en su fallido vuelo alrededor del mundo en 1937. La antena circular del goniómetro es claramente visible en la parte superior delantera del fuselaje. (Foto. AP press)

en tierra que podían seguir las transmisiones de los aviones que los sobrevolaban. Un piloto simplemente usaba un radioteléfono o telegrafía inalámbrica para pedir a las estaciones de tierra lecturas D/F de su transmisión. El personal de estas estaciones -al menos dos, pero normalmente tres- se coordinaba entre sí para combinar sus lecturas y luego enviaba por radio el resultado al piloto en la forma que le resultara más conveniente.

El uso de la radiogoniometría en la aviación se derivó directamente del precedente marino, y los mismos sistemas se utilizaron tanto en el mar como en el aire. Los primeros experimentos de radiogoniometría se remontan a la década de 1890 y principios de 1900, antes de que los hermanos Wright realizaran su primer vuelo, y las primeras estaciones de radiogoniometría se establecieron para el transporte marítimo a principios de la década de 1910. La Oficina de Correos británica inició un servicio de D/F costero en 1912, y también se instalaron equipos autónomos en grandes buques como el *Mauritania*. El primer uso de D/F en la aviación se produjo durante la Primera Guerra Mundial, cuando Alemania utilizó estaciones terrestres para dirigir no sólo sus buques de guerra y submarinos, sino también sus Zeppelines; los Aliados, a su vez, instalaron una red de estaciones de D/F en Gran Bretaña y el norte de Francia para rastrear la flota alemana y derribar los dirigibles. In-

cluso el método básico utilizado para coordinar las lecturas de D/F tenía un sabor oceánico: El personal de tierra de D/F solía combinar múltiples rumbos dibujando líneas de intersección en un mapa, exactamente de la misma manera que se enseñaba a los navegantes a utilizar los faros para determinar su ubicación en el mar. El crecimiento de la red europea de D/F fue más o menos paralelo a la expansión de la Red de Radiocomunicaciones, pero tanto su geografía como su estructura eran irreductiblemente internacionales. Aunque los servicios marítimos se instalaron tanto en Europa como en Norteamérica poco después de la Primera Guerra Mundial, la red aeronáutica europea no se organizó hasta finales de los años 20, principalmente para facilitar los viajes a través del Canal de la Mancha. En 1938 había aproximadamente un centenar de estaciones aeronáuticas en toda Europa. Cada estación estaba financiada por su país anfitrión, los equipos de D/F y los protocolos de comunicación -junto con los mapas y demás parafernalia de navegación- estaban regulados por la Comisión Internacional de Navegación Aérea, una organización internacional asociada a la Sociedad de Naciones que no incluía a Estados Unidos.

La tecnología de la radiogoniometría y el nuevo medio de transporte suscitó controversias políticas y legales sobre conceptos como el derecho de paso y la soberanía nacional, en la que eran frecuentemente considerados como equivalentes la navegación oceánica y la navegación aérea. Especialmente antes de la Primera Guerra Mundial, las analogías oceánicas aparecían ampliamente en los debates jurídicos sobre la extensión de la soberanía territorial al espacio aéreo de un país, y los defensores de la libertad del aire invocaban el antiguo derecho de paso inocente de los barcos por las aguas territoriales. Pero incluso después de que las conversaciones de paz de 1919 resolvieran definitivamente la cuestión a favor del control soberano total, las cuestiones sobre las libertades inherentes a la aviación civil siguieron debatiéndose hasta bien entrada la década de 1950, y Hugo Grotius¹³⁸, el teórico de las aguas internacionales del siglo XVII, siguió siendo citado en los argumentos sobre la competencia sin restricciones, los derechos de cabotaje y el potencial de espionaje militar por parte de los aviones que sobrevolaban.

La tecnología de radiogoniometría canalizó gran parte de esta discusión; provocó debates sobre la autonomía de los pilotos y se basó más en la estandarización internacional que en la construcción patrocinada por los distintos estados.

Los ingenieros europeos sí empezaron a adoptar la tecnología americana de rayos, especialmente como equipo de aterrizaje en condiciones de mala visibilidad en pistas individuales, y los reguladores americanos empezaron a

¹³⁸J. Miller, 2021.

exigir que los aviones estadounidenses llevaran equipos D/F. El sistema que acabaría sustituyendo al Radio Range también se presentó tanto en Estados Unidos como en Europa como un interesante compromiso entre las trayectorias fijas y el vuelo libre. Sin embargo, esta incipiente convergencia se desvió bruscamente con el inicio de la guerra, y en lugar de una estabilización gradual de las técnicas de radio, la década de 1940 vio el advenimiento de varias estrategias tecnológicas nuevas¹³⁹.

3.5.2. Radionavegación en la segunda guerra mundial

La Segunda Guerra Mundial provocó una rápida reconsideración de las técnicas de radionavegación. Tanto el D/F como el Radio Alcance siguieron utilizándose ampliamente, pero también hubo un desarrollo y experimentación de nuevos sistemas. Al menos una docena fueron iniciados por Estados Unidos y el Reino Unido, mientras que no menos de veinticinco fueron perseguidos por Alemania. Sin embargo, casi ninguno fue desarrollado por Japón, Italia u otros países. Similar al caso del desarrollo de los métodos ópticos, ver la sección 3.3.1, Estados Unidos, Reino Unido y Alemania fueron los países más innovadores.

Como es lógico, estos sistemas desarrollados en condiciones de emergencia, rara vez estuvieron a la altura de las expectativas de los ingenieros o de la retórica de posguerra, pero la confrontación entre los nuevos sistemas tecnológicos y las realidades de la guerra provocó cambios significativos en la geografía política de la radio.

Las estrategias de radionavegación en tiempos de guerra pueden dividirse en tres tipos, cada uno con una lógica geográfica y una trayectoria de posguerra diferentes. Las dos primeras eran principalmente ofensivas y se utilizaron ampliamente para el bombardeo a ciegas; se trata de los *sistemas de rayos cruzados* desplegados por Alemania y los *sistemas de medición de distancias* desarrollados principalmente por los Aliados. El tercer tipo de radionavegación era una nueva clase de *sistemas de navegación de área de cuadrícula* que creaba por primera vez un entramado de coordenadas electrónicas en el espacio aéreo.

Estos tres sistemas se utilizaban para la navegación básica y no superaban ningún límite de precisión, pero su función de apoyo era bastante importante. Ninguna de estas tres técnicas funcionó del todo como estaba previsto; las dos últimas, sin embargo, acabaron dando lugar a nuevos proyectos geográficos.

Los sistemas de medición de distancias, aunque nunca fueron la panacea de los bombardeos, se adoptaron rápidamente para su uso en la prospección

¹³⁹Rankin, 2014.

y el reconocimiento en tiempos de guerra, con el resultado de que la radio pasó a ser vista como una vara de medir de precisión de una longitud y exactitud sin precedentes. Los sistemas de navegación de área, a su vez, eran un nuevo tipo de infraestructura radioeléctrica que combinaba la presencia del radiofaro con la flexibilidad del D/F, es decir los sistemas desarrollados anteriormente. Siguiendo la metáfora de la cuadrícula, estos sistemas de coordenadas acabaron siendo tratados como una característica semi-permanente, incluso políticamente neutral, del paisaje, con escala transnacional, y que pervivieron tras la postguerra.

Los sistemas alemanes de rayos cruzados son quizás la tecnología de navegación más conocida de la guerra; eran conceptualmente bastante simples y desempeñaron un papel dramático en las primeras batallas aéreas. Estos haces se presentaban en varias variedades -los más conocidos eran el *Knickebein* y el *X-Gerät*¹⁴⁰- pero todos ellos utilizaban principios similares al Radio Alcance. Los transmisores alemanes se instalaban a lo largo de la costa oeste de Europa y los haces estrechos se dirigían a cruzarse sobre varios objetivos en Inglaterra. En los primeros meses de la guerra estos haces fueron responsables de una destrucción sin precedentes como el bombardeo sorpresa de Coventry en noviembre de 1940, que fue especialmente horrible. Sin embargo, por muy espectaculares que fueran estos sistemas de rayos, fueron desactivados con relativa rapidez por las contramedidas británicas ¹⁴¹.

El segundo tipo de radionavegación -basado en la medición precisa de distancias- era más versátil, pero también tuvo problemas para cumplir las expectativas, al menos en el plano ofensivo. La lógica era similar a la del radar, salvo que en lugar de una estación terrestre que emitía señales pulsantes para medir la distancia a un objeto desconocido, se instalaban equipos de radar tanto en tierra como en el avión. De este modo, la distancia entre el avión y la estación terrestre podía conocerse a bordo del avión y utilizarse para un bombardeo de precisión. Alemania combinó esta técnica con sus haces direccionales para crear dos sistemas -el Y-Gerat y el Egon- que podían proporcionar tanto la dirección como la distancia desde una única estación

¹⁴⁰Bleaney, 1998.

¹⁴¹Los aliados instalaron a bordo de aviones unos transmisores que facilitaba a los alemanes unas señales ampliadas artificialmente, los navegantes alemanes se encontraban desconcertados, unas veces el aviso de arrojar bombas llegaba demasiado pronto o demasiado tarde. Además mediante una interpretación de la señal y de su dirección, los ingleses podían determinar sobre el mapa el rumbo, la hora y la altura de las oleadas de bombarderos. Había tiempo para enviar cazas contra las formaciones enemigas y para avisar a la población civil para que acudieran a los refugios. Los rayos originales eran ya esencialmente inútiles a principios de 1941, mientras que los sistemas más avanzados desplegados por Alemania en 1942 fueron neutralizados incluso antes de ser encendidos. De hecho, es precisamente la inflexibilidad de los haces lo que los ha hecho tan conocidos.

en tierra. Sin embargo, al igual que los sistemas de haces, fueron rápidamente desactivados.

Los sistemas de distancias británico y estadounidense -conocidos como *Oboe* y *Shoran*, respectivamente- se diseñaron utilizando dos estaciones terrestres diferentes. Un bombardero volaba a una distancia constante de un transmisor y luego lanzaba sus bombas a una distancia predeterminada del segundo transmisor. En circunstancias ideales, el rendimiento de estos sistemas era bastante impresionante. Oboe podía colocar bombas dentro de un círculo de sólo unos cientos de metros de diámetro, y uno de los primeros usos de Shoran fue destruir puentes en el norte de Italia.

El tercer tipo -sistemas de navegación de área basados en coordenadas, como el GEE¹⁴²- no estaba exento de fallos técnicos, pero era mucho más fácil de desplegar en masa que cualquiera de los sistemas de bombardeo a ciegas.

Gee fue el primer sistema de tipo *hiperbólico*. Su debut en marzo de 1942 envió a los bombarderos británicos a destruir Essen. Un sistema alemán conocido como Sonne entró en funcionamiento en junio, y el sistema Loran de Estados Unidos comenzó a transmitir en octubre. Un segundo sistema británico -denominado QM durante la guerra, pero posteriormente llamado Decca Navigator por su patrocinador original, Decca Records- estuvo listo justo a tiempo para el desembarco del Día D. Estos sistemas eran menos precisos que los de bombardeo a ciegas, pero solían ser más fiables y cubrían zonas mucho más amplias. El Gee abarcaba desde el norte de Escocia hasta Túnez; fue utilizado no sólo por los británicos, sino también por todas las fuerzas estadounidenses en Europa. Sonne cubría casi toda Europa occidental y se estaba ampliando hacia el este. Los receptores Loran, ver figura 3.19, -se construyeron más de 75.000 durante la guerra- se utilizaron en todos los grandes escenarios.

Desde el punto de vista tecnológico, había dos enfoques para crear estas redes electrónicas. Los sistemas de los Aliados -Gee, Loran y Decca- se basaban en mediciones de tiempo/distancia, también similares a las del radar. Pero en lugar de medir el tiempo de retardo de ida y vuelta entre un solo

¹⁴²Gee, a veces escrito GEE, fue un sistema de radionavegación utilizado por la Real Fuerza Aérea durante la Segunda Guerra Mundial. Medía el tiempo de retardo entre dos señales de radio para producir un punto fijo, con una precisión del orden de unos cientos de metros a distancias de hasta 500 km. Fue el primer sistema de navegación hiperbólica que se utilizó operativamente, entrando en servicio con el Mando de Bombarderos de la RAF en 1942. Fue patrocinado por primera vez en junio de 1940, cuando el Mando de Bombarderos británico se dirigió al Telecommunications Research Establishment, el principal laboratorio de radares británico, en busca de un remedio para su pésimo rendimiento en los bombardeos.

transmisor y un receptor, la medida importante era la diferencia en el tiempo de retardo de dos señales enviadas desde dos transmisores coordinados. Debido a la forma de las líneas de la red, esta técnica se conoció genéricamente como navegación hiperbólica ¹⁴³.

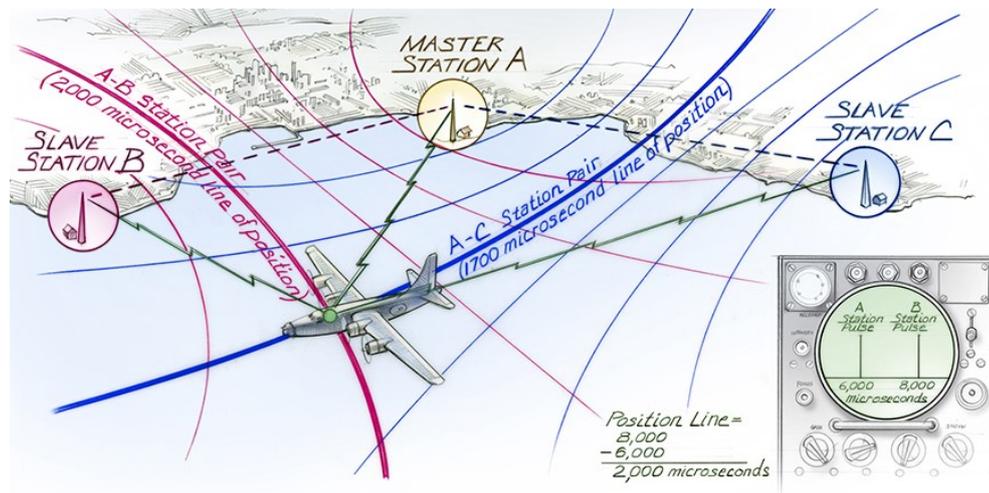


Figura 3.19: El sistema Loran permitía a los barcos y a las aeronaves determinar su posición a larga distancia. El sistema requería al menos tres estaciones transmisoras para cada cadena, y el observador utilizaba un receptor Loran especial. Una cadena estaba formada por una estación maestra y dos esclavas. Las diferencias en el tiempo de llegada de los impulsos de un par de estaciones se medían y se mostraban en la cara de un tubo de rayos catódicos. Cada fijación requería dos observaciones y la operación duraba normalmente unos cinco minutos. A continuación, las lecturas se transponían a una carta Loran y se podía trazar la posición. En algunos casos, las lecturas se referenciaban a tablas Loran especiales. Fuente: Museo Nacional del Aire y del Espacio, EEUU.

Por el contrario, el sistema alemán Sonne fue una evolución directa de los anteriores sistemas de haces. La principal diferencia es que, en lugar de los haces estáticos que definen trayectorias fijas, los haces de Sonne giraban lentamente. Esto significaba que un usuario que escuchara con los auriculares oiría periódicamente un tono de identificación de la estación, luego una serie de guiones, el tono constante del haz al pasar, y finalmente una serie de puntos. El simple recuento del número de guiones y puntos podía dar una medida notablemente precisa de la dirección de la estación. Para crear un

¹⁴³Una hipérbola es el lugar geométrico de los puntos del plano cuya diferencia de distancias a dos puntos fijos llamados focos es constante

referencia que pudiera ser utilizada como sistema común por todos los aviones a la vez. Los demás sistemas fueron impulsados por necesidades similares y entendidos en términos parecidos.

El Loran, ver figura 3.21, -diseñado en el Rad Lab, pero derivado en gran medida del Gee- era necesario para ayudar a los convoyes aliados a cruzar el Atlántico Norte. El Sonne, por su parte, se utilizó por primera vez para la navegación de los submarinos en la costa occidental de Francia, y el Decca obtuvo el patrocinio de la marina británica a mediados de 1941 para el rastreo de minas en alta mar y la cartografía en el Canal de la Mancha.

Lo que se necesitaba era una forma de superponer una infraestructura legible sobre una extensión grande de agua. La tendencia de estas cuadrículas hacia la estabilidad geográfica se aprecia mejor en el contraste entre Gee y los otros tres sistemas. En su mayor parte, el despliegue de Sonne, Loran y Decca fue esencialmente acumulativo. Se construyeron estaciones que permanecieron en su lugar, y se utilizaron las mismas coordenadas y mapas durante toda la guerra. Gee, sin embargo, fue diseñado para ser reconfigurado con el tiempo. Casi inmediatamente después de que los británicos descubrieran la existencia de Sonne a finales de 1943, se sugirió que en lugar de destruir los transmisores enemigos, sería mejor encontrar su ubicación precisa para que los británicos pudieran reutilizar las señales. Si Sonne ayudaba a los submarinos alemanes a cazar a los barcos aliados, entonces el sistema -rebautizado como Consol- ayudaría a su vez a los aliados a cazar a los submarinos. A medida que avanzaba la guerra, los británicos se esforzaron por mantener el Sonne/Consol. Por ejemplo, cuando los alemanes modificaron uno de sus transmisores para que dejara de dar cobertura sobre territorio alemán, fue rápidamente bombardeado por el Reino Unido, y posteriormente reconstruido en su configuración original. Y cuando la estación en Arneiro, Lugo, España, empezó a tener problemas de mantenimiento, fueron los británicos quienes suministraron las piezas de repuesto ¹⁴⁵.

En la década de 1930, el desarrollo del radar exigía dispositivos que pudieran medir con precisión este tipo de señales. En octubre de 1937, Dippy, que trabajaba en el laboratorio de radar de Robert Watson-Watt en la RAF de Bawdsey (Suffolk), propuso utilizar dos transmisores sincronizados como base para un sistema de aterrizaje a ciegas. Una vez iniciada la guerra, los planes de la campaña de bombardeo de la RAF se torcieron rápidamente, los bombarderos se mostraron extremadamente vulnerables tanto al fuego de tierra como a los cazas que los atacaban y se decidió que el mejor curso de acción era el bombardeo nocturno. Esto planteó la necesidad de mejorar las ayudas para el aterrizaje y para la navegación nocturna en general. Dippy perfeccionó su sistema para este fin, y presentó formalmente una nueva propuesta en junio de 1940.

¹⁴⁵Las llamadas Torres de Arneiro fueron un sistema de radionavegación compuesto por tres torres montadas por personal alemán en las parroquias lucenses de Arneiro y Momán, término municipal de Cospeito.

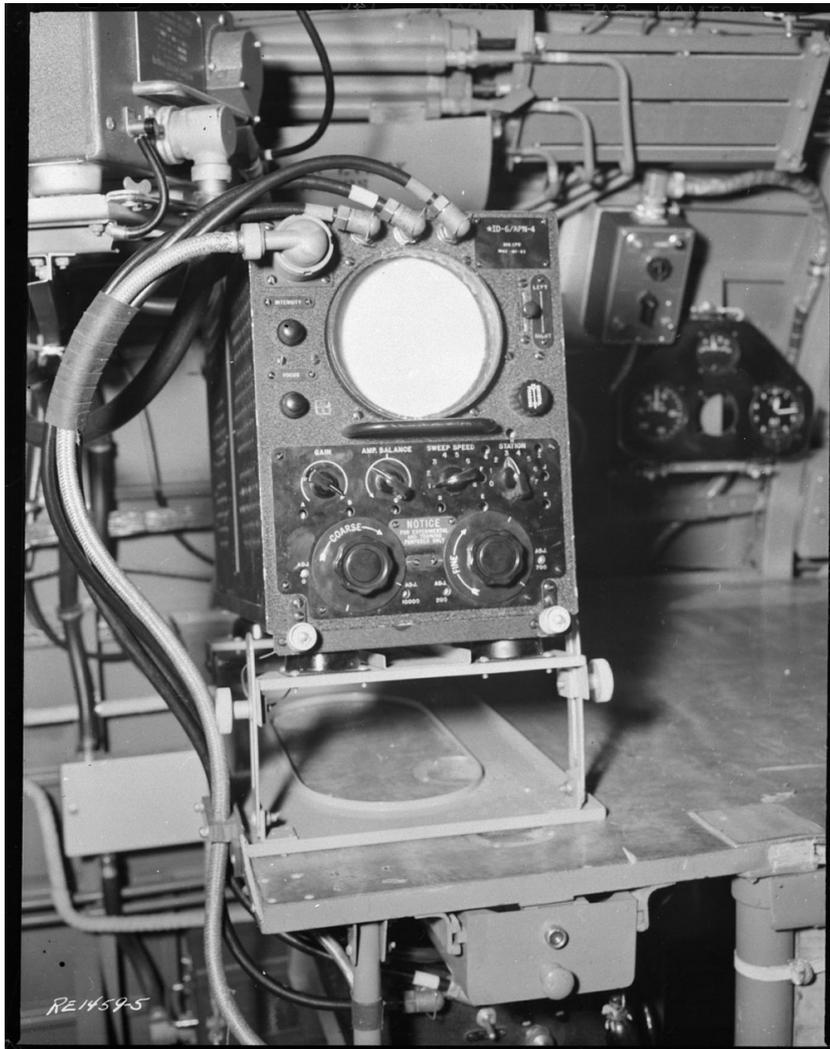


Figura 3.21: Receptor LORAN, del inglés LOng RAnge Navigation, empleado en la segunda guerra mundial para la navegación de largo alcance. Es un sistema de ayuda a la navegación electrónico hiperbólico que utiliza el intervalo transcurrido entre la recepción de señales de radio transmitidas desde tres o más transmisores para determinar la posición del receptor (Fuente: Royal Canadian Air Force)

Los alemanes acabaron llegando a una conclusión similar con Gee. Aunque empezaron a interferir las transmisiones del Gee sobre Alemania poco después de descubrir el sistema en agosto de 1942, los británicos desarrollaron posteriormente contramedidas contra las interferencias y habían restaurado en gran medida el sistema para su pleno uso a mediados del año siguiente. Sin

embargo, a partir de finales de 1943, los alemanes invirtieron su estrategia y empezaron a tomar medidas para explotar el sistema para su propio uso, incluyendo la fabricación de más de mil receptores propios y la construcción de nuevas estaciones terrestres en Polonia y el oeste de Rusia. Tanto Gran Bretaña como Alemania continuaron desplegando contramedidas siempre que era posible, pero al final de la guerra dichas medidas eran cada vez más selectivas ¹⁴⁶.

El efecto obvio de la guerra fue que la radionavegación se reinventó como una forma de proyectar la geografía en áreas más allá de los límites tradicionales del control territorial. Los haces alemanes, los sistemas de medición aliados y las rejillas electrónicas fueron todos medios para este objetivo invasivo, y todos estos sistemas ignoraron la dicotomía nacional/internacional que había estructurado en el periodo de entreguerras la distinción entre el Radio Alcance y el D/F.

Al mismo tiempo, sin embargo, es difícil distinguir claramente los objetivos militares de los no militares. Por ejemplo, no había una línea clara entre el reconocimiento en tiempos de guerra y la cartografía de posguerra: los mismos sistemas se utilizaron de la misma manera tanto antes como después de 1945. Ya en 1943, se convocaron conferencias en toda la Commonwealth para posicionar el Gee y otros sistemas británicos como tecnologías civiles para la navegación y la aviación comercial. Los diseñadores de Loran hicieron movimientos similares, y la Armada estadounidense, por ejemplo, publicó un folleto justo antes de la caída de Japón que anunciaba su sistema a un público internacional y dejaba claro que su cobertura no haría más que ampliarse en los años siguientes.

Al final de la guerra, la navegación hiperbólica se posicionó como tecnología no agresiva y había adquirido un impulso institucional que trascendía cualquier objetivo militar inmediato.

3.5.3. Radionavegación tras la segunda guerra mundial

Al final de la guerra, había pues cuatro formas principales de entender las ondas de radio como entidades geográficas: podían ser una especie de ferrocarril, una especie de faro, un elemento para medir distancias o una enorme cuadrícula espacial, según las circunstancias. Y había docenas de dispositivos diferentes que apoyaban estas interpretaciones. En las décadas posteriores a la guerra, las tecnologías de radionavegación siguieron proliferando, con nuevos sistemas creados para cada nueva tarea y nuevo grupo de usuarios.

¹⁴⁶La utilización de la propia infraestructura por el enemigo se consideró un problema también en la navegación por satélite, y dió lugar como se verá a la encriptación de la señal militar de navegación en el GPS

En los años 50 y 60 en lugar de la convergencia tecnológica hacia algo como un futuro GPS, que sería la sensibilidad reinante hacia 1970, la corriente tecnológica principal era promover la interacción entre diferentes sistemas. Se trataba de una solución que conservaba las virtudes de la redundancia y la flexibilidad. Y aunque ciertamente hubo organismos y personas -especialmente, pero no exclusivamente, en Estados Unidos- que hicieron un esfuerzo concertado para promover soluciones globales integrales, muchas de las estrategias seguidas por Estados Unidos no tuvieron éxito; de hecho, fue la propia falta de una mano tecnológica o política dominante la que fomentó la coordinación y la creación de tecnologías híbridas.

El mismo sistema radioeléctrico podía utilizarse para fines locales, nacionales o transnacionales, mientras que una misma zona geográfica podía estar cubierta por varios sistemas a la vez. Los solapamientos resultantes eran vistos como positivos y los diferentes grupos veían cómo su propio proyecto podía beneficiarse al estar conectado con el de sus vecinos ¹⁴⁷. La integración tecnológica también acabó debilitando las metáforas físicas conocidas y haciendo hincapié en los usos de la señal de radio en lugar de considerar su origen o nacionalidad. El resultado fue una integración espacial sin una mano directora clara.

Hubo como se ha mencionado varios intentos de homogeneizar los distintos sistemas, principalmente impulsados por las organizaciones internacionales. Funcionarios de docenas de países se reunían regularmente para intentar reducir el número de sistemas de navegación que competían entre sí. Estos debates tuvieron lugar en todas partes, desde conferencias puntuales sobre navegación marítima hasta las reuniones periódicas de las organizaciones internacionales, tanto las de nueva creación como la OTAN o la OACI ¹⁴⁸, como también las ya centenarias como la UIT ¹⁴⁹.

En teoría, el objetivo era debatir sobre los méritos técnicos y llegar a un acuerdo armonioso sobre el mejor sistema para cada una de las principales tareas de navegación, con el mayor solapamiento posible entre barcos y aviones. En la práctica, sin embargo, los funcionarios de Estados Unidos y el Reino Unido presionaron para que se instalaran sus propios sistemas, que habían costado millones de dólares y ya estaban instalados en miles de barcos y aviones ¹⁵⁰. Gran parte de este diálogo fue impulsado por el atractivo de

¹⁴⁷La aparición del Galileo en la actualidad ha llevado a proyectos que se benefician de la cooperación entre GPS y Galileo, de modo similar al caso mencionado.

¹⁴⁸Organización de Aviación Civil Internacional

¹⁴⁹Unión Internacional de Telecomunicaciones

¹⁵⁰Los funcionarios estadounidenses, por ejemplo, presionaron no sólo por el sucesor del Radio Alcance -el VHF Omni-Alcance (VOR)- sino también por la amplia red de Loran. Por ejemplo, uno de los mayores enfrentamientos entre EE.UU. y el Reino Unido fue la

los mercados internacionales de equipos de navegación¹⁵¹.

De hecho, se produjeron algunas estandarizaciones internacionales, sobre todo en lo que respecta a los sistemas críticos de seguridad en los puertos o cerca de los aeropuertos, pero en su mayor parte los acuerdos fueron parciales en el mejor de los casos. En todo caso, las prolongadas batallas y los complicados compromisos no hicieron sino fomentar un mayor pluralismo¹⁵².

El resultado fue que todos los sistemas siguieron expandiéndose. En la década de 1970, los transmisores Consol estaban instalados no sólo en Europa Occidental, sino también en Estados Unidos y la URSS. En conjunto, los principales sistemas acabaron ofreciendo una cobertura masivamente duplicada, sobre todo en las zonas con más tráfico internacional.

Esta lógica se vio reforzada por el desarrollo de nuevos sistemas en los años cincuenta y sesenta. La mayoría de ellos fueron desarrollados por empresas privadas y sólo ofrecían mejoras graduales en zonas de mucho tráfico. A principios de los años 60, por ejemplo, había seis ayudas distintas en uso por los aviones que cruzaban el Atlántico Norte, con otras propuestas más experimentales presentadas regularmente en la OACI.

Al mismo tiempo, el patrocinio militar dio lugar a sistemas con un alcance geográfico mucho mayor. Así, la Marina estadounidense desarrolló dos sistemas de cobertura mundial, que acabaron abriéndose a los civiles: un sistema por satélite conocido como Transit, ver sección , 4.1.1, diseñado para los submarinos Polaris, y un sistema terrestre llamado Omega¹⁵³.

confrontación de 1959 en la OACI sobre los equipos de navegación de corto alcance, en la que se enfrentaron el VOR estadounidense y el Decca británico. El triunfo del VOR condujo efectivamente al dominio internacional del sistema americano en la aviación civil. Pero también empujó a la Decca Navigator Company a centrarse más agresivamente en los mercados de la marina costera y los helicópteros, que pronto llegó a dominar. Los británicos abogaron no sólo por la cobertura cuadrículada de Consol, que se habían apropiado completamente de los alemanes, y por su propio sistema Decca, que superaba a Gee en casi todos los aspectos, sino también por un sistema de orientación de trayectorias derivado de Decca conocido como Dectra (DECca TRAck) que abarcaba el Atlántico Norte.

¹⁵¹Rankin, 2014.

¹⁵²Del mismo modo, la adopción oficial de Loran por parte de la OTAN apenas alteró la fidelidad de los pescadores comerciales a Consol.

¹⁵³El sistema Omega tuvo una vida operacional muy corta. Su desarrollo comenzó a finales de los años sesenta y entró en servicio en 1971, en una época en la que las tecnologías de radionavegación por satélite estaban avanzando rápidamente. Principalemente por esta razón no duró mucho tiempo en servicio y fue desconectado en 1977. En algunos aspectos era una extensión del LORAN, emisores muy alejados entre si enviaban señales sincronizadas a barcos y aviones, que obtenían su posición mediante la comparación de las señales enviadas desde fuentes distintas. Las señales operaban en la banda de muy baja frecuencia, con señales a 10-14 kHz. En esta banda las señales no están especialmente afectadas por la reflexión de la ionosfera y con ocho estaciones se conseguía una cobertura global. La posición se obtenía en dos dimensiones con una precisión de unos dos kilómetros. Omega

Una libertad geográfica similar fue inicialmente posible gracias a la maduración y posterior aplicación al mundo civil de las denominadas ayudas autónomas, ver sección 3.6, la navegación Doppler y la inercial¹⁵⁴, que no dependían en absoluto de instalaciones terrestres ni de señales exteriores. El derribo de un avión de Korean Airways por la URSS, ver la sección 4.3, acabó con este período de desarrollo en relativa armonía.

El atractivo de la combinación de señales de múltiples sistemas era, pues, tanto tecnológico como político, y el resultado geográfico era aditivo y no fragmentario. La combinación de radionavegación con ayudas autónomas era especialmente atractiva y, poco después de la aparición del Doppler comercial a finales de los años 50, varias empresas, especialmente Decca, desarrollaron equipos especiales que podían dar a los pilotos su ubicación como una línea trazada en un mapa, con los propios sistemas de navegación -junto con cualquier rejilla hiperbólica o haz de radio- invisibles. En 1970, este tipo de navegación integrada ya era habitual.

La recompensa política llegó muy pronto. En 1965, por ejemplo, la promesa de combinar el Doppler, el Loran y el Consol condujo a una distensión en la OACI, donde Estados Unidos y el Reino Unido firmaron una resolución conjunta en la que se declaraba que ya no era necesario un estándar mundial para estos sistemas de larga distancia.

No había ninguna necesidad real de limitar el número de sistemas, siempre que cada uno de ellos aportara algo valioso, lo que importaba era la capacidad global de navegación, no la geografía o la materialidad de un sistema concreto. Estas opiniones tuvieron eco en toda Europa y América del Norte, y en la OACI constituyeron la columna vertebral de una nueva filosofía subyacente de la navegación conocida simplemente como enfoque de sistemas, un enfoque que pronto se adoptó también en los círculos marítimos.

Los pilotos de helicópteros urbanos y los capitanes de submarinos nucleares podían tener cada uno su propia solución personalizada y, sin embargo, juntas podían combinarse para crear una infraestructura global relativamente fluida e invisible. No se trataba del espacio homogéneo del GPS, pero era tecnológicamente sólido, políticamente legítimo y geográficamente amplio. Los espacios antes insalvables o ingobernables se convirtieron en concretos, calculables y reclamables. Al mismo tiempo, la radio también cambió, ya que los marcos tecnológicos anteriormente distintos acabaron desdibujándose en una sopa difusa.

era un sistema pasivo, el barco o avión receptor no tenía que emitir ninguna señal.

¹⁵⁴King-hele, 1959.

3.6. La navegación autónoma

Los sistemas de navegación autónoma son capaces de determinar la velocidad y la posición de un móvil sin interacciones con el mundo exterior. Eran una alternativa radical a la navegación celestial y a la radionavegación tradicional, y resultaban especialmente útiles para los viajes intercontinentales. Podemos hablar de dos, sistema inercial, en el que el móvil mide su aceleración, y sistema Doppler, en el que el móvil mide su velocidad como variable de entrada.

3.6.1. Navegación inercial

La navegación inercial comenzó con el desarrollo de los cohetes balísticos V-2 alemanes, y alcanzó un gran desarrollo durante los años de la guerra fría, principalmente asociado al guiado de los misiles balísticos intercontinentales¹⁵⁵. Durante los desarrollos en Peenemünde, los alemanes incorporaron giróscopos y acelerómetros para estabilizar el cohete V-2 a medida que ascendía, así como para cortar el motor cuando se alcanzaba el vector de velocidad deseado, siguiendo una trayectoria balística sin guiado a partir de entonces¹⁵⁶.

El V-2 nunca consiguió la precisión necesaria sin embargo. Tras la segunda guerra mundial, los EEUU y la URSS redoblaron los esfuerzos en este tipo de sistemas, llamados inerciales porque se basan en la aplicación directa de las leyes de Newton. Particularmente influyente fue el laboratorio de Charles Drapper en el MIT, que desarrollaron sistemas no sólo para los misiles balísticos norteamericanos sino para las naves Apollo, ver la sección 3.3.5 y la figura 3.23.

La navegación inercial es una técnica de navegación autónoma en la que las mediciones proporcionadas por acelerómetros y giróscopos se utilizan para seguir la posición y la orientación de un objeto en relación con un punto de partida, conociendo la orientación y la velocidad iniciales. Las unidades de medición inercial suelen contener tres giroscopios dispuestos ortogonalmente y otros tres acelerómetros ortogonales que miden la velocidad angular y la aceleración lineal, respectivamente¹⁵⁷. Procesando las señales de estos dispositivos es posible seguir la posición y la orientación de un aparato¹⁵⁸.

¹⁵⁵Spinardi y Spinar, 1994.

¹⁵⁶Este punto de apagado de motor, el *Breenschluss*, tenía una importancia crucial en la precisión del misil V-2 al impacto y es el mismo principio que siguen los sistemas de misiles balísticos actuales Siouris, 2004.

¹⁵⁷Cobarsí Ortín, 1998.

¹⁵⁸Un sistema de navegación inercial incluye al menos un ordenador y una plataforma



Figura 3.22: Wernher von Braun con un modelo del cohete V2. Von Braun fue capturado por los aliados y llevado a Estados Unidos, donde trabajó para la NASA. Fue el diseñador principal del cohete Saturno V que llevaría al hombre a la Luna. Fuente: NASA

que contiene acelerómetros, giroscopios u otros dispositivos de detección de movimiento. Los giroscopios miden la velocidad angular del marco del sensor con respecto al marco de referencia inercial. Utilizando la orientación original del sistema en el marco de referencia inercial como condición inicial e integrando la velocidad angular, se conoce en todo momento la orientación actual del sistema. Los acelerómetros miden la aceleración lineal del vehículo en movimiento en el marco del sensor o del cuerpo, pero en direcciones que sólo pueden medirse en relación con el sistema en movimiento. El sistema de navegación inercial recibe inicialmente su posición y velocidad desde otra fuente acompañada de la orientación inicial y, a partir de entonces, calcula su propia posición y velocidad actualizadas integrando la información recibida de los sensores de movimiento. Siguiendo tanto la

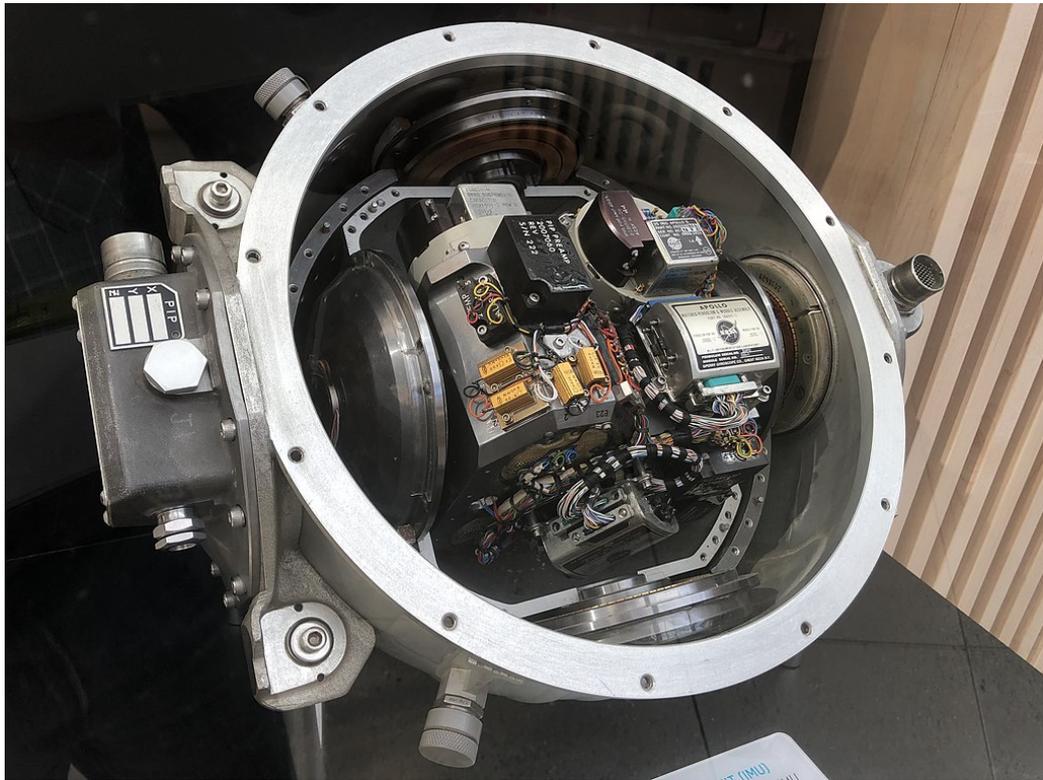


Figura 3.23: Una unidad de medición inercial (IMU) es un dispositivo electrónico que mide e informa de la fuerza específica de un cuerpo, la velocidad angular y, a veces, la orientación del cuerpo, utilizando una combinación de acelerómetros, giroscopios y, a veces, magnetómetros. Fuente: NASA.

La navegación inercial estaba afectada por el llamado problema de la vertical. De acuerdo al principio de equivalencia de Einstein, los efectos de la aceleración lineal son indistinguibles de los del campo gravitatorio. En la forma de la equivalencia de la masa inercial y gravitatoria, este argumento era un pieza central de la relatividad general. Sin embargo para la navegación autónoma este hecho constituía una gran dificultad, ya que hacía imposible la construcción de un sistema de navegación inercial que indicase la vertical sin estar afectado por las aceleraciones del vehículo. La solución para la navegación la había enunciado Schuler en 1923¹⁵⁹. La vertical debía ser determinada analíticamente de un modelo de la gravedad terrestre que indicase su magnitud y dirección en cada punto.

La ventaja de un sistema de navegación inercial es que no necesita referencias externas para determinar su posición, orientación o velocidad. Sin

¹⁵⁹Bell, 1969.

embargo todos los sistemas de navegación inercial sufren una deriva de integración que crece con el tiempo ¹⁶⁰. Incluso los mejores acelerómetros acumulan errores. Por lo tanto, la posición debe corregirse periódicamente mediante la entrada de algún otro tipo de sistema de navegación.

La capacidad de determinar la posición y la velocidad sin interactuar con el mundo exterior hacen a los sistemas inerciales especialmente aptos para los misiles balísticos, cuya trayectoria no podía ser afectada por interferencias electrónicas externas, pero también para submarinos de propulsión nuclear que permanecen gran parte del tiempo sumergidos. Estos sistemas militares eran y son especialmente precisos y costosos.

A mediados de los años sesenta del siglo pasado, comenzaron a desarrollarse giróscopos de coste más asequible, como los tipo láser y de fibra óptica, que hicieron posible la introducción de los sistemas de navegación inercial en otras aplicaciones, como la aviación comercial.

Delco, una división de General Motors, desarrolló un sistema inercial para aviones comerciales en rutas transcontinentales que no tuviesen cobertura de radio. Era un sistema lo suficientemente preciso como para llevar al avión sin mucho error de posición hasta un punto en el que recuperase cobertura radio que le permitiese corregir la deriva acumulada en el sistema inercial. La Pan Am y otras líneas aéreas instalaron este tipo de sistemas en aviones Boieng 747 que cruzaban el pacífico y el Atlántico. El sistema inercial permitió reemplazar progresivamente al navegador, el tercer tripulante de cabina, en los grandes aviones comerciales. En 1969 Finnair voló desde Helsinki a Nueva York con el sistema Delco sustituyendo al navegador por primera vez.

Décadas más tarde, se desarrollaron los sistemas micro electromecánicos, conocidos como MEMS, que permitieron fabricar giróscopos y acelerómetros, de baja precisión, pero que pudieron ser integrados en teléfonos inteligentes.

El sistema inercial está hoy integrado en casi todos los aparatos de acceso habitual con sistema de navegación por satélite. Y además, tiene una fuerte relación histórica con el desarrollo del GPS. En 1983, los soviéticos derribaron un 747 de Korean Airways que, volando con navegación inercial, había penetrado accidentalmente en el espacio aéreo de la URSS. Como consecuencia, el presidente de EEUU declaró el GPS abierto a aplicaciones civiles, ver la sección 4.3.

¹⁶⁰Los pequeños errores en la medición de la aceleración y la velocidad angular se integran en errores progresivamente mayores en la velocidad, que se agravan en errores aún mayores en la posición. Dado que la nueva posición se calcula a partir de la posición anterior y de la aceleración y velocidad angular medidas, estos errores se acumulan de forma aproximadamente proporcional al tiempo transcurrido desde que se introdujo la posición inicial

3.6.2. Navegación Doppler

La navegación Doppler¹⁶¹ es un sistema autónomo de navegación de aeronaves desarrollado en la década de 1940 que utiliza la interacción del radar de efecto Doppler con la tierra en los cálculos de estima para la navegación¹⁶².

En los años 50, principalmente por parte de la empresa Decca, se desarrolló y puso en servicio el sistema Doppler, que mide la desviación de frecuencia Doppler de los ecos sobre el terreno de señales radiadas desde el avión por tres o cuatro haces dirigidos que apuntaban oblicuamente hacia la superficie. Las componentes de frecuencia permitían medir las componentes del vector velocidad del avión relativas al terreno en las direcciones de apuntamiento de dichos haces. Mediante las transformaciones matemáticas adecuadas¹⁶³ era posible obtener la velocidad del avión referida al terreno de modo autónomo. Conociendo la declinación magnética del punto donde se encontraba el avión, podía además calcularse su rumbo con respecto al sistema local de navegación.

¹⁶¹Schetzen, 2006.

¹⁶²La desviación de frecuencia Doppler se ha utilizado en posicionamiento, dentro del ámbito aeronáutico, en el navegador Doppler, en los sistemas Transit y Tsikada, actualmente en desuso, y en la navegación por satélite para medir la velocidad del receptor. Hoy en día se utiliza también en los aviones rotatorios Fried, 1993.

¹⁶³Sáez Nieto, 2012.

Capítulo 4

Segunda parte del siglo XX: la navegación por satélite

Sistemas tecnológicos como el GPS o el Galileo son métodos de navegación basados en satélites artificiales y que han venido a sustituir a la navegación astronómica clásica vista en capítulos anteriores. Actualmente la navegación por satélite es parte de la vida normal de los ciudadanos y está presente en automóviles y en los ubicuos teléfonos inteligentes que definen nuestra vida social.

4.1. Antecedentes y requisitos de la navegación por satélite

Dado que el *Sistema de Posicionamiento Global (GPS)*, fue el primer sistema global de navegación satélite en entrar en funcionamiento, con gran adelanto sobre sistemas posteriores, se presenta aquí un pequeño resumen de sus orígenes y predecesores tecnológicos.

4.1.1. El primer sistema satelital, el Transit

Con los métodos de navegación celeste, un submarino debía permanecer en superficie durante un tiempo mientras actualizaba su posición con referencia a los astros, lo que comprometía su seguridad. Como respuesta, la marina norteamericana desarrolló desde 1958 una serie de satélites denominados *Transit*, para que los submarinos pudiesen actualizar su posición. Transit proporcionó un servicio continuo de navegación por satélite a partir de 1964, inicialmente para los submarinos y posteriormente también para uso civil.

El funcionamiento del Transit es muy distinto del GPS actual, estando basado en el efecto Doppler, ver la sección 3.6.2. Cada satélite emitía señales a una frecuencia muy precisa, gracias a relojes osciladores de cuarzo a bordo. El submarino, sin emerger, desplegaba sobre la superficie una antena y capta la señal del satélite, cuya frecuencia se ha visto afectada por el efecto Doppler como consecuencia del movimiento del satélite.



Figura 4.1: Satélite Transit. Dos técnicos del John Hopkins University Applied Physics Laboratory comprueban el segundo satélite Transit antes de su lanzamiento el 13 de Abril de 1960. Puede observarse el estetoscopio con el que se comprueba que el temporizador del satélite está operando. Las franjas alrededor del satélite ayudaban a controlar su temperatura (Fuente: NASA).

Esta desviación debida al efecto Doppler permitía al submarino conocer su posición y actualizar su sistema inercial, ver sección 3.6. El sistema Transit permitía a un submarino fijar su posición con unos 200 metros de precisión.

Los satélites Transit emitían en dos frecuencias distintas, a 150 MHz y 400 MHz, lo que permitía al receptor compensar el efecto de la ionosfera, que depende de la frecuencia de la señal. Las señales de alta frecuencia atraviesan la ionosfera sin reflexiones, pero con un retraso que depende de su frecuencia. Este uso de dos frecuencias distintas es una de las innovaciones que el GPS heredó del sistema Transit.

El origen del Transit se encuentra sorprendentemente en el primer satélite artificial, el *Sputnik*, lanzado en 1957 por la URSS. El *Sputnik* emitía dos señales, a 20MHz y 40 MHz. Investigadores del *John Hopkins Laboratory (JHL)* estudiaron el cambio de frecuencia en la señal del *Sputnik* debido al efecto doppler, y pudieron a través de ella obtener los parámetros de la órbita del *Sputnik*. Los investigadores del JHL tenían gran experiencia con el análisis del efecto doppler ya que durante la segunda guerra mundial habían desarrollado espoletas con tiempo de armado variable basadas en este efecto. Se planteó entonces el problema inverso, que dio lugar al Transit, conocida la posición de un satélite, obtener la posición de un receptor en tierra.

Mientras el satélite se acerca al submarino, sus señales se desplazan hacia arriba en la frecuencia, y a medida que se aleja vuelven a bajar. El momento preciso en el que la frecuencia es exactamente igual a la frecuencia de emisión es cuando la trayectoria terrestre del satélite pasa por la ubicación del submarino, con algunas correcciones. Estas y otras mediciones relacionadas, producen una localización relativa con respecto al satélite. Para determinar la ubicación real, esa medida relativa se aplica a la ubicación del satélite. Para ello se envían desde el satélite al receptor periódicamente señales horarias precisas cada dos minutos, además de los seis elementos orbitales del satélite y las variables de perturbación de la órbita. El receptor terrestre descarga estas señales y calcula la ubicación del satélite mientras mide los desplazamientos doppler. Las *efemérides* orbitales y las correcciones del reloj se cargaban dos veces al día en cada satélite desde una de las cuatro estaciones de seguimiento e inyección de la Marina. La posición de los satélites Transit se obtenía desde tierra mediante una combinación de seguimiento por radio y mediante telescopios.

Las fuerzas armadas norteamericanas se encontraban operando distintos sistemas de navegación, incompatibles entre sí, ver la sección 3.5.3, lo que obligaba a llevar distintos equipos a bordo. El Transit permitía calcular longitud y latitud, pero no la altura sobre la superficie terrestre. Ninguno de los sistemas existentes, Transit o Loran, era capaz de permitir calcular la altitud del receptor. Y sólo era adecuado en receptores que se movían relativamente lentos, como barcos de superficie o submarinos. Los sistemas de misiles balísticos se comenzaron a montar sobre plataformas móviles, lo que perjudicaba a la precisión de su sistema de navegación inercial, que exigía conocer con gran precisión la posición del punto de lanzamiento¹⁶⁴.

¹⁶⁴MacKenzie, 1993.

4.1.2. Antecedentes tecnológicos

El GPS ha necesitado de dos desarrollos tecnológicos con raíces en los años 70. El primero ha sido el el microprocesador, un circuito de silicio integrado, y el otro precursor necesario fue la consecución de un reloj atómico viable.

4.1.2.1. Microprocesador

Goordon Moore enunció su famosa ley en 1965 ¹⁶⁵. Sin embargo colocar todas las funciones de una computadora digital en un chip de silicio no fue fácil. El consenso general es que esto se logró por primera vez en la *Intel Corporation*.

La relación entre el desarrollo del GPS y del microprocesador es más que una coincidencia. El ordenador digital debe mucho a la práctica de la navegación. Como se vió en la sección 2.3, en el siglo XIX la navegación por mar abierto requería un cronómetro marino y un sextante, con el cual el navegador del barco podía obtener la posición de las estrellas, el Sol y la Luna. La navegación requería del uso de tablas matemáticas, con los que el navegador podía, a partir de las lecturas del cronómetro y el sextante, calcular la posición del barco. La preparación de estas tablas era una tarea compleja y tediosa que se hacía a mano, sujeta a errores y de la que dependía la seguridad de los barcos en alta mar. El matemático Charles Babbage¹⁶⁶ desarrolló en 1832 un sistema capaz de calcular tablas de funciones numéricas por el método de diferencias. También diseñó, pero nunca completó, la analítica para ejecutar programas de computación.

El GPS tiene valores almacenados en memoria, aunque necesita realizar cálculos en tiempo real. El principio en lo que respecta al procesamiento matemático es el mismo, los datos procedentes de fuentes externas, un sextante o un satélite, se procesan para calcular la posición del usuario.

4.1.2.2. El oscilador de cuarzo y el reloj atómico

La selección del cronómetro marino, combinada con las observaciones celestiales y las tablas de navegación, relacionó la práctica de la navegación con la posición de los astros en el cielo y con el cálculo preciso del tiempo. Hoy en día navegar no se hace por referencia directa a los astros y el tiempo

¹⁶⁵La ley de Moore es la observación de que el número de transistores en un circuito integrado denso se duplica aproximadamente cada dos años. La ley de Moore es una observación y proyección de una tendencia histórica. Más que una ley de la física, es una relación empírica vinculada a los beneficios de la experiencia en la producción.

¹⁶⁶Hyman, 1985.

viene marcado por fenómenos cuánticos a través de un reloj de cesio, y no por fenómenos astronómicos.

Sin embargo el conocimiento del tiempo preciso es aún más relevante para la navegación con GPS que lo era anteriormente para determinar la longitud. Los relojes atómicos supusieron el divorcio de la definición del tiempo con referencia a los astros. El segundo, la unidad fundamental del tiempo, se definió con relación a propiedades cuánticas de los átomos¹⁶⁷. La medida del tiempo dejó de ser patrimonio de los astrónomos para pasar a los dominios de la física cuántica.

Con la llegada de la aviación a principios del siglo XX, ver la sección 3.2, ya analizamos que el arte y la ciencia de la navegación se ampliaron y transformaron. Las mayores velocidades impusieron una modificación altamente necesaria, reducir el tiempo para obtener la posición. En 1932, Weems desarrolló el almanaque aéreo para complementar el almanaque marino que estaba aún en uso¹⁶⁸. El libro de Weems sobre navegación aérea¹⁶⁹ fue ampliamente utilizado durante la segunda guerra mundial. Igualmente se desarrollaron nuevos tipos de sextantes, más compactos que los sextantes marinos tradicionales y capaces de encontrar el horizonte en malas condiciones meteorológicas. En cualquier caso estas técnicas requerían un conocimiento preciso del tiempo.

Una serie de avances en la década de 1920 llevaron a reemplazar el mecanismo tradicional de los cronómetros por un oscilador de cuarzo. Era conocido que al proporcionar energía a un cristal de cuarzo, éste comenzaba a oscilar a una frecuencia que está determinada principalmente por el espesor del cristal. Mientras que los cronómetros marinos tradicionales estaban basados en distintas ruedas de escape que se desplazaban de dos a cinco dientes por segundo, las oscilaciones de cuarzo están en el rango de los kilohercios. Así, cuando se calibran adecuadamente, la precisión temporal aumenta en varios órdenes de magnitud.¹⁷⁰ Ya en la década de 1930, el US national Bureau of Standards proveía a los Estados Unidos con información del tiempo con relojes de cuarzo que no atrasaban o adelantaban más de 0.004 segundos al día.

¹⁶⁷ Antes se definía como la fracción $\frac{1}{31,556,925,9747}$ de la duración que tuvo el año solar medio entre los años 1750 y 1890, pero en 1967, la conferencia internacional de pesos y medidas definió el segundo basada en la transición del átomo de Cesio, que es por tanto independiente de la rotación terrestre y se hace tomando como base el Tiempo Atómico. Un segundo es la duración de 9 192 631 770 oscilaciones de la radiación emitida en la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del isótopo 133 del átomo de Cesio, a una temperatura de 0 K

¹⁶⁸ Williams, 1988.

¹⁶⁹ Weems et al. 1937.

¹⁷⁰ Lombardi, 2011.

Se descubrió que existían variaciones en la velocidad de rotación terrestre debido a las fricciones causadas por las mareas. La definición clásica de segundo, que hasta entonces se definía como $1/86,400$ de un día solar medio, era entonces difícil de definir una vez descubiertas estas perturbaciones.

Además, para los estándares requeridos en navegación espacial, los relojes de cristal de cuarzo no son muy estables. Los relojes atómicos que vinieron a reemplazarlos, de forma brusca podemos decir que combinan un oscilador de cristal de cuarzo con un conjunto de átomos. Una sacudida de energía en forma de microondas puede hacer que un electrón se eleve a orbital de más energía alrededor del núcleo del átomo. El electrón debe recibir exactamente la cantidad de energía adecuada, lo que significa que las microondas deben tener una frecuencia muy específica, para realizar este salto. La energía necesaria para que los electrones cambien de órbita es única en cada elemento y el hecho de que la diferencia de energía entre estas órbitas sea un valor tan preciso y estable es realmente el ingrediente clave de los relojes atómicos. Poder medir esta frecuencia inmutable en un átomo concreto ofrece a la ciencia una medida universal y estandarizada del tiempo. En un reloj atómico, la frecuencia del oscilador de cuarzo se transforma en una frecuencia que se aplica a un conjunto de átomos. Si la frecuencia derivada es correcta, hará que muchos electrones de los átomos cambien de nivel energético. Si la frecuencia es incorrecta, saltarán muchos menos electrones. Esto determinará si el oscilador de cuarzo está fuera de frecuencia y en qué medida. A continuación, se puede aplicar al oscilador de cuarzo una corrección determinada por los átomos para dirigirlo de nuevo a la frecuencia correcta. El desarrollo completo del reloj atómico tuvo que esperar a mayores avances en la microelectrónica como consecuencia del desarrollo del radar en la segunda guerra mundial.

4.1.3. Desarrollo del GPS

El concepto del GPS, igual que el Transit, está basado en calcular la posición del observador en el espacio-tiempo a partir de los datos recibidos de varios satélites. Sin embargo no utiliza el efecto doppler, sino que hace uso de otro mecanismo físico, que la velocidad de las ondas de radio es siempre constante e independiente de la velocidad del satélite. Así, el tiempo de retraso entre el momento en que el satélite transmite una señal y el receptor la recibe es proporcional a la distancia del satélite al receptor. Sin embargo, dado que la velocidad de la señal es la velocidad de la luz, la precisión con la que tendría que medirse este retraso tendría que ser muy alta, sólo al alcance de un reloj atómico. El uso de relojes para calcular la posición nos recuerda a una versión moderna del reloj de John Harrison, ver la sección 2.2. Además,

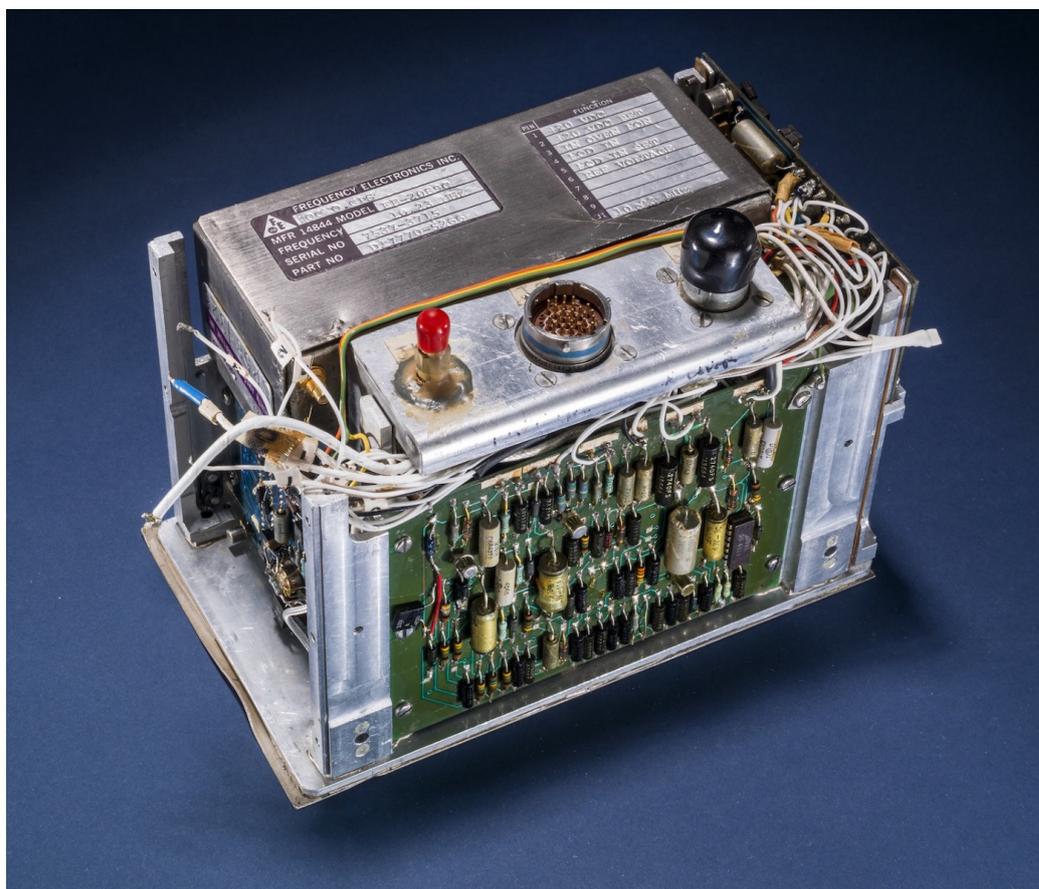


Figura 4.2: Reloj atómico a bordo de los satélites GPS. Es el componente más crítico de todo el satélite. Fuente: NASA.

como en el caso del Transit, cada satélite llevaría un registro preciso de su posición y transmitiría esos datos al receptor.

El origen del GPS se encuentra directamente en un proyecto de la fuerza aérea norteamericana, proyecto conocido como *621B*, que inicialmente consideraba dos tipos de satélites, unos en órbita geoestacionaria y otros en órbita elíptica, que simplemente reenviasen información horaria que a su vez fuese actualizada por relojes atómicos localizados en tierra¹⁷¹. Al menos tres satélites geoestacionarios se necesitarían para dar cobertura global. Sin embargo algunas de las estaciones en tierra deberían estar situadas en otros países, lo que podría dar lugar a problemas políticos como fue el caso ya mencionado del sistema Omega, ver sección 3.5.3. Los satélites en órbita elíptica tendrían que estar en una órbita muy excéntrica que presentaba dificultades en cuanto

¹⁷¹Ceruzzi, 2018.

a seguimiento y la medición de la frecuencia de emisión, ya que la velocidad del satélite cambia en función de su altura sobre la tierra.

Por su parte el *Naval Research Laboratory (NRL)* planteó como alternativa montar relojes atómicos a bordo de satélites, lo que eliminaba el problema de sincronización entre los mismos. EL problema es que las precisiones requeridas casaban mal con un reloj atómico que fuese lo suficientemente compacto, ligero y además estuviese protegido contra radiaciones y las tremendas vibraciones que se dan durante el lanzamiento de puesta en órbita. Sin embargo en este concepto las órbitas de los satélites serían circulares, lo que evitaba muchos de los problemas asociados a la constelación diversa del 621B.

Para probar experimentalmente el concepto de medida de tiempo se pusieron en órbita dos satélites experimentales, en 1967 y 1969, cada uno con osciladores de cuarzo, llamados *Timation*, ver la figura 4.3.

En abril de 1973, el programa Timation del NRL se fusionó con el programa 621B del Ejército del Aire para formar el programa GPS¹⁷². El Ministerio de defensa americano designó a su Ejército del Aire como el organismo principal para consolidar los diversos conceptos de navegación por satélite en un único sistema¹⁷³. En 1978 se lanzó el primer satélite GPS experimental, seguido en 1985 por otros diez satélites experimentales para validar el concepto. En diciembre de 1993, el GPS alcanzó su capacidad operativa inicial, con una constelación completa de 24 satélites que proporcionaban el llamado Servicio de Posicionamiento Estándar. La plena capacidad operativa no se alcanzó hasta abril de 1995, lo que significaba la plena disponibilidad del Servicio de Posicionamiento Preciso, que estaba codificado y era para uso exclusivo de los militares debido a su mayor precisión.

4.1.4. Requisitos

Cuando se desarrolló el GPS, sus creadores se centraron en cumplir una serie de criterios, en muchos casos relacionados con los sistemas de radio navegación existentes, ver la sección 3.5.3, pero otros relacionados con su origen militar¹⁷⁴. Estos fueron:

- *disponibilidad* la información de posición debe estar disponible de modo continuo todo el tiempo, sin importar la hora del día, las condiciones

¹⁷²inicialmente se llamaba DNSS, Defense Navigation Satellite System

¹⁷³El nuevo sistema debía ser desarrollado por una Oficina de Programas Conjuntos, ubicada en la Base Aérea de Los Ángeles, y con la participación de todos los servicios militares.

¹⁷⁴Rip et al. 2002.

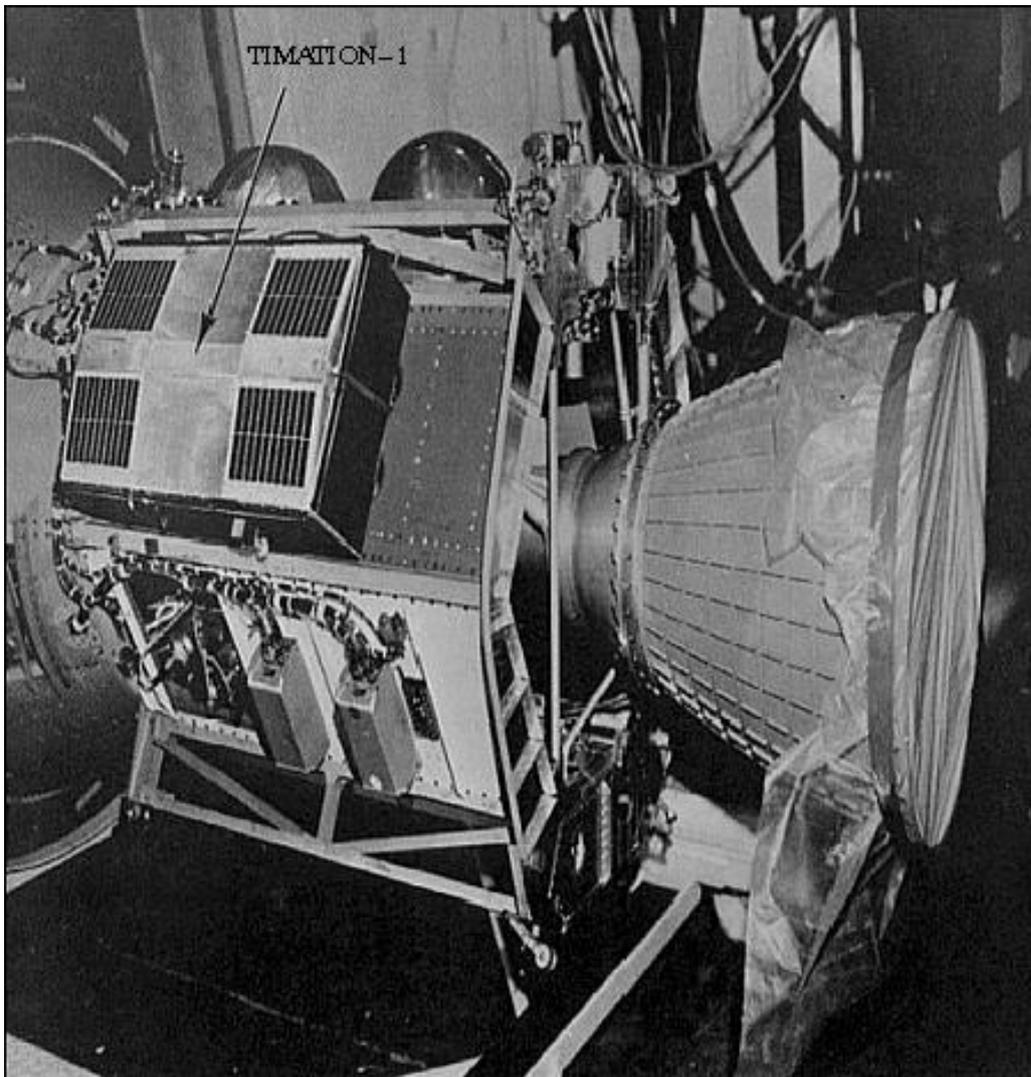


Figura 4.3: Satélite Timation. Se necesita un oscilador preciso y estable en el satélite, que permitiese al usuario determinar el tiempo que tardaba cada señal en viajar desde el satélite hasta el receptor. El usuario conocía entonces la distancia al satélite. Por ello, el proyecto Timation se centró en el desarrollo de las frecuencias de funcionamiento de los relojes de cuarzo que fuesen más adecuadas y también en la determinación de la estructura de la constelación de satélites más eficaz para proporcionar una cobertura mundial. (Fuente: NRL).

meteorológicas u otros factores. La distinción entre el día y la noche, y determinar el mediodía, tan importantes en la navegación astronómica

clásica, desaparecen.

- *cobertura* los servicios deben estar disponibles en cualquier lugar del mundo, de modo que los satélites necesitan estar visibles desde cualquier lugar de la tierra.
- *precisión* la posición necesita determinarse dentro de un pequeño radio, con la idea de poder determinar la propia posición con precisión pero también la de posibles objetivos, y permitir a vehículos, barcos y aviones evitar toda clase de peligros.
- *equipamiento del usuario* debe ser pequeño, ligero y que pueda transportarse fácilmente, con bajos requisitos de energía y que no transmitan señales, para no revelar la posición propia a terceros.
- *facilidad de uso* las posiciones deben poder determinarse rápidamente, sin que los usuarios necesiten un entrenamiento excesivo ni realizar complicados cálculos. Desaparece así la figura del navegador o piloto especialista asociada a la navegación astronómica tradicional ¹⁷⁵.

4.2. Funcionamiento del sistema

4.2.1. Cálculo de la posición

Para determinar la distancia al usuario, el método es directo. El receptor emitirá una secuencia en principio idéntica a la generada por el satélite. Un circuito en el receptor desfasa lentamente el código interno hasta que hay una fuerte correlación entre los mismos. El tiempo de desfase está relacionado con el retraso que sufre la señal desde que se emite en el espacio hasta que llega al receptor.

La mayoría de los receptores GPS en tierra emplean un reloj de cuarzo, mucho menos preciso que los relojes atómicos a bordo de los satélites. Sin embargo el retraso en la señal del usuario será el mismo para los tres satélites. Al recibir una señal adicional de un cuarto satélite se elimina la incógnita del retraso. Como mínimo, cuatro satélites deben estar a la vista del receptor para que éste pueda calcular cuatro incógnitas, tres coordenadas de posición y la desviación de su propio reloj respecto a la hora del satélite. Se tienen

¹⁷⁵Sin embargo los receptores GPS necesitan un tiempo desde que se arrancan hasta que dan su primera información de posición desde un arranque en frío. Por contra las radio ayudas como el VOR dan una información instantánea sobre la posición una vez encendidos.

así un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, latitud, longitud, altitud y tiempo.

Los relojes atómicos que se utilizan a bordo de los satélites GPS necesitan de actualizaciones dos veces al día para corregir su deriva. Esas actualizaciones proceden de relojes atómicos más estables, situados en tierra, que son grandes y más estables, y no necesitan estar diseñados para sobrevivir a las exigencias físicas de ir al espacio.

La configuración del GPS esta afectada por la llamada *dilución de la precisión*. La precisión con la que se calcula la posición del usuario depende de la posición relativa de los satélites con respecto al usuario. Por regla general, una mayor distancia entre satélites observados da lugar a una mayor precisión. La mejor geometría resulta de tener un satélite directamente encima y tres satélites repartidos equitativamente cerca del horizonte del usuario. La constelación de satélites se diseña para que en las zonas de interés haya hasta doce satélites GPS a la vista en cualquier momento, con lo que el receptor puede seleccionar la combinación óptima de satélites para obtener la mejor posición.

En cualquier caso, debido a la configuración orbital de la constelación GPS, la precisión a lo largo de la vertical no es tan precisa como la obtenida en longitud y latitud. La precisión vertical es importante en el caso de los aviones, donde un error de metros puede producir fatales consecuencias por ejemplo en un aterrizaje con mal tiempo.

Además de la posición, es posible obtener otras medidas del GPS.

Los receptores GPS determinan la velocidad mediante la obtención de medidas sucesivas de posición. Los equipos a bordo de aviones a alta velocidad también emplean esta técnica, pero sus receptores son mas complejos. La señal de los satélites GPS moviéndose por el espacio a alta velocidad esta afectada por el efecto Doppler. Los equipos avanzados emplean la desviación doppler para calcular la velocidad con mayor precisión.

4.2.2. Transmisión de señal en amplio espectro

El GPS es uno de los pocos sistemas que van contra la repartición clásica del espectro radioeléctrico. La señal de GPS se reparte en un ancho de banda muy extenso. Así se aumenta la resistencia a interferencias.

Sus orígenes están en otro proyecto militar, en el misil MGM-29 Sergeant, que fue diseñado y entró en servicio en los años 50 del pasado siglo. En 1972, el programa 621B confirmó el funcionamiento de este nuevo tipo de señal en satélites. Esta señal está basada en en secuencias digitales repetibles y en el llamado ruido pseudo aleatorio, *Pseudo Random Noise* o PRN. El código PRN está representado por una secuencia repetida de bits binarios

con propiedades de ruido que parecen ser aleatorias, aunque sin embargo, se generan con total previsibilidad. La potencia de la señal se reduce hasta un punto en el que la señal es inferior al ruido inherente que se encuentra en esa banda. Los receptores de ancho espectro son capaces de recuperar la señal, mediante la correlación con un código generado dentro del propio receptor. Así, la señal de pulsos recibida puede compararse con el patrón de pulso original mediante un procedimiento matemático, la mencionada correlación, para determinar la sincronización exacta.

Aunque la señal es resistente a interferencias, tiene sus desventajas. Por ejemplo no puede recibirse en el interior de edificios, o en un bosque espeso. Sin embargo, instalar emisores de alta potencia en satélites en una órbita de 12 horas no era práctico en los años 1970 e incluso hoy sería muy difícil. Debido al restrictivo presupuesto del GPS, se optó por ahorrar millones de dólares utilizando inicialmente misiles balísticos intercontinentales reacondicionados para el lanzamiento de sus satélites. La capacidad de empuje de esos propulsores Atlas-F, de coste relativamente bajo, limitaba el peso de lanzamiento de cada satélite y, por tanto, el tamaño de los paneles solares y, en última instancia, la potencia de transmisión disponible. La señal GPS tiene una potencia de 10^{-16} vatios y los satélites se las arreglaban con su limitada potencia transmitiendo como máximo 50 bits de datos por segundo.

La World Administrative Radio Conference asignó las frecuencias en la banda L, para la navegación por satélite. Todos los satélites GPS emiten en las mismas frecuencias, 1575.42 MHz y 1227.6 MHz. Al emplear dos frecuencias se permite que los receptores puedan corregir por los errores que se acumulan al atravesar la ionosfera. Si los códigos permanecen ortogonales, esto es, que no se superponen, las transmisiones de los satélites no interfieren unas con otras. Adicionalmente, las señales pseudo-arbitrarias incorporan un código adicional, las efemérides, que contiene la información sobre la posición del satélite, los parámetros de su reloj atómico, la localización de otros satélites y otro tipo de datos.

4.2.3. Filtros Kalman

Para un receptor de alta movilidad, como un avión, los cálculos son más complejos. Un avión por ejemplo necesitara medir su velocidad y su aceleración. Debido a los rápidos avances en microelectrónica, los receptores actuales en aviones, incorporan un filtro Kalman, una técnica matemática que comienza estimando la posición, velocidad y aceleración del receptor en tres dimensiones, el tiempo y la desviación temporal, hasta once parámetros en el caso más complejo. El filtro proyecta estos valores en el futuro, y compara la proyección con los valores actuales que recibe de los satélites. El proceso

se repite de modo iterativo, aumentando la precisión con cada iteración. Los filtros Kalman son capaces de establecer predicciones incluso con datos incompletos, o recibidos a intervalos irregulares. El filtro recibe su nombre del matemático Rudolf Kalman ¹⁷⁶, del *Research Institute for Advances Studies* de Baltimore.

Las estaciones terrestres también emplean filtros Kalman para calcular la posición futura de los satélites sin necesidad de hacer un seguimiento continuo de los mismos en cada órbita. Esta posibilidad, junto con la existencia de satélites de reserva en cada plano orbital, hacen que el GPS sea un sistema especialmente robusto.

4.2.4. Efemérides y otros datos

Como se ha visto, los relojes atómicos de abordo son la clave para conseguir calcular la posición con precisión. Igualmente importante es poder seguir a los satélites y poder determinar su posición cuando emiten su señal. Esta información se codifica y se envía al usuario junto con la señal del satélite. La posición y velocidad de cada satélite se determinan desde estaciones, terrestres, cuya posición sobre la superficie ha sido cuidadosamente determinada. Las estaciones en tierra también emplean relojes atómicos, sincronizados con los de los satélites, y que se emplean para verificar la situación de los relojes embarcados.

4.2.5. Parámetros orbitales

La órbita de los satélites esta situada a 20,183 km, donde las perturbaciones atmosféricas son nulas y las debidas al campo gravitatorio terrestre son mínimas, aunque estas últimas aun deben considerarse en los cálculos.

Ademas, al situar los satélites en órbitas circulares, los efectos relativistas son mas fáciles de calcular.

De cualquier modo hay otros factores que afectan a las órbitas, como por ejemplo el achatamiento terrestre en los polos, que causa una precesión de la órbita en cada circunvalación terrestre. En orden de importancia tenemos ademas el efecto de la gravedad lunar, la presión de la radiación solar en los paneles y otros factores con importancia relativa menor pero que aun deben considerarse en los cálculos.

¹⁷⁶Kálmán nació en Budapest en 1930. Su familia emigró a Estados Unidos en 1943. Es conocido sobre todo por su co-invencción y desarrollo del filtro de Kalman, un algoritmo matemático muy utilizado en el procesamiento de señales, los sistemas de control y el guiado, la navegación y el control. El presidente Obama, le concedió la Medalla Nacional de la Ciencia en 2009.

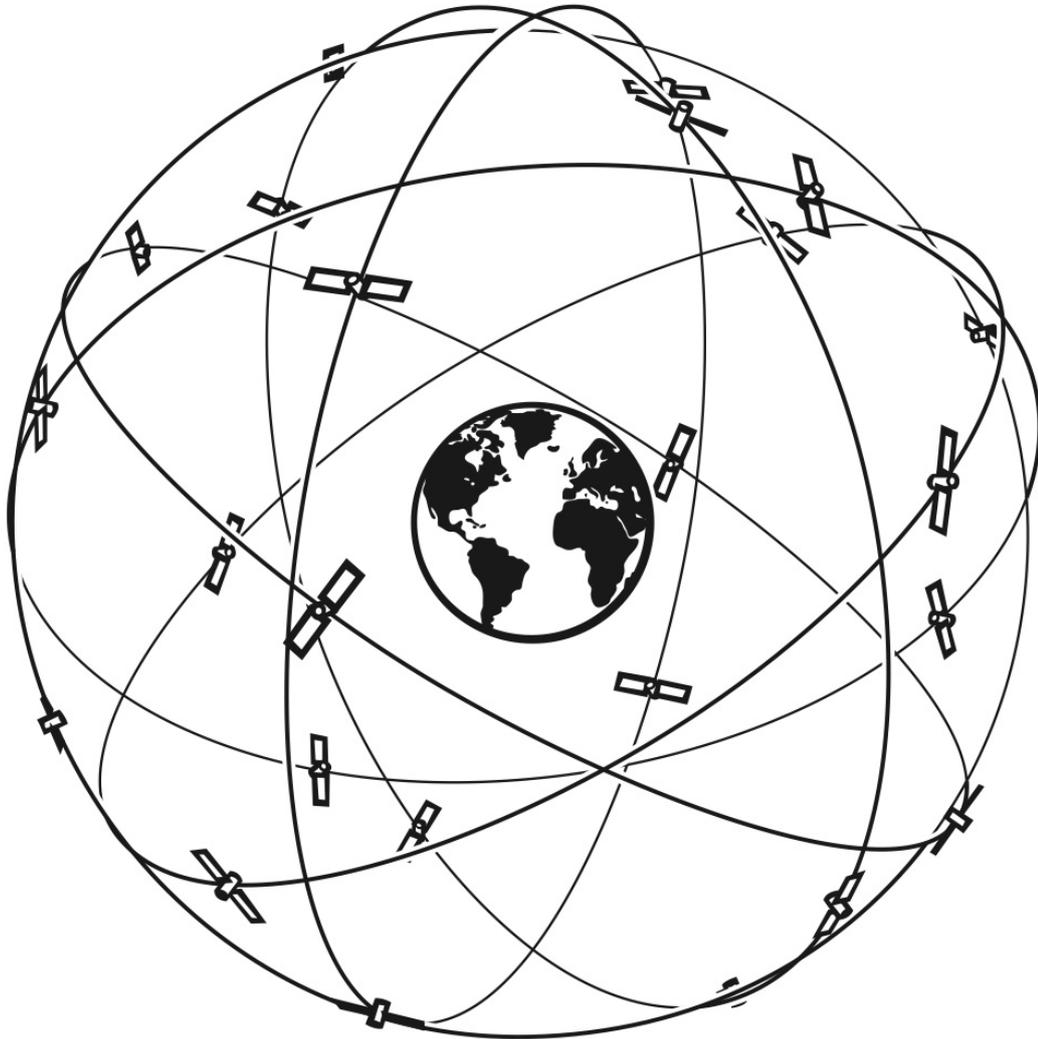


Figura 4.4: Los satélites de la constelación GPS están dispuestos en seis planos orbitales igualmente espaciados que rodean la Tierra. Cada plano contiene cuatro posiciones ocupadas por satélites de referencia. Esta disposición de 24 satélites garantiza que los usuarios puedan ver al menos cuatro satélites desde prácticamente cualquier punto del planeta.

4.3. Desarrollos posteriores

El desarrollo posterior del GPS podemos decir que ha sido consecuencia de su exposición social, no de hechos autónomos e independientes concebidos por sus creadores originales. Ciertos acontecimientos marcaron especialmente su utilización actual, como el derribo de un avión Korean Airways en 1983,

la Guerra del Golfo en 1990, o el desarrollo del GPS diferencial en los años 90 han influido en la disponibilidad universal del GPS y han marcado la configuración de sistemas de navegación por satélite posteriores.

4.3.1. Vuelo 007 de Korean Air Lines

El acceso público al GPS tiene origen en una catástrofe aérea durante la guerra fría. En Septiembre de 1983, un Boeing 747 de Korean Airlines que volaba desde Nueva York a Seúl vía Anchorage, Alaska, penetró inadvertidamente en territorio soviético, y fue derribado por un avión interceptor soviético¹⁷⁷. Todos los 269 pasajeros y tripulación a bordo fallecieron¹⁷⁸.

El desvío de su ruta parece estar relacionados con un fallo de navegación del avión, que estaba equipado con sistemas inerciales, ver sección 3.6 y magnéticos para orientarse. El avión se desvió 160 km de su rumbo programado, penetrando en el espacio aéreo soviético inadvertidamente, ver figura 4.5. Los interceptores soviéticos lo derribaron sin identificarlo como tráfico civil, confundiéndolo con un avión espía norteamericano.

Uno de los resultados del incidente fue que los Estados Unidos decidieron acelerar el desarrollo del GPS y ponerlo a disposición de todos los operadores civiles de tráfico aéreo, como sistema para actualizar y corregir las derivas de los sistemas de navegación inercial. Además podrían así disponer de información de posición en tres dimensiones¹⁷⁹.

Como resultado de la decisión de EEUU, se renovó el interés en la fabricación de receptores civiles de GPS, ya que se reducían los riesgos de que los militares decidiesen cortar el acceso del GPS de forma unilateral en el futuro¹⁸⁰.

La facilidad de uso del GPS y los cambios geopolíticos en el mundo tras la guerra fría han hecho que otros países y regiones del mundo hayan desarrollado sus propios sistemas de navegación por satélite¹⁸¹. Todos estos sistemas emplean relojes atómicos a bordo de satélites para determinar su posición.

¹⁷⁷Morgan, 1985.

¹⁷⁸La Unión Soviética encontró los restos bajo el mar dos semanas más tarde y halló las cajas negras en Octubre, pero esta información se mantuvo en secreto hasta la caída de la URSS en 1992.

¹⁷⁹16 Septiembre 1983: *Statement by Deputy Press Secretary Speakes on the Soviet Attack on a Korean Civilian Airliner*

¹⁸⁰En 1983, el mismo año en el que el presidente Reagan anunció la disponibilidad del GPS para todos los usuarios civiles, el ARPANET cambió su protocolo por el TCP/IP, aun vigente a día de hoy.

¹⁸¹GPS en Estados Unidos, Galileo en la Unión Europea, INRSS en la India, Beidou en China, QZSS en Japón o GLONASSS en Rusia

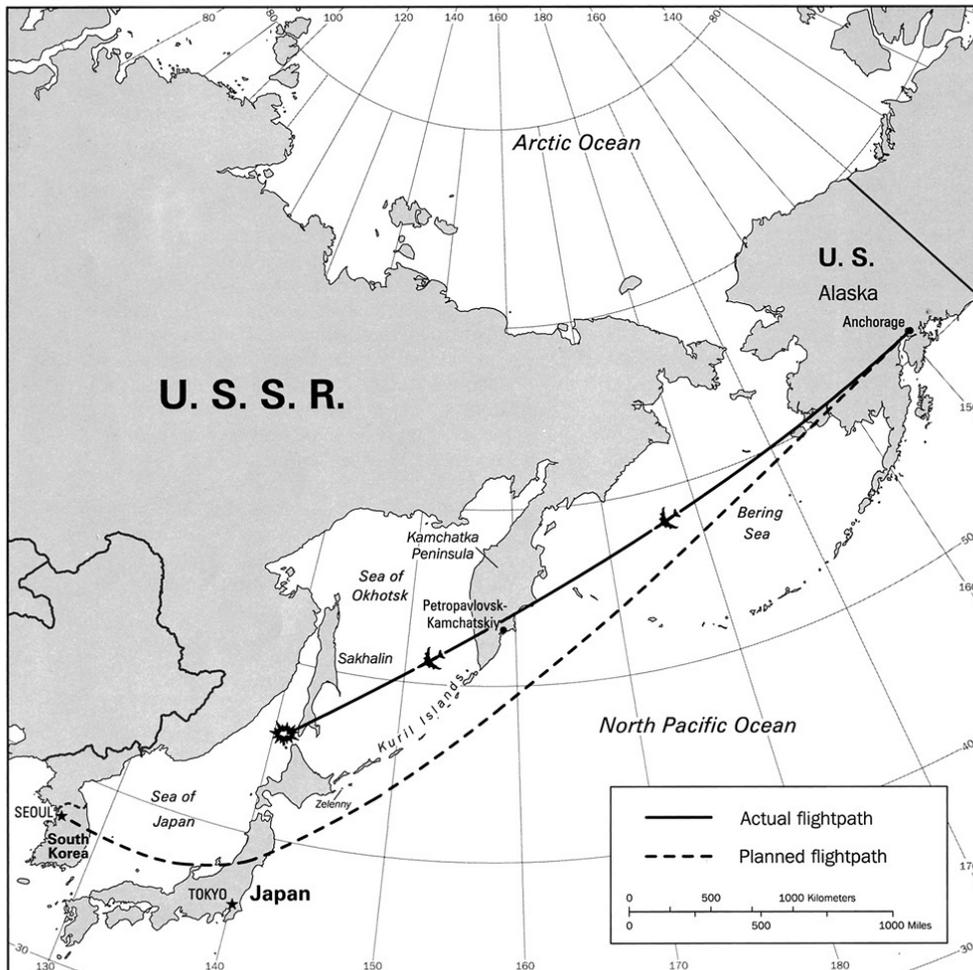


Figura 4.5: Derribo del vuelo 007 de Korean Airways en 1983. La imagen representa la trayectoria prevista y la realmente seguida por el avión. Los fallos de navegación fueron causados por la deriva del sistema inercial de navegación. El incidente fue uno de los momentos más tensos de la Guerra Fría y provocó una escalada del sentimiento anti-soviético, especialmente en Estados Unidos. Tras el derribo, EEUU anunció que el GPS estaría disponible para la aviación civil una vez que estuviese totalmente operativo. Fuente: CIA, dominio público

4.3.2. La disponibilidad selectiva

La precisión que daba el código accesible al público, el *Coarse Acquisition* era de unos 20 a 30 metros con los receptores adecuados. Esta era una precisión inesperada¹⁸² y al ejército estadounidense le preocupaba la posibilidad de que países o grupos hostiles utilizaran estas señales GPS disponibles en todo el mundo. Inicialmente se decidió degradar la precisión del GPS de modo intencional, en el código disponible para el público C/A, que daba una precisión real de 20 a 30 metros, y mantenerla únicamente para el código P(Y) que sería de uso militar, a disposición de las fuerzas armadas norteamericanas y sus naciones aliadas, aunque este último sería un código encriptado¹⁸³.

Así, a partir de 1990 al código civil C/A se le superpuso un código de *disponibilidad selectiva (SA)* que desplazaba la señal de su reloj en una cantidad aleatoria. La SA de modo deliberado degradaba la precisión del GPS a no más de 100 metros. Este código afectaba a cada satélite de modo ligeramente distinto. Los diseñadores consideraron que con el SA, la precisión resultante seguía siendo adecuada para los operadores civiles, y que no comprometía la seguridad militar ya que no sería adecuado para su uso ilícito por terceros que pudiesen amenazar la seguridad.

Esto suponía un problema para los usuarios civiles que dependían de los sistemas de radionavegación terrestre, como los sistemas LORAN, VOR etc, ver sección 3.5.3, para los que la llegada de un sistema global de navegación por satélite podría proporcionar una precisión y un rendimiento mejorados a una fracción del coste de mantener los sistemas de radioayudas. Sin embargo, la precisión inherente a la señal afectada por SA era realmente demasiado baja para que esto fuera realista¹⁸⁴. Los militares recibieron múltiples peticiones de instituciones como la *Administración Federal de Aviación (FAA)*, la *Guardia Costera de los Estados Unidos (USCG)* o el *Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT)* para dejar de lado la disponibilidad selectiva, pero se mantuvieron firmes en su objeción por motivos de seguridad¹⁸⁵.

A partir de aquí comenzó una verdadera rebelión institucional contra la decisión de los militares dentro del propio conglomerado estatal norteamer-

¹⁸²Ceruzzi, 2018.

¹⁸³La señal C/A se transmitía únicamente en la frecuencia L1 (1575,42 MHz). Los usuarios de receptores GPS de doble frecuencia también recibían la frecuencia L2 (1227,6 MHz), podían obtener una orientación más precisa y corregir así errores ionosféricos, pero la transmisión L2, destinada al uso militar, sólo estaba disponible para los usuarios autorizados con las claves de descriptación.

¹⁸⁴Kremer et al. 1990.

¹⁸⁵Zumberge y Gendt, 2001.

ricano. Varias agencias gubernamentales, y muy en particular la FAA y la USCG¹⁸⁶, desarrollaron una solución independiente al problema que les suponía la introducción de la SA¹⁸⁷.

Una primera solución fue conocida como GPS diferencial, que se basa en estimar los errores del GPS en una zona a partir de una antena fija situada en una posición geográfica perfectamente conocida. Dado que la señal SA cambiaba lentamente, el efecto de su desplazamiento en el posicionamiento era relativamente constante, es decir, si el error introducido era de 100 metros al este, ese error sería el mismo en un área relativamente amplia. Esto sugería que la medición y transmisión de este desplazamiento a todos los receptores GPS locales podía eliminar los efectos de la SA. Además, otra fuente importante de errores en un punto de GPS se debe a los retrasos de transmisión por la ionosfera, que también podrían medirse y corregirse sin necesidad de tener una segunda señal a otra frecuencia, ver la sección 4.1.1. Así, los errores ionosféricos y los introducidos por la disponibilidad selectiva eran aplicables a todo el área donde estuviese situada dicha antena y eran eliminados en los cálculos para aumentar la precisión de la medida.

El GPS diferencial fue impulsado por USCG, que consiguió aumentar la precisión del GPS. La red de GPS diferencial de la USCG consistía en 85 antenas de transmisión que proporcionaban cobertura a casi toda la costa de Estados Unidos y a las vías navegables interiores.

Por su parte la FAA para aplicaciones de aviación civil, empezó a estudiar la difusión de las señales de error complementando el GPS con el llamado *Wide Area Augmentation System*, (*WAAS*), retransmitido desde satélites geoestacionarios que dotan de cobertura a Norteamérica. De modo similar al GPS diferencial, el WAAS utiliza una red de estaciones de referencia en tierra para medir pequeñas variaciones en las señales de los satélites GPS. Estas mediciones de las estaciones de referencia se dirigen a las estaciones maestras, que a su vez envían estos mensajes de corrección a los satélites geoestacionarios WAAS cada pocos segundos¹⁸⁸.

Durante la llamada Guerra del Golfo en 1990, las tropas desplegadas por los americanos no disponían de suficientes receptores con acceso al código P(Y) encriptado¹⁸⁹. Como resultado, se estimó necesario interrumpir la SA, que restringía la precisión de los receptores no encriptados a 100 metros. Al desconectar la SA, los receptores de los que disponían las tropas alia-

¹⁸⁶Quill, 1986.

¹⁸⁷McGee, 2000.

¹⁸⁸Los europeos también disponemos de un satélite geoestacionario para aumentar la precisión del GPS sobre Europa, conocido como EGNOS, *European Geostationary Navigation Overlay Service*.

¹⁸⁹Clarke, 1992.

das permitían determinar la posición con unas decenas de metros. Aunque lógicamente los iraquíes también tendrían acceso a una mayor precisión, se estimó que no disponían de suficientes receptores civiles como para poder tener un efecto significativo. Una vez terminada la guerra del golfo, se volvió a conectar la SA.

A mediados de los años noventa estaba claro que el sistema SA ya no era útil en su función prevista. El GPS diferencial lo haría ineficaz sobre los Estados Unidos, donde se consideraba más necesario. Desactivar la SA reportaría además beneficios comerciales por el desarrollo de los receptores civiles. Así en el año 2000 el presidente Clinton se decidió a eliminar la SA por una orden presidencial. Los satélites GPS de la última generación no incorporan ya los circuitos necesarios para implementar la disponibilidad selectiva.

En junio de 2020, la USCG apagó las últimas señales del sistema GPS diferencial tras más de 25 años de servicio. Se considera que el WAAS dota a la comunidad marítima de la precisión necesaria para las aproximaciones a los puertos y costas. Una vez más un desarrollo puramente aeronáutico se aplica a la navegación marítima.

4.4. Política y tecnología: los casos del GPS y Galileo

Como cierre del capítulo, en esta sección se argumenta cómo la tecnología, a la escala global que representa la navegación por satélite, no está por encima de la política como un ente autónomo, ni tampoco por debajo como un efecto dependiente, sino que ambos están entrelazados. Esta relación se ilustra en las dos distintas motivaciones que llevaron a desarrollar el GPS y el Galileo, que se revisan a continuación.

4.4.1. El concepto de precisión en el desarrollo del GPS

Al igual que muchas tecnologías que se utilizan en la vida cotidiana, el GPS se creó como resultado de la investigación y el desarrollo militar. Aunque sus aplicaciones comerciales e industriales se parecen poco a las prácticas de la guerra, la mayoría de las formas en las que el GPS funciona en la vida cotidiana no están alejadas de su propósito original ¹⁹⁰, la orientación

¹⁹⁰Excepto de manera destacada su papel como reloj mundial, que se analiza en el capítulo siguiente

mediante el posicionamiento preciso.

Sin embargo, la precisión, del latín *praecisio* que significa «corte», «concisión» debe entenderse como un concepto relativo. Los océanos se han navegado con un sextante y cerca de la costa a simple vista, pero el puerto de destino no tiene que ser observado en términos que hoy consideraríamos precisos. Así, las propiedades imaginarias de la precisión se ajustan a los medios disponibles para alcanzarlas. La asociación del GPS con la precisión marca un punto de unión en los discursos de la tecnología moderna, especialmente los vinculados a la aviación y la geolocalización.

Cabe preguntarse por qué se desarrolló el GPS, considerando que el iniciador del proyecto fue puramente militar.

La posibilidad de ofrecer una solución de navegación en cualquier tiempo atmosférico ya estaba dada por la radio navegación, como se vió en la sección 3.5.3. Ciertamente los sistemas existentes podían mejorarse en lo que respecta a dar servicio a la aviación, pero hasta 1983 con el derribo del avión de Korean Airways, ver la sección 4.3.1 no parecía existir una enorme necesidad al respecto que pusiese en peligro la navegación aérea.

Incluso el reto de abaratar costes desde la perspectiva puramente militar parece complicado de sostener cuando se trataba de poner una constelación de satélites en el espacio, con un coste de doce mil millones de dólares de la época.

Parece que el GPS no surgió como una necesidad social, ni tampoco como un desarrollo tecnológico independiente. Las múltiples posibilidades civiles que ofrece hoy en día el GPS, desde ayuda a la navegación aérea como al tráfico rodado, aunque pueden ser la fuerza motriz del Galileo europeo, no estaban dentro de las consideraciones iniciales cuando se concibió el GPS. Además una vez en servicio, los militares se opusieron a compartir todas las posibilidades del sistema con los usuarios civiles, como demuestra el episodio de la disponibilidad selectiva, ver la sección 4.3.2.

Podríamos decir que el origen del lanzamiento del GPS ejemplifica no otra cosa sino la creencia en la precisión como elemento necesario en el armamento, especialmente en el bombardeo, y la militarización del espacio¹⁹¹. Según los historiadores militares¹⁹², toda la razón de ser del desarrollo del GPS estaba vinculada a las exigencias de precisión en el guiado de misiles y bombas.

La historia refleja la accidentada experiencia de los bombardeos aéreos durante las guerras mundiales, especialmente en los bombardeos nocturnos o en condiciones meteorológicas adversas. Elementos como el clima, el entrenamiento inadecuado, el fuego defensivo y el camuflaje hicieron que sólo el

¹⁹¹Kaplan, 2006.

¹⁹²MacKenzie, 1993.

14% de las bombas lanzadas por la Octava Fuerza Aérea durante la primera mitad de 1943 dieran a menos de 300 metros de sus objetivos¹⁹³. A pesar de estos problemas significativos en la ejecución, la mística de la precisión de la potencia aérea presentaba una imagen más limpia y ordenada que la voladora destructiva al por mayor de la artillería. Tras la segunda guerra mundial, Estados Unidos en particular desarrolló una doctrina de poder aéreo, basada en la precisión y en la capacidad de los bombarderos de largo alcance para alcanzar sus objetivos¹⁹⁴. La aparición de la doctrina de la potencia aérea y del bombardeo de precisión¹⁹⁵ resultó ser la única justificación aceptable para el tipo de ataques a gran escala que necesitaban las guerras entre potencias industriales en la época moderna.

Autores como MacKenzie¹⁹⁶ sostienen que el deseo de precisión en los bombardeos no es ni natural ni inevitable, sino el producto de un complejo proceso de conflicto y colaboración entre una serie de actores sociales, entre los que se encuentran los tecnólogos, los laboratorios, las empresas, y los dirigentes políticos y militares y las organizaciones que dirigen.

El modo en que la precisión ha llegado a dominar los discursos sobre estrategia militar es una historia complicada. La construcción de la precisión como estrategia fue paralela a los desarrollos tecnológicos, y no anterior a ellos. Incluye la competición entre las ramas de las fuerzas armadas así como el creciente poder del complejo gubernamental-militar-industrial.

El caso de los misiles y bombas nucleares es significativo. Los misiles balísticos se guían durante el vuelo por sistemas inerciales. Sin embargo el uso del GPS reduce significativamente el tiempo para alinear la plataforma inercial antes del lanzamiento y el esfuerzo necesario para completar la secuencia de lanzamiento¹⁹⁷. Esto es especialmente cierto para misiles lanzados desde plataformas móviles o submarinos. El GPS además permite a los grandes bombarderos navegar y lanzar sus bombas con una precisión no antes alcanzada.

El error que pueda tener al impacto un misil balístico o una bomba dotadas de armas nucleares parece un factor poco significativo, excepto cuando se tratase de alcanzar blancos muy concretos, al comparar el posible error acumulado durante la navegación del misil con el poder destructor de estas armas que se extiende por decenas de kilómetros. Aunque tras la segunda guerra mundial la bomba atómica pareció cambiar la doctrina de la precisión por la del terror y la destrucción masiva, es con el desarrollo de los sistemas de

¹⁹³Crane, 1987.

¹⁹⁴Rizer, 2001.

¹⁹⁵Warden et al. 1998.

¹⁹⁶MacKenzie, 1993.

¹⁹⁷Fields et al. 1996.

navegación por satélite cuando la potencia aérea y la mística de la precisión vuelven con fuerza¹⁹⁸. Efectivamente una gran precisión sólo es necesaria con el cambio de los potenciales objetivos desde una ciudad, la infame destrucción mutua asegurada, a objetivos de precisión, como la destrucción de los misiles enemigos en sus silos. El cambio tecnológico posibilitado por el GPS da el necesario soporte material a un posible cambio de doctrina política, pasando de la defensa mediante la mencionada destrucción mutua asegurada a permitir el lanzamiento de un primer ataque nuclear contra los misiles nucleares del enemigo. Esta última doctrina está más alineada con la doctrina del poder aéreo del Ejército del Aire americano, que no olvidemos, fue la agencia encargada de desarrollar el GPS. A riesgo de simplificar, podríamos decir que existe un contraste entre la postura oficial del bloque aliado, que no considera el primer ataque, y la orientación del desarrollo tecnológico, al menos en las posibilidades que ofrece.

Otros factores de importancia militar a considerar, aparte de la ya mencionada precisión, es la cobertura global y la invulnerabilidad a ataques enemigos que ofrece el GPS. Con respecto a este último factor, las señales de amplio espectro empleadas en GPS, ver la sección 4.2.2, aunque pueden negarse en ciertas áreas mediante la emisión de señales de suficiente amplitud en la misma frecuencia del GPS, la señal en sí no puede alterarse fácilmente para por ejemplo cambiar el objetivo de un misil. La localización de los emisores GPS en el espacio y las redundancias en la constelación hace que sea menos vulnerable que los antiguos sistemas de radioondas con antenas distribuidas a lo largo de la superficie terrestre, muchas veces en países extranjeros.

4.4.2. Motivaciones del desarrollo europeo Galileo

En 1633, la Iglesia Católica Romana declaró a Galileo Galilei un hereje porque sus creencias entraban en conflicto con el statu quo. Casi cuatro siglos después, los europeos han bautizado su propuesta de sistema global de navegación por satélite con su nombre, quizás como un desafío al dominio del GPS.

En Diciembre de 2016, el sistema Europeo Galileo comenzó a ofrecer sus servicios, con 18 satélites situados en tres planos orbitales. Galileo tuvo que luchar contra países europeos que no veían su valor, dado que el GPS estaba disponible para todos y la disponibilidad selectiva había sido desconectada. Las relaciones europeo americanas no complejas¹⁹⁹. El desarrollo del Galileo tiene paralelismos en el desarrollo de capacidades espaciales por los europeos

¹⁹⁸MacKenzie, 1993.

¹⁹⁹Beidleman, 2005.

independientemente de la nasa.

Las primeras indicaciones de su gran precisión mostraban que el impacto del GPS sería mucho mayor de lo que sus creadores habían previsto, mucho más que el impacto del cronometro Harrison del siglo XVIII tuvo al resolver el problema de la longitud. Esta precisión tan sorprendente explica sólo en parte por qué otras naciones como la unión Europea han decidido desarrollar su propio sistema de navegación por satélite, dada la disponibilidad ubicua del GPS de modo universal. En el caso europeo había verdaderos problemas relacionados con la dependencia europea de un sistema proporcionado por un tercero, asociados a debates sobre soberanía e incluso de seguridad si sistemas de navegación críticos quedaban fuera del control de Europa. Aunque EEUU ha pasado a promover el GPS como un recurso de acceso mundial, no facilita la participación en la gestión del GPS ni garantiza el acceso continuo al mismo.

Además a la Comisión Europea le preocupaba que los sistemas actuales no pudieran satisfacer plenamente las necesidades de los usuarios civiles en términos de rendimiento, y se expresaba la necesidad de garantizar que los usuarios europeos no corrieran el riesgo de sufrir cambios en el servicio o tasas o tarifas excesivas en el futuro. Ante una posición dominante o un monopolio virtual, la Comisión afirmaba que sería difícil resistirse a esas tarifas y quizás imposible desarrollar alternativas con rapidez.

La agencia espacial europea (ESA) ha sido la agencia encargada de liderar el desarrollo de un sistema de navegación por satélite independiente del GPS. La ESA es una agencia civil y no da soporte a proyectos militares. Los países Europeos ciertamente deseaban un sistema que pudiesen controlar directamente, sin depender de los americanos. También el Galileo da soporte y estimula el desarrollo tecnológico de Europa frente a Estados Unidos.

El Galileo ha querido además mejorar algunos aspectos técnicos del GPS. En latitudes superiores a los 55 grados, el espaciado de los satélites GPS se limita cada vez más al horizonte del usuario, sin satélites directamente por encima. Esta geometría limitada de los satélites GPS se traduce en una menor precisión global. En consecuencia, Galileo espera mejorar la geometría de los satélites en latitudes más altas orbitando más satélites y haciéndolo con inclinaciones y altitudes mayores que las ofrecidas por el GPS, proporcionando así a los usuarios más satélites y situados más altos en su horizonte, aunque no directamente por encima.

Además de relojes atómicos, el sistema Galileo lleva a bordo un máser de hidrógeno. Los satélites Galileo llevan dos tipos de relojes: patrones de frecuencia atómica de rubidio y máseres de hidrógeno pasivos. La estabilidad del reloj de rubidio es tan buena que sólo perdería tres segundos en un millón de años, mientras que el máser de hidrógeno pasivo es aún más es-

table y sólo perdería un segundo en tres millones de años. Así, un máser de hidrógeno, también conocido como estándar de frecuencia de hidrógeno, es un tipo específico de máser que utiliza las propiedades intrínsecas del átomo de hidrógeno para servir como referencia de frecuencia de precisión.

En el GPS, a diferencia de en sistema europeo Galileo, los aspectos militares y civiles no están formalmente separados. Así, los satélites Galileo son más pequeños y ligeros que los del GPS debido a la ausencia de requisitos militares en su diseño ²⁰⁰. El menor tamaño de los satélites Galileo hace que sea posible el lanzamiento múltiple de varios satélites a bordo de un único cohete Ariane para poblar la constelación.

Otra motivación no descartable como impulsora del desarrollo del Galileo puede ser la adquisición de prestigio e influencia mundial. En 1957 el lanzamiento del Sputnik ruso dio lugar a una carrera espacial internacional para ganar influencia sobre el resto del mundo. Muchos países en vías de desarrollo seguirán al país que consideren más avanzado tecnológicamente, por razones de desarrollo y políticas. Europa considera el espacio como un área de innovación clave para su posicionamiento internacional.

Aunque el GPS y Galileo se basaron en principios diferentes y fueron diseñados para satisfacer las necesidades de comunidades de usuarios distintas, los dos sistemas emplean infraestructuras y conceptos operativos similares. Sin embargo los dos sistemas son compatibles. Se espera que un usuario civil o comercial obtenga el máximo beneficio empleando receptores que combinen ambos sistemas.

Existe un mercado comercial asociado a los sistemas de navegación por satélite. Como los americanos, los europeos cobrarán un canon por cada chip Galileo instalado en dispositivos. El chip se protegerá mediante patentes y codificación de software. Cuando esté operativo, Galileo ofrecerá mejores prestaciones a los usuarios civiles de todo el mundo hasta que las planeadas actualizaciones del GPS surtan efecto. Este solapamiento representa una oportunidad para que los europeos aprovechen el retraso de las actualizaciones del GPS y se hagan con una importante cuota de mercado. Después de esto, los dos sistemas proporcionarán servicios gratuitos análogos con un rendimiento comparable.

²⁰⁰ A diferencia de los satélites GPS, los satélites Galileo no llevan un detector de explosiones nucleares, y no requieren tener una capacidad operativa autónoma de seis meses. Los satélites Galileo tienen como consecuencia una masa de 650 kg cada uno, la mitad que un satélite GPS.

Capítulo 5

Impacto socio-cultural de la navegación por satélite en el siglo XXI

Se plantean en este capítulo una serie de reflexiones filosóficas sobre el impacto cultural y social de la navegación por satélite. La construcción social de la tecnología de navegación por satélite ha dado lugar a diferentes alternativas técnicas de modo explícito, conectadas con grupos sociales relevantes. Se discute su papel como logro científico y tecnológico en el siglo XX, siendo un hecho significativo en la historia de la tecnología. También lo que ha venido a ser propio de estas décadas que llevamos del siglo XXI, que es la integración con otras tecnologías. Se argumenta su carácter de artefacto intangible y la evolución de su uso y funciones desde aquellas funciones propias asignadas inicialmente y su efecto en la geografía como macro estructura intangible permanente, superpuesta a la geografía física. Y finalmente cómo afecta al individuo en aspectos tales como la privacidad y psicológicos como el mapa cognitivo del ser humano.

5.1. La construcción social de la tecnología

Los diseñadores del GPS, o al menos el grupo de técnicos, tenían los sistemas de navegación astronómica y por radio en mente cuando comenzaron a trabajar. Pero como conocen hace mucho tiempo los historiadores de la tecnología, los desarrolladores de nuevas tecnologías muy raramente alcanzan a intuir el impacto que sus invenciones tendrán en el futuro. El GPS comenzó como un sistema destinado a sustituir a los sistemas de radio navegación existentes, cada uno de ellos orientado a un tipo particular de usuario. Cuando

el GPS comenzó sus pruebas operativas a mediados de los 80, sus usuarios se dieron cuenta de que las mayores capacidades del sistema, la precisión que se obtenía y su cobertura global, combinada con los avances en computación y microelectrónica, requerían repensar las comparaciones con los sistemas de navegación conocidos hasta entonces²⁰¹.

Al comparar el paisaje de los sistemas de radionavegación tras la segunda guerra mundial con la lógica posterior de la navegación por satélite, no se trata de decir que la navegación por satélite no añadiera nada nuevo, sino de precisar lo que la navegación por satélite ha venido realmente a representar. Como vimos en la sección 3.5.3, el GPS no fue el primer sistema de radiolocalización global, hiperpreciso o útil para la navegación. Si fue el primero que revolucionó el llamado *segmento usuario*, al combinar todas estas cosas en un aparato tecnológico fácil de usar, no sólo por especialistas, y que además permitió economías de escala para que los receptores GPS fueran baratos, omnipresentes y culturalmente visibles.

A menudo se considera que el GPS inaugura una nueva política geográfica, política evidentemente relacionada con su origen militar estadounidense, ver la sección 4.4.1. El actual tipo de sistema geográfico asociado al GPS ha surgido como una compleja mezcla de diseño intencionado, compromiso social y las propiedades físicas e interpretaciones cambiantes de la radio. Este nuevo paisaje radioeléctrico no es sólo un instrumento desplegado para ciertos fines militares claramente definidos, sino que ha supuesto en la actualidad realmente una reconfiguración de las relaciones de todo tipo, tanto geográficas y económicas como políticas y militares.

Los historiadores del tecnología han argumentado que los sistemas tecnológicos evolucionan a través de un periodo de experimentación, callejones sin salida, y arranques en falso, hasta que una configuración final se determina y se convierte en ampliamente aceptada. Los partidarios de la construcción social de la tecnología²⁰² han argumentado que los cambios políticos, tecnológicos o sociales fuerzan a reexaminar los acuerdos iniciales, resultando en una reapertura del proceso de diseño. Una premisa central de esta aproximación es que uno nunca debe considerar el significado de un artefacto como incluido en la tecnología misma, sino que adquiere su significado a través de las iteraciones sociales.

El caso arquetipo de la construcción social de la tecnología es el de la historia de la bicicleta, documentado por Pinch y Bijker²⁰³. La bicicleta se encontraba en decenas de configuraciones iniciales hasta que se estabilizó en

²⁰¹Cobarsí Ortín, 1998.

²⁰²Bijker, 2010.

²⁰³Bijker, 1997.

la forma de dos ruedas del mismo tamaño, un cuadro en forma de diamante, ruedas neumáticas, y una cadena para impulsar las ruedas traseras. Los recientes avances tecnológicos han vuelto a reabrir el debate sobre la forma de la bicicleta, plegables, eléctricas, etc. con la necesidad de adaptación a un nuevo espectro de usos suscitados por cambios en el contexto social. El análisis de los artefactos singulares como la bicicleta resultó, en efecto, fructífero y convincente, planteando un punto fundamental contra el determinismo tecnológico: la tecnología no tiene su propia lógica intrínseca, sino que está conformada socialmente, incluso a nivel de una máquina singular. Una vez establecido este argumento, la unidad de análisis puede ampliarse a sistemas tecnológicos. Posteriores trabajos en la historia de la tecnología aeronáutica demostraron que que esto también ocurrió en el desarrollo de sistemas muy complejos, como los misiles balísticos intercontinentales²⁰⁴ o en la transición de los Minuteman al misil balístico intercontinental MX²⁰⁵.

El mismo tipo de análisis puede plantearse con el diseño de la navegación por satélite una vez que lo hemos contemplado con el suficiente nivel de detalle en capítulos anteriores. Hemos visto en la sección 4.3 cómo diferentes interpretaciones y necesidades de grupos sociales, marinos, aviadores y militares, sobre lo que debería ser el GPS, conducen a través de diferentes cadenas de problemas y soluciones a diferentes desarrollos *a posteriori*, implicando al contenido del propio sistema tecnológico. La sección 4.4 analiza las influencias de gobiernos, industria y ejércitos en la concepción de estos grandes sistemas tecnológicos, respondiendo afirmativamente a la pregunta de Winner²⁰⁶ sobre si tienen política los artefactos. Cada uno de estos grupos sociales relevantes son la encarnación de determinadas interpretaciones que comparten un mismo conjunto de significados atribuidos al artefacto específico²⁰⁷. Son los agentes cuyas acciones manifiestan los significados que imparten a los artefactos. La navegación por satélite es un ejemplo de sistema tecnológico que comprende una combinación de significados muy diversos: técnicos, sociales, económicos y políticos.

Además en este caso tenemos distintivamente el grupo de usuarios particulares, en lo que podríamos llamar la *domesticación* de la navegación por satélite²⁰⁸, un fenómeno del siglo XXI. En el ámbito doméstico, consumimos tecnologías -o, más exactamente, artefactos técnicos- al integrarlos y utilizarlos. También somos consumidos por los artefactos cuando llaman nuestra atención. Esta doble relación entre humanos y tecnologías es el resultado

²⁰⁴MacKenzie, 1993.

²⁰⁵Spinardi y Spinar, 1994.

²⁰⁶Winner, 1980.

²⁰⁷Bijker y Pinch, 1987.

²⁰⁸Sørensen, 1994.

de un proceso de domesticación. Pero no es únicamente el hecho de que la información del GPS -o en un futuro próximo la del Galileo- esté presente en nuestros teléfonos móviles actuales lo que la ha domesticado. Es la integración del GPS con otras aplicaciones basadas en internet o en ordenador, como información meteorológica por satélite, mapas digitales, redes de telefonía móvil, etc. Esta habilidad de los usuarios de las nuevas tecnologías de adaptarlos a aplicaciones nuevas e inicialmente no previstas es un tópico recurrente en la construcción social de la tecnología²⁰⁹.

5.2. La creación del conocimiento tecnológico

El tecnicismo es uno de los rasgos fundamentales de la cultura moderna, con un género de ciencia que resulta materialmente aprovechable²¹⁰. Comte afirmó que el sentido del conocimiento es el prever y el sentido del prever es hacer posible la acción²¹¹. Se dice que mientras que la ciencia pretende entender el mundo tal y como es, la tecnología pretende cambiar el mundo²¹².

La navegación por satélite es un macro-complejo tecnológico que engloba múltiples tecnologías individuales y múltiples segmentos: espacio (constelaciones de satélites), terrestre (estaciones de seguimiento y control) y usuario (aviones, barcos, coches, etc. todos con sus receptores de usuario). Este macro-complejo resuelve de modo completo el problema de la navegación tal y como se conocía desde la antigüedad.

La tecnología tiene al menos dos dimensiones, que pueden denominarse *instrumental* y *productiva*²¹³. El aspecto instrumental abarca la totalidad de los esfuerzos humanos por controlar sus vidas y sus entornos interfiriendo en el mundo de forma instrumental, utilizando las cosas de forma intencionada e inteligente. El aspecto productivo abarca la totalidad de los esfuerzos humanos por crear artefactos que puedan hacer ciertas cosas de forma controlada e inteligente.

En el aspecto puramente productivo, algunos de los problemas de diseño que la navegación por satélite planteaba habían sido ya tratados en distintos métodos y dispositivos con anterioridad. Por ejemplo los métodos de Sumner y Saint Hilaire, ver la sección 2.3, tienen cierto paralelismo con la resolución del punto fijo que realiza el algoritmo del GPS. Así, la observación de astros separados para evitar la dilución de la precisión que recomendaba Sumner,

²⁰⁹Rankin, 2014.

²¹⁰Ortega y Gasset, 1973.

²¹¹Comte, 2020.

²¹²Franssen et al. 2018.

²¹³Franssen et al. 2018.

ver la sección 2.3.1, recuerda a la selección por parte del usuario de los satélites óptimos dentro de la configuración GPS, sección 4.2.1. El uso de relojes atómicos para el cálculo preciso de la posición, tratado en 4.1.2.2, tiene reminiscencias al problema de la longitud resuelto con el cronómetro marino de Harrison, visto en 2.2. Los problemas asociados a la transmisión de la señal en la navegación por satélite, ver la sección 4.1.1, ya se plantearon con las radioayudas hiperbólicas de alcance global desarrolladas durante y tras la segunda guerra mundial, sección 3.5.3. Ciertamente el crecimiento acumulativo de los conocimientos de ingeniería como resultado de los procesos individuales de selección en cada uno de estos diseños anteriores, actuó para cambiar la naturaleza de cómo se llevan a cabo esos procesos en proyectos posteriores. La ingeniería es una actividad cuantitativa, el parámetro último de diseño del GPS era la precisión con la que debía guiarse una bomba hasta el objetivo, que se traducía en pocos metros aceptables de desviación en la medida de la posición ²¹⁴. Los ingenieros desarrollan herramientas analíticas cuantitativas para predecir los resultados del diseño, y se centran generalmente en las mejoras incrementales en lugar de las desviaciones deliberadas²¹⁵. La navegación por satélite surge en cierta medida como una extrapolación de éxitos tecnológicos anteriores, como el resultado del trabajo heterogéneo de mucha gente durante décadas.

Existieron ciertamente problemas propios dentro del diseño de la navegación por satélite que requirieron el desarrollo de nuevos conocimientos tecnológicos. Con el GPS se lograron una serie de nuevos avances técnicos esenciales, desde un esquema para codificar la información de todos los satélites del sistema en una única señal hasta el desarrollo de los primeros relojes atómicos miniaturizados del mundo que eran lo suficientemente robustos frente a la radiación y los cambios de temperatura para sobrevivir en el espacio.

Las pequeñas diferencias introducidas por la relatividad de Einstein, que normalmente se despreciaban en problemas orbitales, tuvieron que ser por primera vez explícitamente consideradas en la concepción de la navegación por satélite²¹⁶, ya que de otro modo darían lugar a errores que harían la navegación inviable.

De todos los nuevos avances, parece haber un acuerdo general en que la innovadora señal que idearon para el GPS, ver la sección 4.2.2, y que sigue siendo prácticamente la misma 50 años después de que se completara el sistema, contribuyó más que cualquier otro avance técnico a su exitosa

²¹⁴El llamado círculo de error probable

²¹⁵Vincenti y Newman, 2007.

²¹⁶Simonyi, 2012.

implementación y a su rendimiento, versatilidad y eficacia generales²¹⁷. Fue un requisito desde el principio que los usuarios pasivos de la constelación no necesitarían relojes atómicos voluminosos y costosos sino que podrían operar un reloj de cuarzo, ver la sección 4.1.4. Para ello se necesitaba que cada satélite transmitiera en las efemérides no sólo su propia descripción orbital y sus coordenadas de posición, sino también la hora del sistema, el estado del transmisor de cada satélite, los modelos de retardo ionosférico y mucho más, incluso los detalles orbitales y de posición de todos los demás satélites operativos hermanos de la constelación.

La ingeniería es una actividad generadora de conocimiento que incluye la ciencia aplicada, pero no se limita a ella²¹⁸. La navegación por satélite es un desarrollo tecnológico que engloba la aplicación de numerosas facetas científicas, desde mecánica orbital y cuántica hasta como se ha mencionado, la relatividad general. Sin embargo, es necesario referir estos conocimientos obtenidos directamente de la ciencia a comportamientos extremadamente detallados en circunstancias muy concretas, en este caso un satélite en el espacio con un reloj atómico. El conocimiento científico creado en estas circunstancias se genera propiamente dentro de la tecnología. La investigación tecnológica ha llegado a ser a menudo indistinguible de la investigación teórica y aplicada en la ciencia, haciendo que esta transición sea en gran medida un continuo.

En cualquier caso, el conjunto de análisis teóricos a través de cálculos y simulaciones²¹⁹, combinados con experimentos a escala reducida, permitieron reducir la cantidad de ensayos directos y lanzar el primer satélite GPS relativamente pronto. En particular, los experimentos anteriores con *Timation* y *Transit*, ver la sección 4.1.1, aunque eran a una escala mucho menor, dejaron claro que el GPS podía ser técnicamente viable. Mientras que los potenciales beneficios eran evidentes para los militares que querían extender el poder aéreo a largas distancias, la tarea de los ingenieros fue probar que era posible.

Pero la evolución de esta tecnología a gran escala incluye un aspecto instrumental que no proviene sólo de la acumulación de soluciones novedosas a problemas aislados para crear artefactos productivos. Tenía que darse un grupo de circunstancias y posibilidades intelectuales que justificase el cambio de paradigma²²⁰ en la tecnología de la navegación, esto es, la sustitución completa de los astros naturales por satélites artificiales. Se garantizaba así que estuviesen siempre disponibles para servir a nuestras necesidades, sin de-

²¹⁷Weiss, 2021.

²¹⁸Vincenti et al. 1990.

²¹⁹Woodford y Nakamura, 1966.

²²⁰Kuhn, 1962.

pender del entorno natural. Nótese que con la radionavegación, el ser humano ya había realizado una primera aproximación emplear elementos artificiales para navegar, pero no planteó su sustitución completa.

Estas circunstancias que llevan al cambio de paradigma se entienden mejor al considerar que los Estados Unidos venían de culminar con éxito los dos proyectos de ingeniería más ambiciosos llevados a cabo nunca, el proyecto Manhattan de la bomba atómica²²¹ y el proyecto Apollo para poner a un hombre en la Luna²²². Se daban además dentro del marco histórico de la guerra fría que hacía que el proyecto fuese socialmente bien visto, en EEUU al menos. El GPS venía a ser parte así de un *momentum* tecnológico, un impulso tecnológico que da cuenta histórica y constructivamente de los fenómenos deterministas tecnológicos en combinación con la unidad de análisis «sistema tecnológico»²²³. Este impulso acumulado le proporcionó una gran capacidad de crecimiento gracias a las inversiones en capital, tecnología y personas, acumulando desarrollo direccional y velocidad.

5.3. La señal de navegación como artefacto intangible

Por simplicidad, podemos referirnos tanto a la radio navegación como a navegación por satélite como *señales de navegación* transmitidas mediante ondas de radio, ya que en este apartado se analizaran conjuntamente.

En los últimos años, estudiosos de varios campos -desde la antropología hasta los estudios culturales y la historia de la ciencia- se han centrado en la teoría de artefactos como forma de analizar cómo se entrelazan y coproducen el mundo físico y el cultural²²⁴. La teoría de artefactos o de las cosas, como se suele denominar, ha demostrado ser especialmente valiosa para proporcionar un vocabulario que pueda navegar entre el determinismo tecnológico y la pura construcción social²²⁵.

Una definición filosófica estándar de artefacto²²⁶ es que los artefactos son objetos hechos intencionalmente, con el fin de lograr algún propósito²²⁷.

²²¹Rhodes, 2012.

²²²Woods, 2011.

²²³Bijker, 2010.

²²⁴Daston, 2004.

²²⁵La distinción filosófica alemana entre *Ding* y *Objekt* hace hincapié en la materialidad bruta del primero. La esencia de la cosa es que los artefactos físicos, aunque siempre envueltos en supuestos culturales, pueden, no obstante, superar las intenciones humanas y provocar nuevas sorpresas.

²²⁶Preston, 2020.

²²⁷Hilpinen, 1992.

Según la definición estándar, los artefactos deben cumplir tres condiciones. Deben ser producidos intencionadamente, deben implicar una modificación de los materiales y deben ser producidos con una finalidad. Esta definición se basa en última instancia en la distinción que hace Aristóteles entre las cosas que existen por naturaleza y las que existen por arte. En la *Metafísica*, el Estagirita plantea que tal vez sólo las cosas que existen por naturaleza son sustancias, lo que implica que las cosas hechas por el artesano no lo son. No está del todo claro por qué Aristóteles piensa que los artefactos no son sustancias, pero parece dudar de que realmente existan en el sentido pleno que tienen las cosas que existen por naturaleza. La degradación ontológica de los artefactos por parte de Aristóteles alimentó directamente las tendencias de la metafísica del siglo XX que tendían a degradar los objetos ordinarios en general²²⁸.

Conectando con Heidegger, Brown²²⁹ define el artefacto como un elemento material con capacidad de transformación de los valores culturales en derredor. Si el *objeto* es la materia que transporta significado o influencia sin transformación, el *artefacto* altera, convierte, distorsiona y modifica el significado de los elementos que supuestamente transforma.

Aunque solemos reservar el término artefacto para los objetos tangibles y duraderos, entre los objetos fabricados intencionadamente con un fin se incluyen muchos que de naturaleza intangible. Las señales de navegación podrían considerarse como artefactos, siendo entidades construidas con un fin, aunque de naturaleza inmaterial²³⁰.

La señal de navegación entendida como cosa intangible aplicada a los sistema de navegación tiene dos cualidades, lo temporal y lo espacial. Su carácter temporal viene dado por su condición de onda electromagnética, y en este sentido no es distinto de la onda electromagnética en el espectro óptico que se recibe de los astros y que puede utilizarse para la navegación

²²⁸Gabbay et al. 2009.

²²⁹Brown, 2016.

²³⁰En una digresión posiblemente relacionada, puede ser adecuado recordar que hasta hace poco los descubrimientos intangibles y los tangibles ocupaban dos posiciones distintas en el derecho de patentes. Los descubrimientos de conceptos intelectuales intangibles de relaciones científicas o métodos matemáticos generalmente no reciben protección. Los nuevos descubrimientos de elementos tangibles y útiles, artefactos hechos por el arte o artesano, como las nuevas máquinas, los productos químicos o los procesos de fabricación, podían gozar de una importante protección mediante patente. Actualmente sin embargo algunos intangibles pueden ser objeto de protección bajo patente, por ejemplo una señal electrónica o un software con determinadas características puede ser patentable. Están surgiendo nuevas normas que incluyen un conjunto creciente de principios para separar los descubrimientos intangibles patentables con relaciones constantes con contextos físicos de otros descubrimientos intangibles no patentables que carecen de este tipo de relaciones.

celeste clásica. Donde la radionavegación y el GPS divergen de la navegación celestial es en su carácter espacial, y la capacidad de crear macro-estructuras permanentes e intangibles sobre la Tierra ²³¹.

La señal de navegación se ha relacionado con una amplia variedad de metáforas materiales, como una aerovía, una hipérbola, una cuadrícula, etc. Un claro ejemplo es la representación en los mapas de las hipérbolas y cuadrículas creadas por la intersección de haces como si fuesen un accidente geográfico permanente más, ver figura 3.20. Los fenómenos de interés desde el punto de vista de la interacción humana con el entorno no se dividen de forma natural en interacciones con artefactos e interacciones con otro tipo de cosas. Las aerovías, sí se califican de artefactos, se utilizan de la misma manera que las vías férreas de un tren convencional. Así, en su aplicación a la navegación, la señal de radio puede considerarse una realidad tangible, con relaciones constantes con contextos físicos y no efímera, con una presencia que sustituye a la presencia permanente de los astros, pasando a ser una realidad intrínsecamente espacial. Va más allá de la división conceptual que por defecto suele hacerse entre un paisaje estable de componentes materiales y una configuración supuestamente temporal de sonidos, radiación, etc.

Las señales de navegación vía radio se expanden y cruzan límites geográficos y políticos, son intrínsecamente internacionales. En la Segunda Guerra Mundial, la facilidad con la que la señal podía invadir el territorio enemigo fue su principal ventaja. Sistemas como el Loran, el Decca o el GPS pueden considerarse de modo ingenuo como señales de radio que no dejan rastro y no violan la soberanía de nadie. Pero en su aplicación militar primigenia, tal y como fue concebida, incluso antes de que las tropas de un país estén sobre el terreno, ya existe una infraestructura. Durante la Guerra del Golfo, los iraquíes sufrieron la invasión inexorable de su territorio por el GPS antes de la llegada de las tropas norteamericanas. Cuando el GPS fue concebido como un sistema militar, se consideraba un nuevo tipo de fuerza espacial, capaz de reconfigurar los supuestos básicos de presencia, ocupación y control geográficos. Puede considerarse que el GPS inauguró una nueva política geográfica, relacionada con su origen militar estadounidense ²³².

²³¹Otro ejemplo de futura macro infraestructura intangible podría ser la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), una estructura espacial propuesta para detectar y medir con precisión las ondas gravitacionales, consistente en una constelación de tres naves espaciales dispuestas en un triángulo equilátero de 2,5 millones de kilómetros de lado

²³²El sistema Galileo es un sistema civil explotado por un concesionario privado. Galileo se rige únicamente por parámetros de diseño civil, proporcionando un conjunto de servicios de alto rendimiento orientados a las necesidades de los usuarios civiles, y ninguno de los servicios de Galileo se ha creado teniendo en cuenta las necesidades de los usuarios militares. Estados Unidos sigue poniendo a disposición de los países aliados el código militar del GPS, de mayor precisión.

El análisis de la radio-navegación y la navegación por satélite muestra lo geográficamente presente que puede estar un objeto intangible. Sin duda, existen mecanismos legales para tratar los características intangibles - derechos de asignación de frecuencias, la antigua disponibilidad selectiva del GPS-, pero estos existen exactamente por los desajustes con la geografía legal estándar.

Existe una diferencia entre ambas sin embargo. Durante muchas décadas se subrayó y explotó explícitamente el carácter de cosa de la radionavegación mediante analogías con las vías férreas o hipérbolas en el cielo. Con la llegada de la navegación por satélite, se tiende a ignorar su presencia permanente y geográfica, su carácter de artefacto suele obviarse y la invisibilidad se utiliza a menudo como una forma conveniente de evitar responsabilidades o problemas, como la invasión de la privacidad individual, ver la sección 5.5.

5.4. Versatilidad de funciones

La función es una característica destacada de los artefactos. Una aproximación a la metafísica de los artefactos defiende que la naturaleza de los mismos se define por el contexto de las intenciones de sus creadores²³³, la identidad del artefacto se la da las intenciones de sus diseñadores. Los artefactos están hechos para servir a fines humanos, por lo que hay que tener en cuenta los estados intencionales humanos, es decir, las descripciones de la función de los artefactos pueden clasificarse de forma útil en función del papel que otorgan a las intenciones en el establecimiento de las funciones²³⁴. En un extremo del espectro se encuentran los relatos que giran en torno a las intenciones humanas, mientras que en el otro extremo están los relatos que se centran en los factores no intencionales; en medio hay una variedad de relatos que mezclan factores intencionales y no intencionales en diversas proporciones.

Así, la función intencional de proporcional navegación militar de alta precisión asignada al GPS ha sido complementada por aplicaciones no intencionales, el sistema ha evolucionado adoptando funciones que no estaban inicialmente previstas como el guiado automático de aeronaves, cronometraje, topografía, comercial, análisis de mercado, meteorología, seguridad pública, respuestas a emergencias, detección de terremotos, tareas geodésicas, etc. Los seres humanos son muy buenos para adoptar cualquier artefacto que cumpla sus propósitos, independientemente de su función adecuada. La alta precisión

²³³Vega Encabo y Muñoz Serrano, 2018.

²³⁴Preston, 2009.

obtenida combinado con la simplicidad de los equipos a nivel usuario, ha sido la clave para la versatilidad de la tecnología.

El GPS no es sólo un sistema de navegación. Las señales sincronizadas al nanosegundo permiten que el GPS pueda adaptarse para ser el reloj mundial. Actualmente sus señales sincronizan vastos flujos de transacciones financieras, comunicaciones, energía eléctrica, señales de control y una miríada de otros flujos de datos y mediciones que se han convertido en esenciales a nivel mundial para el comercio, las redes eléctricas, el transporte terrestre, marítimo y aéreo y la navegación, las maniobras militares, el tráfico de Internet y muchas, muchas otras actividades y servicios.

El tiempo GPS se emplea para comparar las medidas temporales de distintos relojes atómicos repartidos por el mundo. Ambos satélites observan la misma señal GPS de modo simultáneo, y a través de cálculos mas o menos complejos, pueden obtener la desviación de ambos relojes.

Las compañías de telefonía móvil emplean el tiempo GPS para obtener tiempo de precisión con el que combinar distintas señales. El tiempo GPS se emplea en la sincronización precisa de las señales de telefonía. Al desplazarse el usuario de telefonía móvil, el teléfono permanece en la red, desplazándose de un nodo a otro, y esto no sería posible sin una sincronización muy precisa del tiempo²³⁵. El GPS, mediante un receptor instalado en cada una de las torres, provee a las redes de telefonía de este tiempo universal, en la que es la aplicación comercial mas extendida del GPS.

Las señales GPS se emplean igualmente para sincronizar la red eléctrica a grandes distancias. Por otro lado, la interconexión de las redes eléctricas, por ejemplo las europeas que forman parte de la red europea CESA, la *Continental Europe Synchronous Area*, no sería posible sin la información de sincronización que proporciona el GPS.

El tiempo GPS se emplea para industria financiera mundial, especialmente para operaciones de alta frecuencia especulativas. Los servicios financieros también operan con señales GPS para sincronizar sus operaciones a nivel mundial, donde los milisegundos de retraso en comprar o vender pueden traducirse en pérdidas millonarias.

El tiempo GPS se emplea en el Fermilab para calcular las velocidades de neutrinos. En los planes originales el GPS no se consideraba para mantener información temporal. La dependencia actual es enorme y no existe un sistema alternativo, aunque se está desarrollando el *eLORAN* como sistema de soporte temporal.

Existen otras múltiples funciones no inicialmente previstas. Los drones, una tecnología también muy dependiente del GPS y de la navegación inercial,

²³⁵Milner, 2016.

fueron una idea latente en el mundo de la aviación durante décadas, sin que fuese posible su desarrollo efectivo hasta la llegada del GPS.

En su transmisión desde el satélite al usuario, la señal de navegación atraviesa dos tipos de interferencia atmosférica. La ionosfera, que contiene electrones libres entre 50 y 1000 km de altura retrasa la señal. Este efecto es bien conocido y estable y por tanto puede modelarse adecuadamente y reducirse al utilizar dos señales de transmisión. La troposfera, la parte de la atmósfera más cercana a la Tierra y que contiene vapor de agua y gases, da lugar a efectos que son más difíciles de mitigar. De la observación de la señal GPS puede obtenerse una indicación de la cantidad de vapor de agua que hay presente en la atmósfera, que es una información complementaria muy útil a la hora de predecir el tiempo atmosférico.

Además, el GPS es un instrumento útil para los vulcanólogos. Cuando un volcán emite partículas a la atmósfera, la ceniza degrada la débil señal GPS, reduciendo su amplitud. La disminución de la señal es una indicación de la cantidad de ceniza presente en el aire. La ceniza volcánica no es detectable por el radar y representa un peligro para los aviones, ya que puede afectar al funcionamiento de los motores. Ni la medida de ceniza volcánica ni la medida de vapor de agua fueron parte del concepto original del GPS.

La teoría pluralista de Preston²³⁶ sobre la función de los artefactos podría servir de explicación, según la cual los artefactos tienen tanto funciones propias como funciones de sistema²³⁷. En cuanto a la función propia, Preston se basa en el relato de Millikan²³⁸ sobre la función propia directa. Desde el punto de vista de Millikan, lo que ella llama funciones propias directas, ya sean biológicas o artefactuales, se establecen mediante una historia de selección y reproducción para el efecto que constituye la función. Así, lo esencial para establecer la función de un artefacto es si sus antepasados -artefactos de ese tipo- se reprodujeron o no para ese efecto. Es evidente que las funciones mencionadas de sincronización, tiempo universal, geodesia, etc. no eran funciones que los antecesores directos del GPS o de Galileo, los sistemas de navegación celeste o de radio, pudiesen llevar a cabo.

Preston sostiene que las intenciones humanas no surgen en el vacío, sino que se reproducen en y a través del proceso por el que se reproduce la cultura material, con su miríada de artefactos funcionales²³⁹.

²³⁶Preston, 2013.

²³⁷Por ejemplo, la función propia de los platos es sostener la comida para servirla o comerla. Pero funcionan igualmente bien como platillos para las plantas en maceta.

²³⁸Millikan, 1999.

²³⁹Las intenciones de fabricar platos se reproducen en las culturas de los platos con tanta seguridad como los propios platos; y sólo en las culturas con plantas en maceta y platos se forman las intenciones de utilizar los platos como platillos.

Algunas de estas funciones surgen de un mal funcionamiento del sistema. Al igual que cualquier teoría de la representación debe dar cuenta de la tergiversación, cualquier teoría de la función debe decir algo sobre los casos de incumplimiento, y si ese incumplimiento es un mal funcionamiento o algo más. Abordar esta cuestión depende en cierta medida de la distinción entre funciones propias y no propias, ya que el mal funcionamiento sólo parece una designación adecuada en el caso de que no se realice una función propia, es decir, que no se haga lo que se supone que debe hacer el artefacto. El GPS se diseñó con un código militar encriptado, que dotaba a sus usuarios autorizados de una mayor precisión que el código civil abierto. La señal militar era impenetrable, pero la señal en sí podía recibirse. Al combinar la posición de los satélites con la fase de la señal militar, algunos científicos norteamericanos que trabajan en dinámica de placas tectónicas, descubrieron que podían obtener precisiones en la localización en el orden de milímetros, muy superiores a las que proporcionaba el código militar. Si bien la localización no podía obtenerse en tiempo real, sino que había que recibir datos durante algunos días para poder obtenerla, es un ejemplo de incumplimiento de la encriptación fue explotado para conseguir una función adicional no prevista²⁴⁰.

El concepto marxista de alineación se refiere esencialmente a la experiencia del trabajador cuya acción crea un objeto en el cual el trabajador se ve reflejado y contenido, cuando al mismo tiempo este objeto es una entidad independiente, desconectada de su creador. El usuario es indudablemente parte del sistema, pero originalmente sólo lo era en la medida en que sus acciones se adaptan e incluyen en el sistema. Y esto debido a la falta de transparencia o codificación del diseño original²⁴¹. Sin embargo en la historia del GPS se demuestra que ha habido instancias, como el desarrollo del GPS diferencial el mencionado uso para medir movimientos tectónicos, en el que el usuario ha podido utilizar la señal de navegación GPS para obtener de ella capacidades que en principio le estaban vedadas.

5.5. Privacidad del hombre-masa

Las sociedades actuales son completamente tecnológicas y todas las tecnologías son culturalmente penetrantes. Las tecnologías no se limitan a ser una ayuda en la vida cotidiana, sino que son fuerzas poderosas que actúan para remodelar las actividades humanas y sus significados²⁴². Existen en particular múltiples usos del GPS que afectan a la privacidad individual.

²⁴⁰Milner, 2016.

²⁴¹Quintanilla Fisac, 2018.

²⁴²Bijker, 2010.

Lo cierto es que la navegación por satélite, en combinación principalmente con internet y el desarrollo de la tecnología móvil, han generado una marea de cambios sociales, económicos y militares en la sociedad moderna. Internet, que fue concebido como un sistema para compartir recursos por el Departamento de Defensa americano. La telefonía móvil fue inventada teóricamente por los laboratorios Bell y su primer desarrollo fue un teléfono Motorola en 1973. Desde que *IBM* presentó el primer teléfono inteligente en 1993, los teléfonos móviles han pasado de estar centrados en la telefonía a estar centrados en los datos, siendo realmente ordenadores de uso general valorados principalmente por su software, funciones de grabación y reproducción de medios, sensores y acceso a Internet, que también, de modo secundario, pueden utilizarse para llamar a personas. Este cambio de función quedó ejemplificado con la presentación del iPhone de primera generación por parte de Apple en 2007 y con el lanzamiento del sistema operativo de código abierto Android en 2008.

El iPhone, aunque no fue el primer teléfono inteligente como tal, fue el primero que integró de modo sencillo para el usuario multitud de funciones, entre ellas la navegación por satélite combinada con los sistemas de información geográfica. Los teléfonos inteligentes emplean la posición de las torres de telefonía móvil cercanas, para obtener una primera solución y conocer que satélites son los que tienen que buscar ²⁴³. Con esta integración, la información de navegación se hizo por primera vez accesible al usuario medio.

Si sólo se mostrase en un teléfono inteligente la información de navegación mediante la latitud y la longitud, sería de muy poca relevancia para el usuario medio. La diferencia es que los datos de navegación están combinados con servicios que dan las condiciones del tráfico, información meteorológica, localización de restaurantes o comercios locales,²⁴⁴ lo que les ha hecho muy útiles. Los chips GPS de bajo coste comercializados como componentes estándar de estos teléfonos inteligentes, permiten determinar la ubicación casi al instante y con una precisión de unos pocos metros, y han dado lugar al desarrollo de numerosos servicios basados en la localización, búsqueda de negocios cercanos, localización de rutas etc..²⁴⁵

²⁴³Aunque es una mejora que permite al usuario conocer su posición con mayor rapidez, puede pensarse que va en contra de la naturaleza pasiva del GPS. Los usuarios que no quieran ser detectados, pueden utilizar un receptor GPS en vez de un teléfono inteligente, y emplear un mapa para introducir una primera aproximación de su latitud y longitud.

²⁴⁴G. Miller, 2012.

²⁴⁵Los datos de localización de los teléfonos inteligentes se han identificado con frecuencia como la base de la vigilancia COVID-19. En principio, es posible detectar cuando dos teléfonos inteligentes se acercan a una distancia determinada durante un periodo de tiempo determinado, siendo el GPS una forma obvia de hacerlo.

Para el público en general, la navegación por satélite se ha convertido en sinónimo de la pérdida de privacidad por la posibilidad de revelar la información de posición del usuario del teléfono inteligente. Las tecnologías de los sistemas de información geográfica, alimentadas continuamente por flujos de datos de coordenadas terrestres derivados del sistema de navegación, han suscitado la preocupación del público por la privacidad de la información, principalmente por su capacidad de integración rápida de información espacial y personal procedente de diversas fuentes. Sin embargo debe recordarse que la navegación por satélite como tal es un sistema absolutamente pasivo que no revela la posición de su usuario. Los usuarios no emiten ningún tipo de señal, son meros receptores de la información. Esto hace que el número de receptores potenciales sea ilimitado, el sistema de navegación desconoce cuantos usuarios están recibiendo su señal y no tiene un límite al número de usuarios que puede gestionar.

Lo que generalmente ocurre es que los proveedores de dichos servicios adquirieren las localizaciones de sus usuarios y agregan y comercializan dicha información a terceros. En principio, estas prácticas sólo se producen cuando los usuarios optan por ellas; en la práctica, sin embargo, muchos usuarios prestan poca atención a las condiciones detalladas de estos servicios.

Además, aunque debido a su baja potencia las señales de navegación no pueden obtenerse dentro de edificios, la información de localización puede obtenerse por medio de otras señales presentes en el teléfono inteligente, la red de telefonía móvil, el wifi, sensores inerciales e incluso la brújula magnética que incorporan. Los sistemas tecnológicos como la red de telefónica móvil o el wifi necesitan que el usuario transmita su señal.

En cualquier caso, bien a través del teléfono o bien por un dispositivo dedicado, la navegación por satélite permite que un usuario sea seguido, quizás por autoridades o cuerpos de policía en caso necesario.

De hecho, las ventajas son innumerables, y el seguimiento humano no es del todo malo. Los montañeros, por ejemplo, pueden tener la seguridad de que, si tienen un accidente mientras escalan, una llamada alertará a un servicio de emergencia e informará casi con precisión de dónde se encuentran. El E112²⁴⁶ es una versión mejorada de la localización del servicio de emergencias 112, en la que los servicios de emergencia reciben la posición de la persona en apuros, lo que les permite localizar la posición de la persona que llama de forma rápida y precisa. Para apoyar esto, en diciembre de 2018, la Comisión Europea adoptó nuevas medidas que exigen que todos los teléfonos inteligentes vendidos en la UE a partir de marzo de 2022 tengan capacidad de navegación por satélite, en particular la capacidad de Galileo,

²⁴⁶«what you need to know about E112», 2015.

para que puedan utilizarla para proporcionar información sobre la ubicación de la persona que llama a los servicios de emergencia.

Sin embargo, al igual que con muchas otras tecnologías de la información, se plantea la dicotomía entre la seguridad física y personal, por un lado, y la privacidad y la libertad personal, por otro. La extensión de la información de navegación desde los especialistas hasta el público general abre cuestiones sobre la libertad individual, con dimensiones técnicas y sociales. De ahí que las innumerables ventajas se vean contrarrestadas por peligros sociales sin parangón en la historia de la humanidad. Los beneficios reciben más cumplidos de lo debido en la publicidad comercial, mientras que los peligros son ignorados por los vendedores y, con demasiada frecuencia, también por los funcionarios públicos.

Este este nuevo y potencial *geo-esclavismo*²⁴⁷ puede adoptar formas muy diversas. Por ejemplo las grandes empresas de transporte por carretera o de taxis instalan seguidores GPS para saber dónde están sus conductores en cada momento. Las policías del mundo instalan rastreadores GPS en vehículos de potenciales delincuentes para seguir sus movimientos. Muchas veces la autorización judicial no es necesaria al considerarse un sistema menos invasivo que por ejemplo los dispositivos de escucha. Existe un temor al intrusismo sin obstáculos de las autoridades en la vida privada. Los dispositivos con pulsera y GPS son habituales en delincuentes condenados en situación de libertad condicional.

Frente al concepto de geo-esclavismo surge el de *geo-privacidad*²⁴⁸, cómo proteger los derechos individuales de privacidad y evitar que los datos de localización individual se divulguen. Un mejor uso de los datos de geolocalización en relación con aspectos éticos y morales de la adquisición, agregación y tratamiento de los datos está actualmente en discusión por la comunidad científica²⁴⁹.

La tecnología en sí misma no es ni buena ni mala, y desde luego no puede ser considerada responsable de los pecados de la sociedad. Pero la tecnología puede dar poder a quienes eligen tener un comportamiento bueno o malo. Y en cualquier caso el GPS es sin embargo solo uno de los múltiples sistemas tecnológicos que han provocado esta situación.

Posiblemente este sistema tecnológico en combinación con los mencionados de teléfonos inteligentes, ha contribuido al que Ortega consideraba uno de los mayores peligros que amenazaban a la civilización, la *estatificación* de la vida, el intervencionismo del estado. Los sistemas tecnológicos grandes y

²⁴⁷Dobson y Fisher, 2003.

²⁴⁸Kwan et al. 2004.

²⁴⁹Nelson et al. 2022.

sofisticados, como el que nos ocupa, son por definición muy compatibles con el control centralizado y jerárquico²⁵⁰. La visión de Habermas de un mundo sistémico que invade el mundo de la vida²⁵¹ es típica del tipo de concepciones que conducen a una visión de la tecnología como una fuerza fuera de control, como una creación humana que viene a perseguir a su creador. Aún así, sistemas como el GPS o el Galileo complementan perfectamente el papel del estado como productor de seguridad, la seguridad de que nace el hombre-masa²⁵², el conformista auto-suficiente al que la vida le parece fácil, que se siente en control de la realidad que le rodea.

5.6. Pérdida del mapa cognitivo

Podríamos inicialmente pensar que gracias a la navegación por satélite, que elimina las tradicionales barreras entre tierra y los océanos, e incluso barreras transnacionales, el contenido de la vida en el hombre de tipo medio se extiende sin límite, hasta potencialmente llegar a abarcar todo el planeta. Se hace realidad a través de la navegación por satélite que cada individuo vive habitualmente en todo el mundo²⁵³. Sin embargo la realidad parece ser muy distinta. El acceso a los recursos de navegación para el individuo medio no parece haber contribuido a su conciencia del espacio ni del tiempo, sino que al contrario parece haberla disminuido.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de personas que utilizan dispositivos de este tipo en todo el mundo, esto va a ser un problema cada vez mayor. El aumento de los dispositivos personales con geo-localización y su integración con las funcionalidades del teléfono inteligente ha sido tan meteórico que aún no alcanzamos a comprender todo su alcance, y cómo afecta al mapa cognitivo humano²⁵⁴. Lo que parece es que se estrecha el mapa cognitivo, con una disminución radical de nuestras habilidades para la navegación. Los dispositivos con navegación pueden afectar negativamente a la memoria, la percepción, la atención, la autonomía intelectual y la atención intelectual²⁵⁵. La pérdida de cognición espacial y de nuestra conciencia espacial tienen efectos sobre nuestra sensación general de bienestar²⁵⁶.

Los artefactos, si aceptamos denominar a la navegación por satélite como tal, no son sólo objetos de conocimiento, sino que también participan

²⁵⁰Winner, 1987.

²⁵¹Mouzelis, 1992.

²⁵²Ortega y Gasset, 1964.

²⁵³Ortega y Gasset, 1973.

²⁵⁴LaMarca y De Lara, 2008.

²⁵⁵Gillett y Heersmink, 2019.

²⁵⁶Krueger, 2020.

en la propia cognición. Nadie pone en duda que los seres humanos utilizan artefactos en sus prácticas cognitivas. Sin embargo, en los últimos años, un conjunto de enfoques poco interconectados ha caracterizado a los artefactos como mucho más íntimamente involucrados en estos procesos de lo que el mero uso podría sugerir²⁵⁷.

Una gran mayoría de la literatura sobre el uso de la tecnología ha encontrado evidencia de que cuando los individuos dependen en gran medida del uso de la tecnología hay un costo para los procesos cognitivos²⁵⁸ en las áreas de atención, aprendizaje y memoria²⁵⁹. El dispositivo portátil hace que la navegación deje de ser algo profundamente arraigado en la sabiduría transmitida durante miles de años y se convierta en una mercancía que ofrece respuestas instantáneas desprovistas de cultura y contexto²⁶⁰. El dispositivo libera a sus usuarios de la necesidad de comprometerse a fondo con el terreno, ya que el sistema lo hace por ellos. Alivia la necesidad de dedicarse a un largo y exigente periodo de desarrollo de habilidades bajo la tutela de expertos²⁶¹. Aprender a utilizar con éxito el sistema puede llevar un día, incluso una semana, pero no años de pruebas exigentes y muchos errores. Al permitirnos ir de A a B simplemente siguiendo órdenes giro a giro, lo que la tecnología ha hecho es eliminar el orden mental del mapa cognitivo que se habría creado de no ser por la existencia de la navegación por satélite²⁶². Sin embargo no son pocos los casos de accidentes graves causados porque el dispositivo funciona *demasiado bien* y nos lleva por la ruta más corta, que atraviesa un camino impracticable o un río, sin que en ningún momento se cuestione hasta que es demasiado tarde. Los dispositivos GPS agilizan una tarea epistémica compleja, pero también mitigan el menoscabo de ciertas virtudes epistémicas, especialmente la autonomía intelectual y la prudencia²⁶³.

La tecnología GPS se entiende mejor si se considera como un ejemplo

²⁵⁷Preston, 2020.

²⁵⁸Tolman Tolman, 1948 desarrolló la idea de un mapa cognitivo como alternativa al modelo de una central de aprendizaje y memoria, típica de las formulaciones estímulo-respuesta. Esta posición puede resumirse de forma sucinta como la idea de que los animales desarrollan expectativas de su mundo y a través de estas expectativas organizan su comportamiento. El aprendizaje se produce al añadir detalles al mapa cognitivo, incrementando la capacidad de percibir el mundo como un todo. El mapa cognitivo era una metáfora para entender el comportamiento. Tolman se separaba así de los conductistas como Hull o Skinner, que consideraban el comportamiento como una función de las historias ambientales de refuerzo.

²⁵⁹Eyyam y Yaratan, 2014; Kuznekoff y Titsworth, 2013; Sparrow et al. 2011.

²⁶⁰Robbins, 2010.

²⁶¹Aporta y Higgs, 2005.

²⁶²Hutchinson, 2009.

²⁶³Gillett y Heersmink, 2019.

del paradigma del dispositivo²⁶⁴. Exigen menos habilidad y atención al proporcionar orientación y navegación como una mercancía, con disponibilidad instantánea, ubicuidad, seguridad y facilidad de uso, lo que resulta en la pérdida de compromiso con el entorno, pérdida de la necesidad de interpretar el mundo. Los usuarios permanecen desconectados de su entorno, reduciéndose la necesidad de prestar atención. No es necesario procesar la información, ya que está permanentemente disponible. La navegación por satélite a nivel usuario constituye un paradigma de mínimo conocimiento útil. El usuario no tiene siquiera la ocasión de plantearse la razón del movimiento de los astros en el firmamento, como pudo hacer en algún momento el marino del siglo XIX.

El experimento mental de Descartes, sentado delante del fuego y eliminado todo condicionante externo, conjuraba la imagen de un ser humano sobrepasado por la complejidad del mundo exterior, desesperado por encontrar cómo llevar orden al mundo y hacerlo comprensible²⁶⁵. La tecnología, en todas sus manifestaciones, incluida la navegación por satélite, representa una focalización del orden estructural y funcional, desplazando el desorden natural y la entropía²⁶⁶. La navegación por satélite desplaza el sistema natural de astros empleado durante siglos en la navegación celestial, por órbitas satelitales perfectamente conocidas, controlables, medibles y predecibles. Incluso el orbe terrestre, con toda su complejidad, se sustituye por modelos paramétricos sencillos, como el WGS84, ver la sección 6.2, en realidad controlado por la *National Geospatial Intelligence Agency*, una de las cuatro agencias auxiliares del Departamento de Defensa americano y se emplea de modo habitual sin más cuestiones. Otras aplicaciones muy comunes como *Google Maps* nos dan representaciones de la Tierra muy distorsionadas, empleando una representación conocida como *Web Mercator* que considera la tierra como esférica para simplificar los cálculos²⁶⁷.

La consecuencia es que la tecnología parece así realimentar lo que Heidegger o Arendt expusieron como errores fundamentales de la modernidad, el hombre se retrotrae en el espacio confinado de su aparato perceptual, limitado en este caso por modelos artificiales²⁶⁸. En la oposición entre lo natural y lo artificial, el hombre moderno ha optado, o le ha sido impuesto, lo artificial, al menos en lo que respecta a su forma de orientarse en el mundo. El relato marxista ortodoxo del cambio tecnológico sostenía que la tecnología, entendida como fuerzas de producción, a largo plazo socavaría el capitalismo.

²⁶⁴Borgmann, 1987.

²⁶⁵Descartes, 2005.

²⁶⁶Prigogine y Stengers, 2018.

²⁶⁷Milner, 2016, p. 241.

²⁶⁸Nordmann, 2016, p. 112.

Así, el desarrollo de la tecnología se percibía como progresivo. La visión a corto plazo sostenía que la maquinaria era una herramienta potencial de la burguesía contra la clase obrera . Esta ambigüedad puede considerarse típica de la época moderna. La creencia optimista en el futuro, tan común entre los ingenieros y técnicos, contrasta con la ambivalencia y el pesimismo que suelen tener los teóricos sociales y los filósofos .

Winner definió dos conceptos que pueden ser significativos en este contexto²⁶⁹. Por un lado, la *adaptación inversa* como el ajuste de los fines humanos para que coincidan con el carácter de los medios disponibles y el *imperativo tecnológico* como las estructuras definidas por las tecnologías cuyas condiciones de funcionamiento exigen la reestructuración de sus entornos. En este sentido nuestra creciente dependencia y adicción al poder técnico, que se concentra de forma exponencial está, en conjunto, agotando nuestras habilidades y nuestra comprensión.

En la gestión de la relación entre la realización de una tarea de navegación o de búsqueda de caminos y la utilización de un dispositivo GPS, la diligencia cognitiva²⁷⁰ sugeriría que el usuario debe encontrar el equilibrio entre ser demasiado meticuloso en la comprobación de todos los aspectos de la información producida por el dispositivo y ser demasiado confiado.

²⁶⁹Winner, 1978.

²⁷⁰Menary, 2018.

Capítulo 6

Apéndice

6.1. Sistemas de referencia celeste

Un sistema de coordenadas incluye un origen, la dirección de sus ejes fundamentales y una serie de convenciones, procedimientos y constantes. Esta serie de convenciones incluyen por ejemplo los modelos para el movimiento del eje terrestre en el espacio ²⁷¹.

Los sistemas de coordenadas celestes permiten la identificación de las coordenadas espaciales de un objeto celeste en el espacio junto con su trayectoria en el tiempo²⁷². En este tipo de sistemas es habitual emplear coordenada angulares al referirse a los astros y coordenadas cartesianas para satélites artificiales. Las coordenadas celestes ya se usaban en la remota antigüedad. Varios sistemas fueron descritos por el antiguo geómetra griego Euclides (c. 300 A.C.). Para consignar las posiciones angulares de los astros se emplean varios sistemas de referencia. El catálogo de estrellas de Hiparco, publicado en el Almagesto de Ptolomeo, contenía las posiciones de 1.022 estrellas en el sistema de coordenadas eclípticas.

6.1.1. Sistema local de coordenadas horizontales

El primer sistema de referencia celestial es el de las coordenadas horizontales, que es un sistema de referencia local al observador. También se conoce como sistema ENU, por East, North, Up,²⁷³. Para un observador situado en un punto O de la superficie terrestre, adoptamos el horizonte local del lugar que ocupa como círculo máximo fundamental. La perpendicular al horizonte

²⁷¹Precesión, nutación, movimiento de los polos

²⁷²Blewitt, 2013.

²⁷³Subirana et al. 2013.

es la vertical del lugar, y los polos serán el cenit, directamente sobre la cabeza del observador, y el nadir, bajo sus pies.

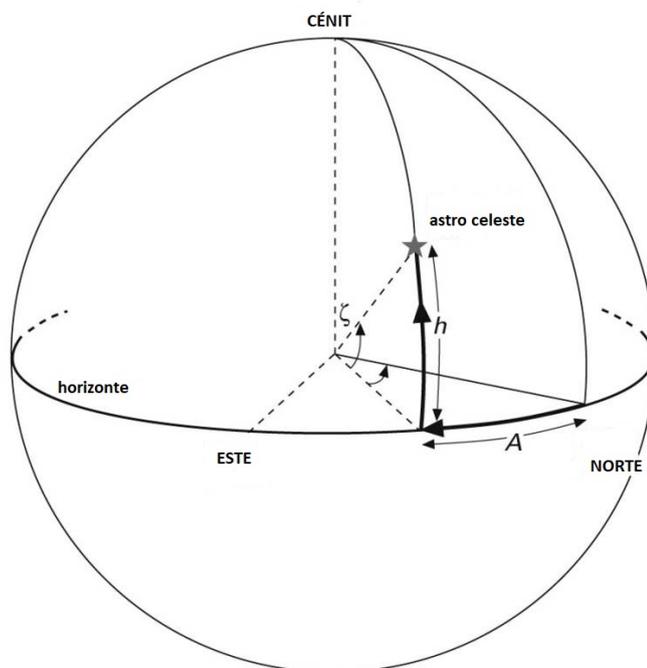


Figura 6.1: Sistema de coordenadas horizontales

La posición del astro se determina mediante dos coordenadas, el azimut A y la elevación o altura h . El azimut es el arco de horizonte comprendido entre el punto cardinal Norte y el círculo vertical que pasa por el astro. Se cuenta en sentido horario o retrógrado (N-E-S-O). La altura h es el arco de círculo vertical comprendido entre el astro y el horizonte. Como alternativa a la altura se emplea la distancia cenital, ζ , donde $\zeta = 90 - h$.

6.1.2. Sistema terrestre de coordenadas horarias

En este sistema, centrado en la tierra, y que gira con ella en su rotación diaria, encontramos como plano fundamental el ecuador celeste, proyección sobre la esfera celeste del ecuador terrestre y sus polos son las proyecciones de los polos terrestres. El eje Z coincide con el eje de rotación terrestre y el eje X corresponde a la intersección del meridiano de Greenwich con el ecuador

²⁷⁴Otros marcos de referencia terrestres son el Sistema Geodésico Mundial 84 (WGS-84), que se aplica para el GPS, la Parametría Zemli 1990 (Parámetros de la Tierra 1990)

6.1.3. Sistema ecuatorial

Como la dirección del eje de la Tierra permanece casi constante, entonces el plano del ecuador será adecuado como plano de referencia y además es independiente de la posición del observador. La intersección de la esfera celeste y el plano del ecuador es llamada ecuador celeste. El ángulo medido desde el ecuador celeste a lo largo del meridiano que pasa por la estrella es llamado declinación, coordenada no afectada por la rotación terrestre. Para definir la segunda coordenada, la ascensión recta, se elige el punto de Aries como referencia en el Ecuador, correspondiente al equinocio vernal ²⁷⁵. La ascensión recta se mide en sentido contrario a las agujas del reloj desde Aires hasta el punto donde corta al ecuador terrestre el meridiano que pasa por la estrella. El ángulo horario es medido en el ecuador desde el meridiano superior que pasa por el observador en sentido de las agujas del reloj, y varía con la rotación terrestre. El ángulo horario del punto Aries es el tiempo sideral. Cuando una estrella pasa por su altura máxima, su ascensión recta coincide con el tiempo sideral, de esta forma cada punto de la Tierra tiene un tiempo sideral diferente.

6.1.4. Sistema Internacional de Referencia

Este sistema no depende del polo de la eclíptica o del polo de rotación terrestre. Su origen está en el baricentro del Sistema Solar, con ejes que pretenden no mostrar ninguna rotación global con respecto a un conjunto de quasars. Su plano principal está en el ecuador celestial en J2000. El origen de su ascensión recta apunta a la constelación de Aries. El sistema puede denominarse quasi-inercial, su no-rotación no es una característica física, sino que se consigue a través de restricciones matemáticas, es cinemáticamente no rotatorio.

(PZ-90) para Glonass, el Marco de Referencia Terrestre Galileo (GTRF) para Galileo o el Sistema de Coordenadas Geodésicas de China 2000 (CGCS2000) para Beidou.

²⁷⁵Un equinoccio marca el punto en el tiempo en el que el Sol no tiene declinación ni norte ni sur, sino que está cruzando el ecuador celeste. De los dos posibles equinoccios los antiguos griegos eligieron el equinoccio de marzo como punto de partida. Esto coincidió con el festival de Hilaria, una época de optimismo y comienzos en la que los agricultores comenzaron a sembrar u observaron el primer crecimiento y florecimiento de los árboles y los cultivos de verano. El Punto de Aries se llama así porque, cuando Hiparco lo definió en el año 130 a.C., se encontraba en el extremo occidental de la constelación de Aries, cerca de su frontera con Piscis y la estrella Arietis. Debido al movimiento del Sol hacia el este a través del cielo durante todo el año, este extremo occidental de Aries fue el punto en el que el Sol entraba en la constelación, de ahí el nombre de Punto de Aries.

6.2. Sistemas de referencia terrestre

Asumiendo la Tierra esférica, las posiciones de los lugares sobre el globo terrestre se determinan mediante su latitud y longitud geográficas, donde la latitud ϕ se cuenta a partir del ecuador y la longitud se mide a partir del meridiano de Greenwich.

El geode es la superficie irregular del campo gravitatorio terrestre, perpendicular al vector de gravedad. Su forma puede describirse muy aproximadamente por un elipsoide. Se detalla en lo que sigue las definiciones modernas de algunos sistemas de referencia terrestre.

El GPS emplea el elipsoide definido por el WGS84 (World Geodetic System 1984), con centro en el centro de masas terrestre. El sistema de referencia terrestre prescrito por la Unión Astronómica Internacional es el ITRS *International Terrestrial Reference System and Frame*. El ITRS define un sistema geocéntrico de coordenadas que utiliza el sistema de medida internacional. Su origen está en el centro de masa de toda la Tierra, incluidos los océanos y la atmósfera. Cada pocos años se producen nuevas soluciones de ITRF, utilizando las últimas técnicas matemáticas y topográficas para intentar realizar el ITRS con la mayor precisión posible. Debido a los errores experimentales, cualquier ITRF difiere ligeramente de cualquier otra versión del ITRF. La diferencia entre el último WGS 84 y el último ITRF es sólo de unos pocos centímetros.

Un receptor GPS localizado en Greenwich no leerá 0 grados. Las razones son complejas²⁷⁶, pero en el meridiano primordial, un peso de plomo, que apunte al centro de masas, no lo hará al centro de la tierra, tal y como se pensó por aquellos que establecieron el meridiano de Greenwich. Los receptores GPS actuales tienen la capacidad de cálculo para resolver todas estas anomalías.

Por su parte, la transformación entre los sistemas celestial y terrestre, el ICRF y el ITRF se hace mediante el conocido como Celestial Intermediate Reference System²⁷⁷.

6.3. Tiempo universal

El tiempo estándar a nivel mundial es el UTC, Coordinated Universal Time, una versión más compleja del estándar anterior, el GMT o Greenwich Mean Time. El *International Bureau of Weights and Measures*, BIPM, localizado en los suburbios de París, se encarga de mantener el UTC haciendo medias de 200 relojes atómicos repartidos por todo el mundo. Uno de ellos es

²⁷⁶Malys et al. 2015.

²⁷⁷Capitaine, 2007.

el Reloj Maestro del Observatorio naval norteamericano, la fuente del tiempo GPS ²⁷⁸.

Sin embargo, el UTC también se adapta al tiempo solar medio, la concepción anterior al reloj atómico, que mide el tiempo por la rotación terrestre. Debido a que la rotación terrestre disminuye progresivamente, principalmente debido al efecto de las mareas, haciendo que los días sean mas largos, cada cierto numero de años se añade un segundo al tiempo UTC, para mantenerlo alineado con el tiempo solar.

El tiempo GPS, que está basado únicamente en un estándar atómico, no aplica estos segundos extras, y existe una diferencia entre ambos, estando el tiempo GPS algunos segundos por delante del UTC. Dentro de la señal de GPS está contenida la información sobre esta discrepancia, de modo que los dispositivos como los teléfonos inteligentes muestran un tiempo consistente con el UTC.

²⁷⁸La Sección de Hora del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) en San Fernando (Cádiz) es la responsable de la custodia, conservación, mantenimiento y difusión del patrón nacional de la unidad básica de tiempo y de la escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC-ROA), considerada como base de la hora oficial española. El ROA cuenta para esta tarea con cinco relojes atómicos de haz de cesio y dos máseres de hidrógeno activo.

Referencias

- Aporta, C. & Higgs, E. (2005). Satellite culture: global positioning systems, Inuit wayfinding, and the need for a new account of technology. *Current anthropology*, 46(5), 729-753.
- Ayliffe, A. (2001). The Development of Airborne Dead Reckoning. Part I: Before 1940—Finding The Wind. *The Journal of Navigation*, 54(2), 223-233.
- Barata, J., Mendes, A., Morgado, C., Neves, F. & Silva, A. (2009). Origins of Scientific Aircraft Navigation. *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 5022.
- Barrie, D. (2014). *Sextant: A Voyage Guided by the Stars and the Men who Mapped the World's Oceans*. William Collins London.
- Baugh, D. A. (1978). The Sea-trial of John Harrison's Chronometer, 1736. *The Mariner's Mirror*, 64(3), 235-240.
- Beidleman, S. W. (2005). GPS vs Galileo: balancing for position in space. *Astropolitics*, 3(2), 117-161.
- Bell, F. C. (1969). The Schuler Pendulum's fatal flaw. *The Journal of Navigation*, 22(3), 412-413.
- Bijker, W. E. (1997). *Of bicycles, bakelites, and bulbs: Toward a theory of sociotechnical change*. MIT press.
- Bijker, W. E. (2010). How is technology made?—That is the question! *Cambridge journal of economics*, 34(1), 63-76.
- Bijker, W. E. & Pinch, T. J. (1987). The social construction of fact and artifacts. *Philosophy of technology: the technological condition: an anthology*.
- Bleaney, B. (1998). Reginald Victor Jones (1911-97). *Nature*, 391(6668), 644-644.
- Blewitt, M. (2013). *Celestial Navigation for Yachtsmen*. A&C Black.
- Borgmann, A. (1987). *Technology and the character of contemporary life: A philosophical inquiry*. University of Chicago Press.
- Broughton, P. (1995). What Brought Edmond Halley to Newfoundland. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 89, 18.

- Brown, B. (2016). *Other things*. University of Chicago Press.
- Bugallo Siegel, F. J. & Pascual Albarracín, E. (2007). El sextante aeronáutico. *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, 383, 23.
- Capitaine, N. (2007). Definition and realization of the celestial intermediate reference system. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 3(S248), 367-373.
- Ceruzzi, P. E. (2018). *GPS*. MIT Press.
- Clarke, K. C. (1992). Maps and mapping technologies of the Persian Gulf War. *Cartography and Geographic Information Systems*, 19(2), 80-87.
- Cobarsí Ortín, Á. (1998). *Sistemas de navegación*. Editorial: Mc Graw Hill.
- Coira, M. L. & Moratalla, T. L. (2004). Dos siglos de cálculos del Almanaque Náutico (1792-2002): primera época. *Actas VIII Congreso de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 419-432.
- Comte, A. (2020). *Discurso sobre el espíritu positivo*. Editorial Verbum.
- Cotter, C. H. (1968). A history of nautical astronomy. *A history of nautical astronomy*.
- Cotter, C. H. (1983). A brief historical survey of British navigation manuals. *The Journal of Navigation*, 36(2), 237-249.
- Crane, C. C. (1987). Evolution of US strategic bombing of urban areas. *The Historian*, 50(1), 14-39.
- Daston, L. (2004). *Things That Talk: Object Lessons From Art and Science*. Zone Books.
- Descartes, R. (2005). *Discurso del método*. Ediciones Tecnos.
- Doble Gutiérrez, S. (2008). La estandarización del Meridiano de Greenwich. *Libro de Actas de los años XV y XVI del Seminario Orotova de Historia de la Ciencia. Ciencia y Cultura de Rousseau a Darwin. Tenerife: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia*, 1-20.
- Dobson, J. E. & Fisher, P. F. (2003). Geoslavery. *IEEE Technology and Society Magazine*, 22(1), 47-52.
- Everitt, P. (1931). Tables for use in Aero Navigation by Astronomical Methods. *The Aeronautical Journal*, 35(242), 167-172.
- Eyyam, R. & Yaratan, H. S. (2014). Impact of use of technology in mathematics lessons on student achievement and attitudes. *Social Behavior and Personality: an international journal*, 42(1), 31S-42S.
- Fields, J. W., Shallberg, K. W. & Ward, P. W. (1996). The Use of GPS for the Guidance of Ballistic Missiles. *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*, 1587-1595.
- Flammarion, C. (1888). *L'atmosphère: météorologie populaire*. Hachette.

- Franssen, M., Lokhorst, G.-J. & van de Poel, I. (2018). Philosophy of Technology. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2018). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Fried, W. R. (1993). History of Doppler radar navigation. *Navigation*, 40(2), 121-136.
- Gabbay, D. M., Thagard, P., Woods, J. & Meijers, A. W. (2009). *Philosophy of technology and engineering sciences*. Elsevier.
- Gandía, E. d. (1942). Las cartas de Toscanelli, la Antilla, la India y Cipango.
- Gillett, A. J. & Heersmink, R. (2019). How navigation systems transform epistemic virtues: Knowledge, issues and solutions. *Cognitive Systems Research*, 56, 36-49.
- González González, F. J. (2004). La astrometría meridiana en el Observatorio de San Fernando durante el siglo XX. *Historia de las ciencias y de las técnicas*, 403-418.
- González González, F. J. (2017). La definición del Meridiano Cero en la cartografía histórica. *Real Instituto y Observatorio de la Armada*.
- Hagger, A. (1952). The accuracy of bubble sextant observations. *The Journal of Navigation*, 5(4), 380-420.
- Hall, A. R. (1951). Robert Hooke and horology. 8, 167-177.
- Hayward, T. (2009). Alcock and Brown. *The Journal of Navigation*, 62(3), 411-416.
- Hilding Beij, K. (1924). *Astronomical Methods in Aerial Navigation*. US Government Printing Office.
- Hilpinen, R. (1992). On artifacts and works of art 1. *Theoria*, 58(1), 58-82.
- Howse, D. (1989). *Nevil Maskelyne, the seaman's astronomer*. Cambridge University Press.
- Hutchinson, A. (2009). Global positioning systems: Is GPS technology actually harming our sense of direction. *The Walrus*.
- Hyman, A. (1985). *Charles Babbage: Pioneer of the computer*. Princeton University Press.
- Ifland, P. (1998). Taking the Stars: Celestial Navigation from Argonauts to Astronauts, Mariners' Museum.
- Johnson, P. (1989). The Board of Longitude 1714-1828. *Journal of the British Astronomical Association*, 99, 63-69.
- Kaplan, C. (2006). Precision targets: GPS and the militarization of US consumer identity. *American Quarterly*, 58(3), 693-713.
- Kelvin, W. T. B. (1886). *Tables for Facilitating Sumner's Method at Sea*. Taylor & Francis.
- King-hele, D. (1959). Missile engineering handbook. CW Besserer. In the series Principles of Guided Missile Design. D. van Nostrand, Princeton,

- New Jersey, 1958. 600 pp. 109s. *The Aeronautical Journal*, 63(578), 123-123.
- Kremer, G. T., Kalafus, R. M., Loomis, P. V. & Reynolds, J. C. (1990). The effect of selective availability on differential GPS corrections. *Navigation*, 37(1), 39-52.
- Krueger, J. (2020). Schizophrenia and the scaffolded self. *Topoi*, 39(3), 597-609.
- Kuhn, T. (1962). *Teoría de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Kuznekoff, J. H. & Titsworth, S. (2013). The impact of mobile phone usage on student learning. *Communication Education*, 62(3), 233-252.
- Kwan, M.-P., Casas, I. & Schmitz, B. (2004). Protection of geoprivacy and accuracy of spatial information: How effective are geographical masks? *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 39(2), 15-28.
- Lafuente García, A. & Sellés García, M. A. (1988). *El observatorio de Cádiz (1753-1831)*. Ministerio de Defensa.
- LaMarca, A. & De Lara, E. (2008). Location systems: An introduction to the technology behind location awareness. *Synthesis Lectures on Mobile and Pervasive Computing*, 3(1), 1-122.
- Landes, D. (2007). *Revolución en el tiempo: El reloj y la formación del tiempo moderno*. Editorial Crítica.
- Laurie, P. (1960). The buildings and old instruments of the Royal Observatory, Greenwich. *The Observatory*, 80, 13-22.
- Lombardi, M. A. (2011). The evolution of time measurement, Part 2: quartz clocks. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 14(5), 41-48.
- López Piñero, J. M. (1986). *El arte de navegar en la España del Renacimiento*. Editorial Labor.
- Lyon, T. C. (1945). *Practical air navigation*. US Government Printing Office.
- MacKenzie, D. (1993). *Inventing accuracy: A historical sociology of nuclear missile guidance*. MIT press.
- Madrid Casado, C. M. (2018). *Filosofía de la Cosmología. Hombres, teoremas y leyes naturales*.
- Malys, S., Seago, J. H., Pavlis, N. K., Seidelmann, P. K. & Kaplan, G. H. (2015). Why the Greenwich meridian moved. *Journal of Geodesy*, 89(12), 1263-1272.
- Manso Porto, C. (2011). La influencia de Ptolomeo en la cartografía de los Descubrimientos. *Juan de la Cosa: La cartografía histórica de los descubrimientos españoles*.
- Matthew, H. C. G., Harrison, B. & Long, R. J. (2004). *The Oxford dictionary of national biography*. R. James Long (2004).

- McGee, J. K. (2000). *Global Positioning System Selective Availability: Legal, Economic, and Moral Considerations* (inf. téc.). Army Command y General Staff College.
- Menary, R. (2018). Keeping track with things. *Extended epistemology*, 305-330.
- Miller, G. (2012). The smartphone psychology manifesto. *Perspectives on psychological science*, 7(3), 221-237.
- Miller, J. (2021). Hugo Grotius. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2021). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Millikan, R. G. (1999). Wings, spoons, pills, and quills: A pluralist theory of function. *The Journal of philosophy*, 96(4), 191-206.
- Milner, G. (2016). *Pinpoint: how GPS is changing technology, culture, and our minds*. WW Norton & Company.
- Morgan, C. A. (1985). The Downing of Korean Air Lines Flight 007. *Yale J. Int'l L.*, 11, 231.
- Morison, S. E. (1942). *Admiral of the ocean sea: a life of Christopher Columbus/Vol. 1*. Little, Brown; Co.
- Mouzelis, N. (1992). Social and system integration: Habermas' view. *British Journal of Sociology*, 267-288.
- Murphy, W. & Wolfe, L. (1926). The stationary and rotating equisignal beacon. *SAE Transactions*, 979-1015.
- Nelson, T., Goodchild, M. & Wright, D. (2022). Accelerating ethics, empathy, and equity in geographic information science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(19), e2119967119.
- Newcomb, S. (1895). *The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy*. US Government Printing Office.
- Nordmann, A. (2016). Changing perspectives: The technological turn in the philosophies of science and technology. *Philosophy of technology after the empirical turn* (pp. 107-125). Springer.
- Nunes, P. (2002). *Obras, Vol. I: Tratado da Sphera; astronomici Introductorii de Spaera Epitome*.
- Oestmann, G. (2011). Delayed progress in navigation: the introduction of line of position navigation in Germany and Austria. *GEM-International Journal on Geomathematics*, 1(2), 133-143.
- Ortega y Gasset, J. (1964). *La rebelión de las masas*. Revista de Occidente.
- Ortega y Gasset, J. (1973). *Que es filosofía?*. Espasa Calpe.
- Popper, K. R. (1999). *El mundo de Parménides: Ensayos sobre la ilustración presocrática*. Grupo Planeta.
- Preston, B. (2009). Philosophical theories of artifact function. *Philosophy of technology and engineering sciences* (pp. 213-233). Elsevier.

- Preston, B. (2013). *A philosophy of material culture: Action, function, and mind*. Routledge.
- Preston, B. (2020). Artifact. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2020). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Prigogine, I. & Stengers, I. (2018). *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature*. Verso Books.
- Quill, J. (1986). US Coast Guard differential GPS system development. *Radio Technical Commission for Maritime Services Annual Meeting Radio Technical Commission for Maritime Services, Washington, DC*.
- Quintanilla Fisac, M. Á. (2018). Engaging technologies: Criteria for an alternative model of technological development. *Spanish Philosophy of Technology* (pp. 103-123). Springer.
- Rankin, W. (2014). The geography of radionavigation and the politics of intangible artifacts. *Technology and Culture*, 622-674.
- Ratcliff, J. (2015). *The transit of Venus enterprise in Victorian Britain*. Routledge.
- Rhodes, R. (2012). *The making of the atomic bomb*. Simon; Schuster.
- Rip, M., Hasik, J. & Press, N. I. (2002). *The Precision Revolution: GPS and the Future of Aerial Warfare*. Naval Institute Press.
- Rizer, K. R. (2001). Bombing dual-use targets: legal, ethical, and doctrinal perspectives. *Air and Space Power Chronicles*, 5 (January).
- Robbins, J. (2010). GPS navigation. . . but what is it doing to us? *2010 IEEE International Symposium on Technology and Society*, 309-318.
- Sadler, D. (1972). Gaussian logarithms and navigation. *The Journal of Navigation*, 25(2), 252-258.
- Sáez Nieto, F. J. (2012). *Navegación aérea: posicionamiento, guiado y gestión del tráfico aéreo*. Garceta Grupo Editorial.
- Saint-Hilaire, M. d. B. (1873). Note sur la détermination du point. *Revue Maritime et Coloniale*, 29, 41.
- Saint-Hilaire, M. d. B. (1875). Calcul du point observe. *Revue Marit. Coloniale*, 46, 341-376.
- Sanchez Navarro, J. (2001). El juego de la imaginación: Galileo y la Longitud. *Largo campo di filosofare*, 61-83.
- Schetzen, M. (2006). *Airborne Doppler Radar: Applications, Theory, and Philosophy*. American Institute of Aeronautics; Astronautics.
- Seidelmann, P. K. & Hohenkerk, C. Y. (2020). *The History of Celestial Navigation*. Springer.
- Sellés García, M. A. (2000). *Navegación astronómica en la España del siglo XVIII*. UNED.

- Sellés García, M. A. & Lafuente García, A. (1985). La formación de los pilotos en la España del siglo XVIII. La ciencia moderna y el conocimiento del nuevo mundo. En J. Peset, J. Saldaña, J. Sala Catalá, R. Alvarez Peláez, A. Lafuente García & M. A. Sellés García (Eds.), *La Ciencia Moderna y el Nuevo Mundo. Actas de la I Reunión de Historia de la Ciencia y de la Técnica de los Países Ibéricos e Iberoamericanos. Madrid, 25 a 28 de Septiembre de 1984*. Madrid: C.S.I.C.
- Silva, A. R., Barata, J. M., Neves, F. M. et al. (2016). Gago Coutinho and the Scientific Navigation. *Open Journal of Applied Sciences*, 6(10), 751.
- Silverberg, J. (2005). The Sailings: The Mathematics of Eighteenth Century Navigation in the American Colonies. *Proceedings of the Canadian Society for the History and Philosophy of Mathematics*, 18, 20005.
- Silverberg, J. (2006). Nautical Astronomy: From the Sailings to Lunar Distances. *Proceedings of the Canadian Society for History and Philosophy of Mathematics*, 19, 265-288.
- Silverberg, J. (2007). Circles of Illumination, Parallels of Equal Altitude and le Calcul du Point Observe: Nineteenth Century Advances in Celestial Navigation. *Proceedings of the Canadian Society for History and Philosophy of Mathematics*, 20, 272-296.
- Simonyi, K. (2012). *A cultural history of physics*. CRC Press.
- Siouris, G. M. (2004). *Missile guidance and control systems*. Springer Science & Business Media.
- Smart, W. (1946). John Couch Adams and the discovery of Neptune. *Nature*, 158(4019), 648-652.
- Smith, R. W. (1989). The Cambridge network in action: The discovery of Neptune. *Isis*, 80(3), 395-422.
- Sobel, D. (2005). *Longitude: The true story of a lone genius who solved the greatest scientific problem of his time*. Macmillan.
- Sørensen, K. H. (1994). Technology in use: Two essays in the domestication of artefacts. *Centre for technology and society working paper*, 2, 94.
- Sparrow, B., Liu, J. & Wegner, D. M. (2011). Google effects on memory: Cognitive consequences of having information at our fingertips. *science*, 333(6043), 776-778.
- Spinardi, G. & Spinar, L. H. (1994). *From Polaris to Trident: the development of US Fleet ballistic missile technology*. Cambridge University Press.
- Stimson, A. & Daniel, C. (1977). *The Historical Development and Modern Use of the Cross-staff*. Harriet Wynter, London.
- Subirana, J. S., Zornoza, J. J. & Hernandez-Pajares, M. (2013). *GNSS data processing. Volume 1: Fundamentals and algorithms*. ESA.

- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological review*, 55(4), 189.
- Van Brummelen, G. (2012). *Heavenly mathematics: The forgotten art of spherical trigonometry*. Princeton University Press.
- Vanvaerenbergh, M. & Ifland, P. (2003). *Line of position navigation: Sumner and Saint-Hilaire, the two pillars of modern celestial navigation*. Unlimited Publishing LLC.
- Vega Encabo, J. & Muñoz Serrano, M. (2018). Atomism, artefacts, and affordances. *Spanish Philosophy of Technology* (pp. 3-15). Springer.
- Vincenti, W. G. et al. (1990). *What engineers know and how they know it* (Vol. 141). Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Vincenti, W. G. & Newman, W. M. (2007). On an engineering use of engineering history. *Technology and Culture*, 48(1), 245-247.
- Warden, J. A. et al. (1998). *The air campaign: planning for combat*. iUniverse.
- Warner, D. (2005). Celestial navigation aloft: aeronautical sextants in the US. *Materializing the Military*, 5, 95.
- Washburn, W. (1982). The Canary Island and the question of the prime meridian: The search for precision in the measurement of the earth. *V Coloquio de Historia Canario-Americana*, 874-888.
- Weems, P. V. H., Hughes, A. J. & Everitt, P. (1937). *Air navigation*. McGraw-Hill.
- Weiss, P. (2021). The Global Positioning System (GPS): Creating Satellite Beacons in Space, Engineers Transformed Daily Life on Earth. *Engineering*, 7(3), 290-303.
- what you need to know about E112 [Disponible en <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/locating-you-emergency-what-you-need-know-about-e112>, consultado el 30-05-2022]. (2015).
- Williams, J. (1988). Air Navigation Systems: Chapter I. Astronomical Navigation in the Air 1919-1969. *The Journal of Navigation*, 41(3), 375-406.
- Winner, L. (1978). *Autonomous technology: Technics-out-of-control as a theme in political thought*. Mit Press.
- Winner, L. (1980). 1999. Do artifacts have politics. *The social shaping of technology*, 28-40.
- Winner, L. (1987). *La ballena y el reactor: una búsqueda de los límites en la era de la alta tecnología*. Gedisa Editorial.
- Withington, V. (1948). A new periscopic sextant. *Journal of the Institute of Navigation*, 1(11), 210-215.
- Woodford, J. & Nakamura, H. (1966). Briefing-Navigation Satellite Study.
- Woods, W. (2011). *How Apollo Flew to the Moon*. Springer New York.

- Zumberge, J. & Gendt, G. (2001). The demise of selective availability and implications for the international GPS service. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8), 637-644.