# EL SEXTANTE

*" ¡Por amor de Dios, Jorge! ... es la primera bocacalle a la derecha después de pasar la Oficina de Correos. ¡Sólo vamos a casa del vicario a tomar el té!*

(Por cortesía de Associated Newspapers Ltd.).

**Llorenç Coll Garcia**

# I. Introducción.

El sextante ha llegado a ser el símbolo náutico universal más ampliamente reconocido.

Es, en esencia, un instrumento de observación astronómica basado en las leyes ópticas de la reflexión.

Su nombre, proviene del hecho que su limbo graduado abarca la sexta parte de la circunferencia.

Es un perfeccionamiento del octante que es otro instrumento de observación astronómica basado en los mismos principios de reflexión, ideado por Hadley y Godfrey.

Los usos del sextante no se restringen a la navegación, y de hecho es utilizado también en topografía e incluso en astronomía.

Notemos que distintos autores definen de forma muy diferente el mismo instrumento. Ello depende de varios factores: el grado de precisión que se quiera obtener, el uso que se le va a dar, etc. Los astrónomos, acostumbrados a medir hasta fracciones de segundo, lo encuentran "poco preciso"; los marinos explican para qué lo utilizan y los topógrafos, lo definen y nos dan su característica esencial. Veámoslo:

Definiciones:

F. Martín Asín, en su libro "Astronomía" lo define así: El sextante es un goniómetro poco preciso y fácil de transportar, usado fundamentalmente en barcos para medir distancias angulares y alturas de los astros, para hacer determinaciones expeditas de las coordenadas.

José M. Moreu Curbera en "Astronomía y Navegación" dice: Es un instrumento portátil usado a bordo para medir la altura de los astros, que también se usa para medir ángulos horizontales entre puntos de la costa y ángulos verticales.

F. Valdés en "Aparatos topográficos" explica que: Es un goniómetro de reflexión. Hasta hoy es el instrumento de mano más preciso usado para a medir ángulos.

En la época de la electrónica, el sextante todavía es atractivo, combinado con el cronómetro y el Almanaque, para situarse porqué es independiente de cualquier sistema externo de radio transmisión.

La facilidad de situarse por medio de "la electrónica" (apretando el botón "on" del GPS que quiere decir "onde se enciende") no ha de ser excusa para no querer entender cómo funciona el sextante. ¿Y si un día falla la electrónica?

En navegación costera, la situación que obtienes con el sextante, es independiente hasta de la aguja.

Finalmente, en navegación astronómica, el manejo del sextante, y la parafernalia que le sigue para hallar una línea de posición, no deja de ser divertido.

# II Historia y evolución del sextante

En la cultura occidental, hasta el siglo XIV, la navegación se limitó a la navegación costera.

Las culturas marítimas primitivas, como la China, o la Fenicia, ciertamente hicieron navegación de altura (a mar abierto) pero no tenemos pruebas que usasen instrumentos de navegación.

Los primeros intentos de medida aproximados se debían hacer con las manos y los dedos con el brazo estirado (Apéndice III)

Se sabe que los Polinesios usaban **el gancho o anillo de latitud** (fig.1) para evaluar esta coordenada en sus navegaciones

El utensilio consta esencialmente de un alambre, uno de cuyos extremos se dobla en forma de gancho o anillo por el cual visaban la polar, el otro extremo se doblaba en ángulo recto y se hacía coincidir con el horizonte

El útil se mantiene vertical con el brazo estirado

Los inconvenientes principales son:

1. Es personal e intransferible (calibrado a la longitud del brazo del usuario)
2. Sólo es útil para una latitud determinada (si en la navegación se varía de latitud, se necesita más de un anillo)
3. Hay que mirar a más de un sitio a la vez (a la polar y al horizonte)

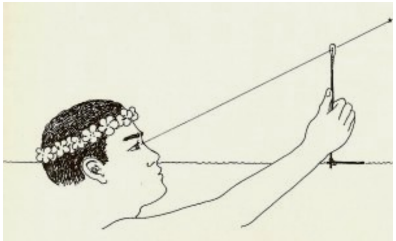


fig. 1

Los Micronesios evaluaban la latitud de su isla haciendo dos agujeros en el cuello de una calabaza vacía, por los que visaban la estrella polar y que previamente habían llenado con agua. Iban hacia el sur, y al regreso cada noche miraban la estrella del norte con la calabaza, el día que salía agua por el agujero sabían que habían de meter rumbo E o W para arrumbar a su isla.


fig. 2

Los Vikingos (entre los siglos VIII y XI) se cree que hacían servir para orientarse **piedras solares** (fig.2) que eran cristales de espato de Islandia, una variedad transparente de calcita romboédrica que es birrefringente, con la que se puede posicionar el Sol con un error de 1º incluso con cielos nublados.

Por otra parte, Chinos, Egipcios, Babilonios i Griegos descubrieron que podían relacionar su posición en la Tierra con la de las estrellas, midiendo la altura de las estrellas respecto al horizonte

En otras culturas (por ejemplo en la cultura islámica) se conocían técnicas de navegación de altura, que fueron usadas desde que el califa Al Mamun (813 a 839) creó la Casa de la Sabiduría de Bagdad, en la primera mitad del siglo IX donde se llevó a cabo la primera “medida de grado de meridiano” que se conoce, con ayuda de astrolabios.

Los marineros usaban un artefacto llamado **Kamal**, (fig.3) (que significa guía en árabe) que esencialmente es una tablilla rectangular de unos 5 x 10 cm (de madera o metal) por cuyo centro perforado pasa una cuerda. En la cuerda se hacían una serie de nudos, a la latitud de los puertos que eran más frecuentados.


fig. 3

Probablemente fue ideado en la India y adoptado por los árabes. Se hizo servir tanto para atravesar el Índico como los desiertos. Por la parte inferior de la tablilla se miraba el horizonte y por la superior la estrella polar con la cuerda tesa y uno de los nudos tocando el ojo o entre los dientes. (fig.4)

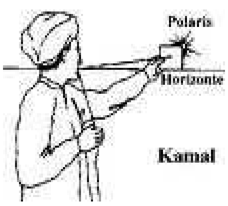


fig. 4

Cuando se llegaba a la latitud del puerto a donde se quería ir, solamente hacía falta poner rumbo E o W.

Esta técnica, usada luego durante varios siglos en la cultura occidental, hasta que se pudo evaluar la longitud, era la de seguir un paralelo hacia el este o el oeste hasta encontrar tierra. Aquello del refrán “paralelo correr, tierra encontrar”

El Kamal es de fácil uso, sobre todo en condiciones de mar adversas cuando no se pueden usar otros instrumentos. Fue introducido en Occidente por Vasco da Gama a mediados del siglo XVI.

La época de los grandes viajes por mar, característicos del Renacimiento, se inició con la expedición del mallorquín Jaume Ferrer (1346), lamentablemente sin retorno, (?) a la costa oeste del África ecuatorial para hallar el Río del Oro. Antes, el catalán Francesc Desvalers (1342) había hecho la primera expedición a las Canarias.

Según Millàs Vallicrosa (historiador de la Ciencia), estos viajes ya eran “viajes de altura” en el sentido que se usaba la altura observada de los astros para determinar (parcialmente) la situación del barco.

Ello fue posible porque ya se disponía de instrumentos suficientemente precisos (astrolabios y cuadrantes) con los que tomar alturas del Sol (o de algún otro astro) y de almanaques de efemérides mediante los que se podía conocer la declinación del Sol cada día, y, que sumada o restada a la altura meridiana, daba la colatitud.

La posibilidad de navegar con la ayuda de los astros, (el Sol, la Polar, la Luna...) hizo que los instrumentos de observación astronómica fácilmente transportables, se generalizasen entre los marinos mejor preparados.

**Los primeros instrumentos náuticos de medida**

Los primeros instrumentos náuticos de medida fueron la “versión náutica” de los aparatos que ya se usaban en tierra.

Podemos distinguir dos grandes familias de instrumentos. La primera es la del anillo de latitud y sus sucesivas modificaciones.

A principios del S. XIV se popularizó **la ballestilla** también llamada báculo o cruz de Jacob por ser usada por el astrónomo judío de ascendencia granadina Jacob ben Mahir cuyo nombre latinizado fue Profatius Judaeus (1236 Marsella - 1306 Montpelier).

Parece ser de origen persa. Se sabe que el matemático, médico y filósofo uzbeco Avicena (980 - 1037) ya escribió sobre ella en el siglo XI, pero la popularizó en Europa el judío catalán Levi ben Gerson (1288 -1344) que fue discípulo de ben Mahir y trabajó en la escuela de cartografía de Mallorca.

Consta de una vara recta, cuadrada de unos 75-80 cm de largo, llamada virote, verga o regla, con escalas grabadas en sus cuatro caras, sobre la que pueden deslizarse sin holgura unas varas más pequeñas cruzadas, llamadas transversarios, martinete, sonaja o martillo. (fig.5)

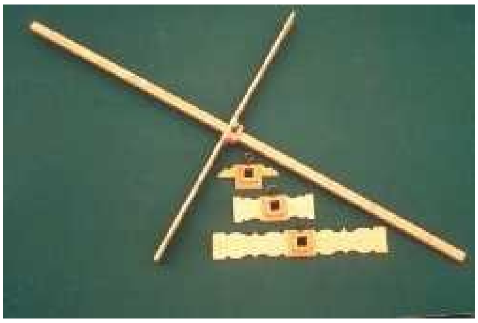


fig.5

Por el extremo inferior del transversario se observa el horizonte y por el superior, el astro. (fig.6)

Para observar el Sol se invertía la posición del aparato y se hacía coincidir la sombra del transversario con el extremo del virote

En general se hacian de madera dura para evitar deformaciones pero al ser un material fungible se conservan muy pocas. En Holanda se conserva una ballestilla hecha de marfil.

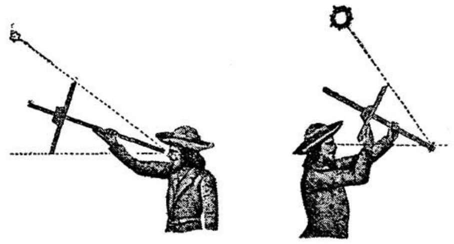


fig. 6

La mayoría de las que se conservan están hechas en Inglaterra, pero las hay que están fabricadas en América y en Irlanda.

Introducida en Inglaterra por John Dee (1550) se hizo rápidamente popular entre los navegantes Ingleses que le dieron el nombre de “cross staff” así como también entre los Holandeses.

Representó un salto adelante importante en el arte y la ciencia de navegar. Con ella podemos tomar alturas de astros y distancias angulares entre puntos en tierra.

El principal problema de “la ballestilla” es que el observador ha de mirar en dos direcciones a la vez, al astro por la parte superior y al horizonte por la inferior lo que puede ocasionar errores de paralaje ocular de 1,5º (90 millas) o incluso más.

Una modificación fue **la semiballestilla** en que el transversario no es simétrico respecto del virote y que pone de relieve que es un derivado del anillo de latitud. (fig. 7)

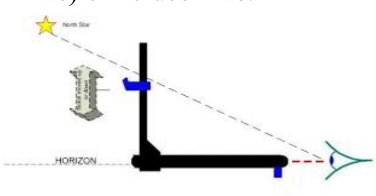
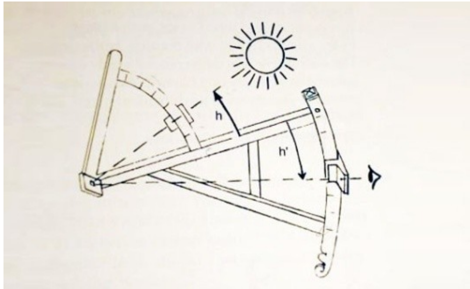


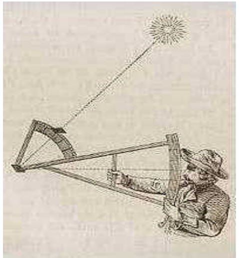

fig. 7

La exigencia de alcanzar mayor precisión en las observaciones para tener una situación más fiable, dio origen al **cuadrante de Davis** (el “back staff” de los ingleses).

John Davis, (1552 – 1605) en su obra "*The Seamen's Secrets… for sailors, not for scholars on shore*" (1594) describe dos versiones del instrumento e insiste en la necesidad de obtener la mayor precisión posible en las medidas.

Consta de dos triángulos con uno de sus lados curvilíneos, el mayor está calibrado a 30º y el pequeño a 60º, podía medir ángulos de hasta 90º y de ahí el nombre de cuadrante aplicado al artefacto.





Ideado para hacer observaciones al Sol, se ha de hacer coincidir la sombra de la pínula del triangulo chico con la del horizonte, observada desde la pínula del triángulo grande. (fig. 8)

La altura del Sol es la suma de los valores h i h'. (fig. 9)

fig. 9

fig. 8

La mayor ventaja del cuadrante de Davis consiste en que el observador sólo ha de mirar en una dirección y la mayor desventaja es que no se pueden tomar alturas de la Luna, los planetas o las estrellas. (porque no hacen sombra) ni ángulos horizontales.

La segunda gran familia de instrumentos náuticos se desarrolló paralela e independientemente de la primera

Es la familia del **astrolabio** (que significa literalmente buscador de astros) y **el cuadrante**.

Se cree que éste instrumento era conocido por los Egipcios en el S III a. C. Algunos atribuyen su invención a Hiparco de Nicea (S. II a. C.) pero la primera descripción conocida es de Ptolomeo en el Almagesto (S. II d. C.). Fue mejorado por los árabes e introducido en Europa por Sunifred Llobet (Lupitus Barcinonensis) arcediano y canónigo de Barcelona entre el 973 y el 997 a finales del S. X, en que tradujo del árabe diversos tratados sobre la construcción y uso del astrolabio, conservados en Ripoll, y él mismo construyó uno, el primero conocido con caracteres carolingios, que se conserva en París en la colección de Marcel Destombes. (fig. 10)

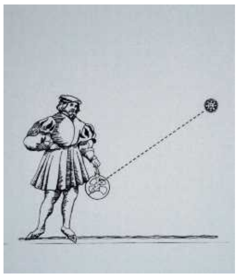
fig. 10

El astrolabio náutico, (fig.11) es una versión simplificada y más pesada del astrolabio astronómico, que constaba de un círculo graduado con cuatro radios a 90º. El diámetro vertical representa la línea cenit - nadir y el horizontal la línea del horizonte. El radio correspondiente al nadir tenía más material y servía de lastre, encima del cenit había una anilla (o colgadero) para poder sostenerlo cómodamente con el dedo.

Las estrellas se visan directamente a través de las pínulas de la alidada y su altura se lee en el círculo exterior graduado, la altura del Sol se halla tal como se indica en la fig. 12

fig. 11

Se pueden medir ángulos con una precisión de hasta ¼º o sea 15'.



Ya en 1295 Ramón Llull nos describe el astrolabio como instrumento náutico habitual entre los marineros mallorquines. Su uso en la mar se generalizó a principios del siglo XVI. Fue descrito per primera vez en las obras de Alonso de Chaves y Martín Cortés, a mediados del siglo XVI.

fig. 12

Muy pronto, los pilotos se dieron cuenta que durante las medidas el aparato no se mantenía vertical debido al balanceo y cabeceo de la nave y que por lo tanto las medidas no eran fiables.

Fue sustituido por el **anillo astronómico** de más fácil construcción, más barato y de lectura más sencilla. (fig. 13)

fig. 13

Un segundo instrumento que se adaptaba mejor a las condiciones "inestables" de un barco en la mar y por eso se usó mucho más que el astrolabio, fue **el cuadrante**, que sabemos que se usaba ya en 1450 y se solían poner marcas para indicar las latitudes de los puertos más importantes. (fig.14) Algunos cuadrantes, llamados trigonométricos, permitían estimar con cierta precisión las funciones trigonométricas del ángulo medido!!

Fig. 14

Así, por ejemplo, en los diarios de Colón hay frecuentes alusiones al cuadrante, pero nunca se menciona el astrolabio.

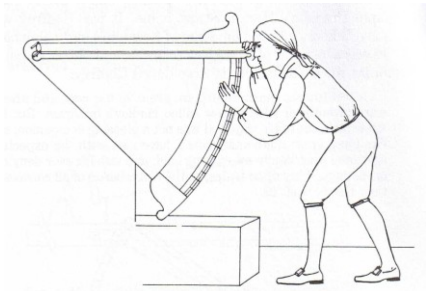
Para tomar medidas con el cuadrante se ha dicho que hacían falta dos personas, una orientaba el aparato y la otra hacía la lectura, pero una sola persona puede hacer la medida si al visar el astro sujeta el hilo de la plomada con la mano izquierda.

**La revolución óptica**

Los instrumentos que incorporan ayudas ópticas a la visión, aparecieron durante la segunda mitad del siglo XVII, consecuencia de largos estudios de los primeros expertos en óptica aplicada.

John Flamsteed (1646 - 1719) fundador y primer director del observatorio de Greenwich incorporó una lente a la pínula del triángulo chico del cuadrante de Davis para mejorar la precisión.

Robert Hooke (1636 - 1703) presentó un informe a la "Royal Society" en 1666 en el que se describía "un instrumento nuevo para medir ángulos por reflexión... lo cual es de gran utilidad para hacer observaciones exactas en la mar". Lo probó Sir Edmund Halley durante un viaje que hizo a Brasil pero por razones desconocidas el instrumento no prosperó.


fig, 15

Isaac Newton (1664 – 1727) propuso un instrumento con dos espejos para medir la distancia angular entre una estrella y la Luna (el "método de distancias lunares" para calcular la longitud). Este "octante" de Newton, (fig.15) no se dio a conocer hasta el 20 de Mayo de 1731 en que Edmund Halley (1665 – 1742) reveló su existencia a la "Royal Society".

La semana anterior, John Hadley (1682 - 1744) había presentado dos nuevos instrumentos de doble reflexión de su invención para poder medir distancias lunares, pero que en realidad se usaron de forma casi exclusiva para tomar alturas de astros! (figs. 16 y 17)

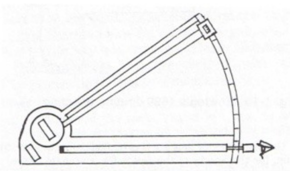


fig. 16

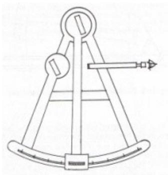


fig. 17

Independientemente, Thomas Godfrey en Pensilvania había proyectado y perfeccionado un instrumento para medir alturas de astros basado en los mismos principios. (fig.18)

La "Royal Society" reconoció por igual la contribución de ambos y concedió un premio de £ 200 a cada uno.

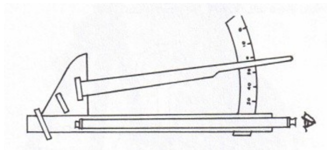


fig. 18

Según las leyes ópticas de la doble reflexión, con estos instrumentos se pueden medir ángulos de 90º (por lo que se llamó cuadrante de Hadley al primero) y como su limbo es de 45º se llamó octante al segundo de ellos, porqué abarcaba la octava parte de la circunferencia, 45º.

Las ventajas del octante respecto a los instrumentos anteriores, más preciso y simple, fueron apreciadas de inmediato por el British Admiralty que lo hizo producir comercialmente, a pesar de ello su uso no se generalizó hasta 1750.

Los primeros octantes estaban hechos con trozos de latón, sólidos. Eran pesados y ofrecían mucha resistencia al viento. En seguida se fabricaron instrumentos más ligeros, de madera, con el bastidor de nogal y escala de arce o de boj, que rápidamente fueron sustituidos per la caoba o el ébano para el bastidor, el marfil para la escala (material de larga duración, fácil de grabar, de color claro y en consecuencia fácil de leer) y radios de latón (1760) eran de grandes dimensiones (unos 45 – 50 cm) porqué la escala se había de calibrar a mano (Sissons i John Bird fueron los mejores calibradores manuales de octantes) (fig,19)


Fig. 19

Los sextantes y los octantes son contemporáneos. El primer sextante conocido es del 1757 (construido per John Bird a instancias de John Campbell) (fig. 20)

Los sextantes "nacieron" con óptica incorporada, a los octantes se les añadió hacia el 1830.

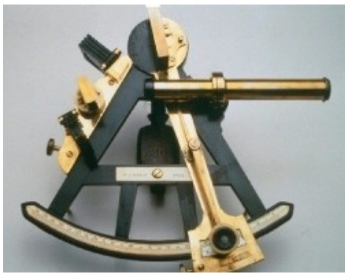


fig. 20

La principal diferencia entre el sextante y el octante es que el sextante lleva un nonio con una lupa en la alidada, que permitió mejorar la precisión hasta 1' y hacer instrumentos más pequeños. También se incorporaron vidrios de colores como filtros. fig.21

Muy pronto se empezaron a construir octantes de latón y hacia el 1780 se introdujo el tornillo de ajuste. El reto entonces, era fabricar armaduras ligeras, con poca resistencia al viento y con la mínima variación de dimensiones frente a los cambios de temperatura.

Cuando Nevil Maskelyne (1764) publicó el método de distancias lunares, surgió la necesidad de un instrumento que pudiese medir ángulos de más de 120º y aparecieron los primeros sextantes (1757) fabricados bajo el mismo principio que el octante de Hadley y así llamados porque su limbo abarca 1/6 de círculo (60º).

En 1768 Jesse Ramsden inventó y perfeccionó una herramienta para poder hacer divisiones en el limbo, que se conserva en el Smithsonian Institution (Washington) Y por la que ganó un premio del "British Board of Longitude de £ 615 se ganó así en precisión y los sextantes se fueron más económicos y más pequeños.

fig. 21

**El círculo de reflexión**

En la segunda mitad del siglo XVIII se desarrolló el círculo de reflexión (o círculo de repetición) (fig. 22), un nuevo instrumento de reflexión, que para mí es la evolución natural del astrolabio náutico, y con él que culminó la evolución de este tipo de aparatos desde la aparición del octante.

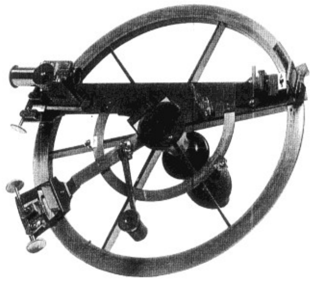


fig. 22

Diseñado por Tobías Mayer, en esencia, se trata de alargar el arco graduado a toda la circunferencia.

El circulo de reflexión fue el mejor aparato para observar distancias lunares, incluso mejor que el sextante, pero su volumen y su peso superiores, lo hicieron más incómodo.

Durante el último tercio del siglo XVIII sufrió diversas modificaciones en su diseño de mano de Charles Borda y Edward Troughton, que lo hicieron más apreciado para hacer medidas y observaciones en tierra firme.

**Evolución de sextantes y octantes**

La demanda de sextantes creció de forma espectacular en el período 1768 –1774 y durante las guerras napoleónicas a finales del siglo XVIII y principios del XIX.

Una de las mayores preocupaciones de los fabricantes de instrumentos náuticos a lo largo de la historia ha sido la precisión. Debido a las severas condiciones que se dan en la mar, un instrumento de poca calidad puede dilatarse, contraerse o romperse dando una falsa lectura, que potencialmente puede ser fatal. Se probaron muy diversos materiales y diseños para asegurar la rigidez y estabilidad de los bastidores y la solución final fue hacerlos de bronce de campana.

Hacia 1850 la muerte del octante era inminente dada la superioridad del sextante, tanto en precisión como en compacidad y duración. A pesar de ello se continuó usando el octante hasta principios del siglo XX.

El horizonte artificial era imprescindible para los exploradores y cartógrafos que normalmente no veían el horizonte natural. Desde 1732 los constructores de instrumentos empezaron a fabricar los horizontes artificiales. (fig. 23)

Los aviadores tienen el horizonte natural muy abajo y no les es de utilidad, a más a más, a menudo vuelan por encima de las nubes. Así que para situarse necesitan un horizonte artificial.

Los submarinos, por su parte, son demasiado bajos para tener un buen horizonte y también necesitan un horizonte artificial.

Las innovaciones en el sextante durante el siglo XX vienen de estas necesidades.

Durante la 1ª Guerra Mundial hubo un desarrollo muy rápido de la aviación y un repunte en la manufactura de sextantes, tanto para la aviación (con horizonte artificial) como para la marina de guerra.

fig. 23

Al final de la 1ª Guerra Mundial se incorporó al sextante un tornillo micrométrico con un tambor graduado para tener la lectura de los minutos y posteriormente se añadió un nonio pequeño para apreciar fracciones de minuto.

El standard de excelencia para los sextantes posteriores a la 2ª Guerra Mundial lo establecieron: la firma C. Plath y Cassens & Plath (fig. 24) en Alemania, Fairchild, Link, Pioneer y AgfaAnsco en USA y Tamaya en Japón.

fig. 24

Entre los accesorios "modernos" tenemos un espejo pequeño "todo horizonte"; una lente astigmática que distorsiona la imagen de las estrellas y la convierte en una línea recta para alinearla mejor con el horizonte; y el horizonte artificial de burbuja.

A pesar de estos refinamientos, el sistema óptico es el mismo que propuso John Hadley en 1731.

Se han construido "sextantes" con limbos de hasta 75 o 80º (llamados "quintantes" porque abarcan 1/5 de círculo), que se han usado en trabajos hidrográficos, cartográficos, topográficos o en aviación.

La muerte de la navegación astronómica tradicional y en consecuencia del sextante, se debe a su sustitución, a finales del siglo pasado, por la navegación por satélite y a la generalización del uso de la electrónica (G.P.S, A.I.S. etc.) pero los románticos, podemos continuar disfrutando de esta forma apasionante de navegación por puro hobby y placer.

**III. Descripción.**

Goniómetro portátil usado para determinaciones expeditas de las coordenadas.
(se usa para medir la altura de los astros, ángulos horizontales o alturas sextantales)
Es el instrumento de mano más preciso de medida de ángulos ideado hasta la actualidad

**Partes**: Consta de;
*armadura o bastidor*: normalmente metálico, en forma de sector, contiene un limbo graduado de derecha a izquierda, la graduación del limbo es doble de la del arco que comprende.
*alidada*: de igual material que el bastidor, con forma de radio de sector, gira sobre del centro del sector y se desplaza sobre el limbo
Lleva grabado un índice (o línea de fe) que puede llevar acoplado un nonio para apreciar las fracciones
*espejo pequeño* (o de horizonte) Va montado fijo sobre la armadura a la izquierda del sector.
Es perpendicular al plano del sextante, su superficie ha de ser paralela a la de la alidada cuando ésta marque 0º
Está dividido en 2 partes, la mitad próxima al bastidor está azogada y la otra mitad es transparente
El soporte de este espejo lleva dos tornillos para ajustar su posición en caso necesario.
*espejo grande* (o espejo de índice) Va montado solidario sobre la alidada.
Su superficie de reflexión ha de coincidir con el eje de giro de la alidada.
Es perpendicular al plano del sector y longitudinalmente coincidente con el eje de giro de la alidada.
El soporte de este espejo lleva también unos tornillos de ajuste en su parte posterior
*anteojo*: A la derecha del bastidor y a la altura del espejo chico va montado un anteojo. El centro del anteojo está alineado con la divisoria espejo - cristal del espejo horizonte.
Algunos sextantes tienen 2 o más anteojos intercambiables
*filtros*: Delante de cada espejo hay un juego de filtros para reducir la luminosidad de los astros cuando sea necesario para su observación
*mango*: Está en la parte posterior del plano, sirve para asirlo cómodamente durante las observaciones.
Algunos sextantes llevan dentro del mango una pila para alimentar a una bombilla que ilumina la graduación y facilitar así su lectura de noche.

**Funcionamiento y tipos de sextantes:**

Con la alidada a cero, se comprueba que el tornillo de presión esté aflojado (o que tengamos la palanca del tambor bien apretada)
Se desplaza la alidada suavemente hacia adelante hasta tener a coincidencia el objeto a observar
Si el índice de la alidada coincide con una graduación del limbo, la lectura es directa
Si no, hay que medir la separación entre la graduación de la derecha y la línea de fe.
Eso se hace, o bien con el nonio solidario a la alidada, o bien con un micrómetro de tambor.

Sextante de nonio

La graduación del limbo puede ser:
de 20’ en 20’ (en los sextantes más antiguos) 3 divisiones per grado
de 15’ en 15’; 4 divisiones per grado
de 10’ en 10’ (en los sextantes más modernos) 6 divisiones per grado
En estos sextantes los grados y las divisiones principales se miden en la alidada y las fracciones en el nonio
Si el limbo está graduado de 20’ en 20’, el nonio tiene la escala dividida en 20’ con marcas cada minuto i cada medio minuto y se aprecian 30”
Si el limbo está graduado de 10’ en 10’, el nonio tiene la escala dividida en 30 divisiones correspondientes a 10’ y puede apreciar hasta veinteavos de minuto

Sextante de tambor

Cada vuelta del tambor son 60’ (es decir 1º)
Los grados se miden directamente en el limbo a partir de la línea de fe de la alidada
Los minutos se miden en el tambor micrométrico
Les fracciones de minuto es leen en el nonio pequeño (hay nonios que dan 1/10 de ‘ y otros 1/6 de ‘)
o se aprecian directamente
La lectura es más fácil en los sextantes de tambor que en los de nonio

# IV. Errores en la lectura del sextante.

**Error de falta de perpendicularidad**.

Se debe a que el espejo grande no es perpendicular al plano del bastidor

Se comprueba poniendo el sextante plano encima una mesa, se mueve la alidada hasta que la línea de fe nos marque aproximadamente 45º - 50º. En este momento observareis el sextante por la parte opuesta al limbo como indica la figura 1

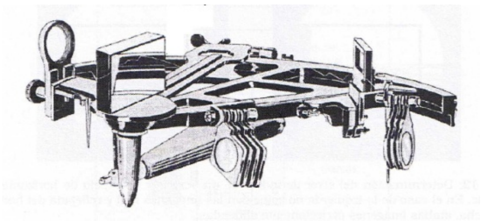


fig. 1

Con el ojo a la altura del espejo índice, se mira el limbo y se mueve la alidada poco a poco.

Se ve la parte del limbo que nos queda a la derecha directamente y también por reflexión a través del espejo índice.

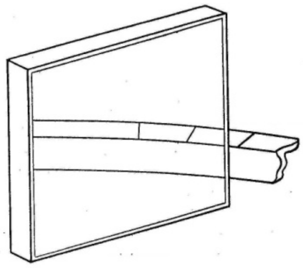


fig.2

Si el arco real y el reflejado se confunden en una sola línea continua (fig. 2) no hay error de perpendicularidad.

Si hay un salto, como en las figuras 3 y 4, hay error, y se ha de corregir.

Si la imagen reflejada es más baja que la de visión directa, (fig. 3) el espejo índice está inclinado hacia atrás y hay que apretar suavemente el tornillo que hay en la parte posterior del espejo.

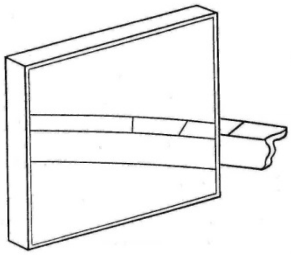


fig 3

En caso contrario, si la parte reflejada se ve más alta (fig. 4), indica que el espejo está inclinado hacia adelante, y en consecuencia se aflojará el tornillo de la parte posterior.

NOTA: En sextantes antiguos hay que sacar el espejo del marco y rellenar la base en el lugar adecuado hasta conseguir la perpendicularidad)

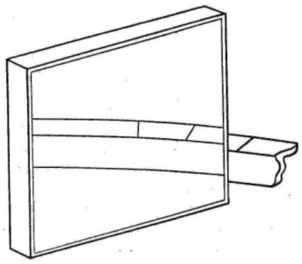


fig.4

**Error lateral**

Es originado por falta de perpendicularidad del espejo horizonte con el bastidor.

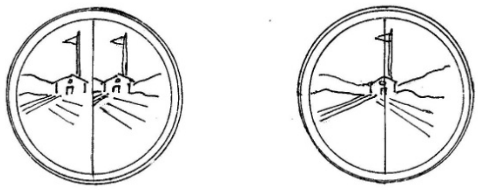
Para ver si hay error lateral, se ajusta la alidada a 0º y se enfoca el sextante al Sol, la Luna o una estrella brillante, (en algunos sextantes antiguos conviene escoger una estrella no demasiado brillante).

También se puede enfocar un punto lejano. (fig.5)

Se hacen los ajustes finos necesarios hasta que las imágenes real y reflejada queden superpuestas.

Si las imágenes se superponen, no hay error, (fig. 5 b) si se ven una al lado de la otra hay error (fig. 5 a)

Este error se corrige moviendo suavemente el tornillo de detrás del espejo pequeño más alejado del bastidor, e ir observando hasta conseguir que las imágenes se superpongan.



b fig.5 a

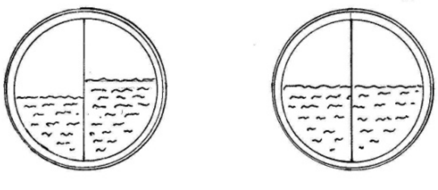
**Error de índice**

Es debido a que los espejos no son exactamente paralelos cuando la línea de fe de la alidada marca 0º.

Se descubre igual que el error lateral.

Se lleva el índice a 0º y visamos el horizonte con el sextante vertical (se puede mirar a un punto lejano).

Si la imagen directa y la reflejada no coinciden (fig,6 a), existe error de índice.



a fig.6 b

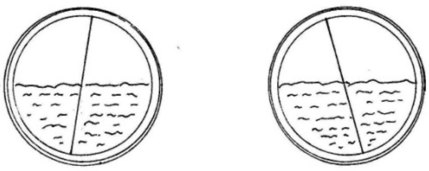


Fig.7

Se corrige manipulando suavemente el tornillo que hay detrás del espejo pequeño más cercano al bastidor hasta que el horizonte real y el reflejado formen una línea recta (fig. 6 b).

Hay que tener en cuenta que puede volver a aparecer error lateral, que se detecta girando el sextante alrededor del eje óptico del telescopio.

Si al girar el sextante, las imágenes continúan alineadas, no hay nuevo error lateral (fig. 7) pero si hay un salto (fig. 8) entonces existe error que hay que volver a eliminar como ya se ha explicado, y si queda un error de índice residual, se anota (se admiten errores de índice residuales inferiores a 3')

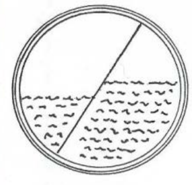


fig.8

**Otros errores**

Error de colimación;

Debido a la falta de paralelismo del eje óptico con el plano del bastidor porqué el collarín de soporte del anteojo no está bien alineado con el eje óptico.

Error de excentricidad;

Debido a que el eje de giro de la alidada no coincide con el centro geométrico del arco del limbo. (suele ser pequeño ≈ 1’ y habitual en sextantes antiguos)

Prismatismo de los espejos o de los filtros;

Debido a que sus caras no son perfectamente planas

Si los espejos tienen este defecto veremos las imágenes distorsionadas o mal definidas. En caso que este defecto sea mayor al final del limbo, será debido al espejo índice y si aumenta cerca del cero, es defecto del espejo pequeño

NOTA: Los errores de colimación, de excentricidad y prismatismo no se pueden corregir

# V. Bases físicas.

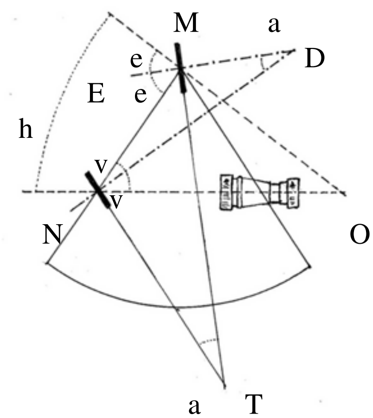
**Bases físicas.**

El sextante se basa en las leyes de la reflexión siguientes:

a) Si un rayo de luz se refleja en una superficie plana, el rayo incidente y el reflejado están en un plano perpendicular al plano de reflexión.

b) El ángulo de incidencia del rayo con la normal al plano de reflexión, es igual al ángulo de reflexión del rayo con la normal.

c) Si un rayo sufre dos reflexiones en el mismo plano, el ángulo que forman la primera y la última dirección es igual al doble del ángulo agudo formado por las dos superficies reflectoras.




En la figura, podemos ver que:

ED es ⊥ al espejo M y DN es ⊥ al espejo N
MT y NT son prolongación del plano de los espejos
Los ángulos en D y T son iguales (por lados ⊥)
En el triángulo MNO el ángulo exterior en M (2e) vale $2e = h + 2v$
En el triángulo MND el ángulo exterior en M (e) vale $e = a + v$
Así: $2a = h$

**Correcciones a las alturas sextantales**

Correcciones instrumentales

Antes de hacer cualquier medida se ha de conocer el error de índice, enfocando un objeto lejano (o el horizonte), haciendo coincidir la imagen directa y la doblemente reflejada.
Si la coincidencia es a la izquierda del cero la corrección es negativa y si es a la derecha, positiva.

Punto inicial y punto de paralelismo:

Punto inicial: punto donde se detiene la alidada cuando coincide la imagen directa y la doblemente reflejada de un objeto visto a través del anteojo.

El punto inicial varia con la distancia al objeto y es constante cuando el objeto está en el infinito (los espejos son paralelos). Éste es el punto de paralelismo (la alidada debería de marcar 0)

En la práctica los espejos se poden considerar paralelos cuando formen un ángulo suficientemente pequeño (por ejemplo 2”) (las normales también formaran el mismo ángulo de 2”)
La distancia L a que se encuentre un objeto para qué el punto inicial sea el de paralelismo será:

$$L/MN = \sin(180 - 2v) / \sin(2v - 2e)$$

Y como $v = e - a \Rightarrow 2v - 2e = 2a$ tenemos: $L = MN \sin 2v / \sin 2a$

En los Cassens & Plath: MN = 0,08 m; 2v = 30º ⇒ L = 2062 m

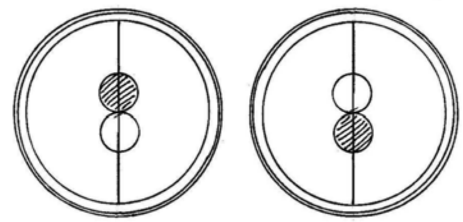
Si 2a = 10” (considerando paralelos los espejos, cuando formen un ángulo de 5”) ⇒ L = 825 m

Formas de hallar la corrección de índice:

Por el horizonte; se coloca el sextante en posición vertical con la alidada a 0º, es busca la coincidencia de las imágenes directa y reflejada. La lectura de la alidada da $E_i$

Por una estrella; se pone la alidada a 0º, se busca la coincidencia de las imágenes directa y reflejada. La lectura de la alidada nos da $E_i$ Se suelen elegir estrellas de 3ª magnitud. Es el mejor método porqué permite comprobar al mismo tiempo el paralelismo de los espejos.

Por el Sol; se pone la alidada a 0º, se busca la coincidencia de las imágenes directa y reflejada del disco solar. La lectura de la alidada da $E_i$.



Como el Sol tiene un diámetro apreciable, es difícil determinar la coincidencia, por lo que se lleva a tangentear la imagen reflejada con la directa y se anota la lectura l. Se repite la operación con los otros dos limbos y anotamos la nueva lectura l'.
El error de índice se obtiene entonces por:

$$E_i = \frac{1}{2} (l + l')$$

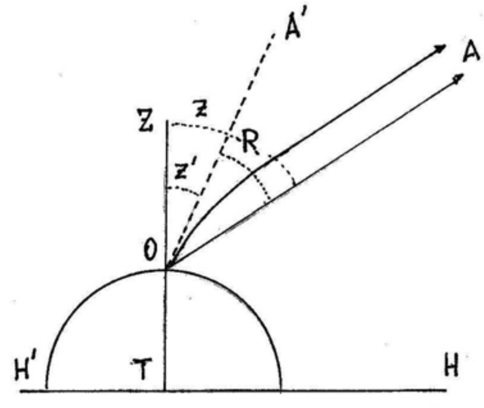
Con esta operación se puede determinar el semidiámetro del Sol, ya que $SD = \frac{1}{4} (l' - l)$
Hay que notar que la resta es algebraica..
Si al comparar el valor del SD obtenido con el que da el A. N. para el día de la fecha, resultan valores muy parecidos, la corrección de índice está bien obtenida, en caso contrario, tendremos que volverla a obtener

# VI. Correcciones atmosféricas

Refracción: La luz viaja a velocidad constante y en línea recta si el medio en qué se propaga es homogéneo e isótropo. (y la atmósfera no lo es!)

Si la luz pasa de un medio a otro de diferentes propiedades (dadas éstas por su índice de refracción *n*) sigue la ley de Snell de la refracción. (véase apéndice II).

Debido a la diferencia de densidad de las sucesivas capas atmosféricas, la luz que proviene de un astro no se propaga en línea recta, sino que sufre refracciones sucesivas y se curva. El resultado es que aparentemente, los astros parecen estar más altos de lo que realmente están.




Si $a_V$ es la altura verdadera y $a_{ap}$ es la altura aparente:

$$a_V = a_{ap} - R$$

siendo R la refracción atmosférica, que depende de la altura del astro.

Hay diversas formas de calcular la refracción atmosférica. (apéndice II)

Pero siempre hay que suponer una “atmósfera standard” (con el gradiente de densidad más probable), y obtener una fórmula que nos dé la refracción.

En una primera aproximación,

$$R = \alpha \tan z' = 60{,}37'' \tan z'$$

La fórmula de Smart – Laplace:

$$R(') = 0{,}97127 \text{ cotan } a_{ap}\,(^o) - 0{,}00137 \text{ cotan}^3\, a_{ap}\,(^o)$$

da buenos resultados para alturas aparentes de 15º a 90º.

A menos de 5º los errores aumentan progresivamente.

Para alturas menores que 5º da buenos resultados la fórmula empírica siguiente:

$$R(') = \frac{34{,}133 + 4{,}197\, a_{ap} + 0{,}00428\, a_{ap}^{2}}{1 + 0{,}505\, a_{ap} + 0{,}0845\, a_{ap}^{2}}$$

La fórmula de Bennett, menos exacta, pero con suficiente precisión para la navegación, válida para cualquier altura

$$R(') = \frac{1}{\tan\left(a_{ap} + \frac{7{,}31}{a_{ap} + 4{,}4}\right)}$$

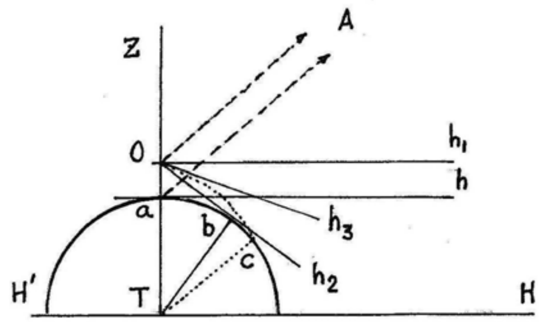
Pero da errores sistemáticos para alturas ≈ 12º que se corrigen por: $R_c\,(') = R(') - 0{,}06 \sin(14.7R(') + 13)$

La atmósfera real puede diferir de la calculada en condiciones anómalas (inversiones térmicas, espejismos)

Las condiciones standard son: p = 1010 hPa i T = 10ºC. En otras condiciones hay que corregir R per un factor f

$$f = (p/1010)\ (283/273 + T)$$

Depresión del horizonte: Un observador en O mide la altura de un astro sobre el horizonte visible o de la mar y no sobre el horizonte racional, por lo cual mide un ángulo mayor que $AOh_1 = Aah$.




* Si no hubiese atmósfera mediría $AOh_2$
* Per efecto de la refracción mide $AOh_3$

El ángulo $AOh_3 = AOh_1 + h_1Oh_3 \approx Aah + h_1Oh_3$

Donde: Aah es la altura aparente
$h_1Oh_3$ es la depresión aparente
$AOh_3$ es la altura observada
y $h_1Oh_2$ es la depresión verdadera

Cálculo de la depresión aparente

De la figura; $h_1Oh_3 = h_1Oh_2 - h_2Oh_3$
así; $D_a = D_v - R_t$
donde $R_t$ es la llamada refracción terrestre.

Si hacemos: $R_t = \alpha\ OTb$
como $OTb = h_1Oh_2 = D_v$, tenemos: $R_t = \alpha\ D_v$
donde $\alpha$ el llamado "coeficiente de refracción terrestre" (experimentalmente hallado por Delambre): $\alpha = 0{,}08$ (0,0784)

Así: $D_a = D_v - \alpha\ D_v = D_v\ (1 - \alpha)$

Suponiendo la Tierra esférica y de radio R:

$$\tan D_v = \frac{\sqrt{OT^2 - Ta^2}}{Ta} = \frac{\sqrt{(R + Oa)^2 - R}}{R} = \frac{\sqrt{2ROa + Oa^2}}{R}$$

Como Oa/R es muy pequeño, podemos despreciar el término cuadrático, y como además $D_v$ es también muy pequeño: $\tan D_v \approx D_v$ (en radianes!)

Entonces; $D_v = (2Oa/R)^{½}$.

En consecuencia; $D_a = (2Oa/R)^{½}\ (1 - \alpha)$ rad [1]

Recordando que: 1 rad = 180/π =180 60'/π = 10800'/π
que la longitud de una circunferencia es: $L = 2\ \pi\ R \Rightarrow R = L/2\ \pi$
y que según la primera definición de metro: "cuarentamillonesima parte del meridiano terrestre",

$$R = L/2\ \pi = 4 \text{ x } 10^7 \text{ m} / 2\ \pi$$

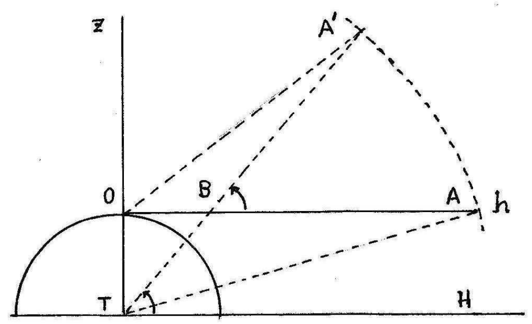
Sustituyendo en [1] tenemos:

$$D_a = \frac{10800'}{\pi}\sqrt{\frac{2\ Oa\ 2\ \pi}{4 \text{ x } 10^7}}(1 - \alpha) = 1{,}92685\ \sqrt{Oa}(1 - \alpha)$$

Y como el valor medio de $\alpha = 0{,}08$

tenemos que: $D_a = 1{,}7757'\ (Oa)^{½} = 106{,}54''\ (Oa)^{½}$

# VII. Correcciones astrales




Paralaje: Es el ángulo que subtiende el radio de la Tierra visto desde el astro.
El efecto de la paralaje es que hace disminuir las alturas.
En el cenit es nula y en el horizonte es máxima.

Para un observador en la superficie de la Tierra O,
y un astro en A' la paralaje es el ángulo OA'T (fig.)

En la figura
A'TH = A'Bh = A'Oh + OA'T on :
A'TH = altura verdadera
A'Oh = altura aparente
OA'T = paralaje

Clases de Paralaje: horizontal. Cuando el astro se encuentra en el horizonte.
en altura. Cuando el astro está a una altura dada por encima del horizonte.

Relación entre las dos: Del triángulo OA'T, por el teorema de los senos, tenemos:

$$\frac{\mathrm{OT}}{\sin \mathrm{OA'T}} = \frac{\mathrm{TA'}}{\sin \mathrm{A'OT}} \quad \Rightarrow \quad \frac{\mathrm{OT}}{\mathrm{TA'}} = \frac{\sin \mathrm{OA'T}}{\sin \mathrm{A'OT}}$$

Siendo: OT el radio de la Tierra $\mathbf{R_t}$
OA'T la paralaje en altura **p**
TA' la distancia entre los centros de los dos astros **D**
AOA' la altura aparente **a**

Así pues:

$$\frac{R_t}{D} = \frac{\sin p}{\sin(90 + a)} = \frac{\sin p}{\cos a} \quad \Rightarrow \quad \sin p = \frac{R_t}{D} \cos a$$

Si p es muy pequeño, entonces $\sin p \approx p \Rightarrow p = (R_t/D) \cos a$ [1]
A' está en el cenit $\Rightarrow a = 90 \Rightarrow \cos a = 0$
$D \to \infty$ (es el caso de las estrellas) $\Rightarrow p \to 0$
A' está en el horizonte A $\Rightarrow p_H = R_t/D$ [2]

Entre [1] y [2] tenemos: $p/p_H = \cos a$

Notas: Las estrellas, están muy lejos de la Tierra, ven a la Tierra como un punto y su paralaje es nula.
El Sol y los planetas, más cercanos, ven a la Tierra muy pequeña (esférica) y tienen paralaje apreciable.
La Luna, mucho más cercana, percibe que la Tierra no es esférica, que tiene forma de un elipsoide oblato y su paralaje **p** varia con el radio local del observador en la superficie de la Tierra **R .**
Cuanto mayor sea el radio local, mayor será la paralaje.
Como el radio máximo de la Tierra es el radio ecuatorial, la paralaje es máxima per a un observador ecuatorial.

La paralaje horizontal ecuatorial será pues: $P_{HE} = R_{eq}/D$

Mientras que la paralaje horizontal a una latitud l será: $P_H = R_l/D$

La relación entre ambas se obtiene dividiendo ordenadamente:

$$\frac{P_{HE}}{P_H} = \frac{R_{eq}}{R_l} \quad \Rightarrow \quad P_H = P_{HE} \frac{R_l}{R_{eq}}$$

Se puede demostrar que: $R_l = R_{eq} (1 - f \sin^2 l)$ donde $f$ es el achatamiento del elipsoide terrestre.

$f = R_{eq} - R_p / R_{eq} = 1/298{,}257 \approx 1/300$

Con lo que resulta: $P_H = P_{HE} (1 - f \sin^2 l)$

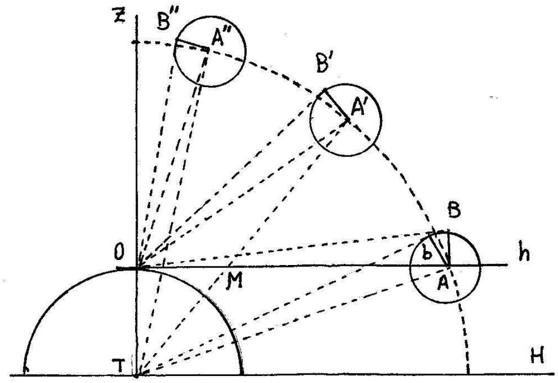
Semidiámetro: Al medir la altura de un astro, se ha de medir la altura *del centro* del astro
Si las dimensiones del astro, visto desde la Tierra no son despreciables, se mide la altura de uno de sus limbos y se corrige esta altura por semidiámetro
Se define *semidiámetro* como el ángulo que subtiende desde la Tierra, el radio angular del astro

Clases de semidiámetro: Si el ángulo se mide desde el centro de la Tierra, tenemos el semidiámetro geocéntrico y si lo medimos desde la superficie de la Tierra tenemos el semidiámetro topocéntrico

El semidiámetro geocéntrico se deduce del triángulo TbA (fig.)

$$\sin bTA = \sin SD_g = \frac{bA}{TA} = \frac{r}{D}$$

Donde r es el radio angular del astro y D la distancia del astro a la Tierra
Como el ángulo es pequeño: $\sin SD_g \approx SD_g = r/D$
Éste ángulo varía en razón inversa a la distancia a la Tierra, ¡como ha de ser!
(¡los objetos más lejanos, se ven más pequeños!)




El semidiámetro topocéntrico aumenta con la altura del astro sobre el horizonte.
En efecto, los triángulos OTA, OTA', OTA''...
tienen: un lado común: OT
los lados TA, TA', TA'' ... iguales
y como los ángulos comprendidos por ellos son cada vez más pequeños a medida que la altura del astro aumenta, los lados opuestos también han de ser cada vez más pequeños.
Es decir: la distancia del astro al observador se hace más pequeña y por tanto ¡el semidiàmetre aumenta!

Podemos distinguir entre:
semidiámetro topocéntrico horizontal BOA; $\sin BOA = \sin SD_{Th} = r/D$ o aproximadamente $SD_{Th} = r/D$
semidiámetro topocéntrico en altura B'OA'; $\sin B'OA' = \sin SD_{Ta} = r/d$ o aproximadamente $SD_{Ta} = r/d$
Así: $OA/OA' = D/d = SD_{Ta} / SD_{Th}$

Relación entre semidiámetro y paralaje.
En el triángulo OA'T por el teorema de los senos, tenemos que:

$$\frac{OA'}{OT} = \frac{\sin OTA'}{\sin OA'T} \Rightarrow OA' = OT\frac{\sin OTA'}{\sin OA'T}$$

Calculemos OTA': OTA' = 90 – A'HT = 90 – A'Mh

Pero A'Mh al ser un ángulo exterior del triángulo A'MO será: A'Mh = A'Oh + OA'T
de forma que: OTA' = 90 – (A'Oh + OA'T) = 90 – (a + p)

Y de esta manera: $OA' = OT\frac{\cos(a+p)}{\sin p}$ siendo: OA = TH = D

Si dividimos ordenadamente, teniendo en cuenta que $OT = R_t$ obtenemos:

$$\frac{SD_g}{SD_t} = \frac{OA'}{OA} = \frac{\sin P_{HE}}{\sin p}(\cos a - p \sin a) = 1 - \sin P_{HE} \sin a$$

Como p es un ángulo pequeño $\sin p \approx p$ y $\cos p \approx 1$ y además: $\sin P_{HE} / \sin p = 1/\cos a$ (ver paralaje).

Y entonces: $$SD_t = SD_g \frac{1}{1 - \sin P_{HE} \sin a} \cong SD_g (1 + \sin P_{HE} \sin a + ...)$$

Como la $P_{HE}$ máxima de la Luna es 62' y sin 62' ≈ 1/55, despreciando los términos superiores al segundo

tenemos: $SD_t = SD_g (1 + \sin a/55)$

## VIII. Uso del sextante en navegación costera

Para situarnos, en navegación costera, hemos de observar los puntos notables de la costa e identificarlos en la carta. La situación se obtiene entonces por intersección de dos o más líneas de posición deducidas a partir de estos puntos notables.
Una línea de posición en la carta es el lugar geométrico donde nos encontramos en un instante dado.
Les líneas de posición más usuales en navegación costera son: rectas; por ejemplo las demores, ángulos verticales o también circunferencias y arcos capaces deducidos de ángulos horizontales
Todas ellas implican la medida de ángulos. Las demoras se suelen medir con un compás de demoras

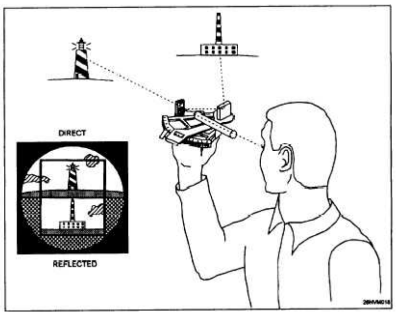


fig. 1

**Medida de ángulos horizontales:**

Si medimos ángulos horizontales con un compás, por diferencia de demoras, en el caso ideal: barco parado, mar plana, conocidos los desvíos para cada ángulo... etc. se puede obtener una precisión al grado próximo. Con el sextante podemos medir un ángulo horizontal con una precisión de un minuto (fig. 1**)**

El lugar geométrico desde el que se ven dos puntos bajo el mismo ángulo es un arco de circunferencia. Es el llamado **arco capaz de un ángulo**.

Así, el ángulo con el que vemos dos puntos de la costa es un ángulo inscrito en una circunferencia, que es igual a la mitad del ángulo central.

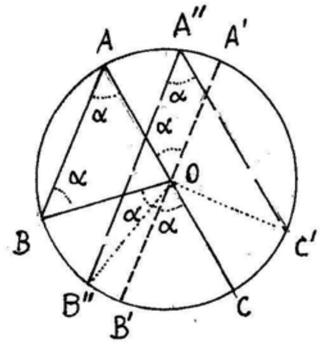


fig. 2

Vamos a verlo por partes: (fig.2)

Caso particular: Consideremos el ángulo $\alpha$ = BAC
El ángulo BAC = B'OC (por tener sus lados paralelos) y
B'OC = AOA' (por ser ángulos opuestos por el vértice)
AB y A'B' son rectas paralelas y A'B' es un diámetro;
así los arcos AA' y BB' son iguales; y el ángulo BOB' = $\alpha$
ABO = BOB' (por alternos internos de paralelas cortadas por una secante)
Así: BOC = B'OC + BOB' = 2 $\alpha$ es decir: ½ BOC = BAC

Caso general: B"A"C' = B'OC (por tener sus lados paralelos)
los arcos B'C = AA' (B'OC = AOA' ángulos centrales)
el arco B'C = AA" + A"A' = CC' + B"B'
el ángulo B"OC' = 2 B'OC = 2B"A"C $\Rightarrow$ B"A"C = ½ B"OC'

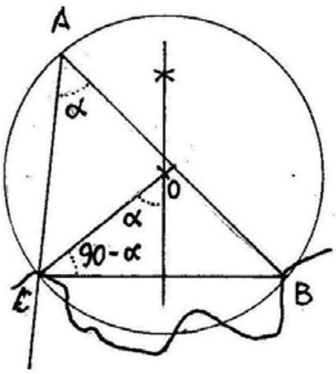


fig.3

Construcciones gráficas del arco capaz

1r caso: $\alpha < 90º$: (fig. 3) Unimos los puntos BC
Por uno de estos puntos trazamos una recta que forme un ángulo de 90 - $\alpha$ con BC hacia A
Trazamos luego la mediatriz a BC
La intersección de la mediatriz con la recta anterior, nos da el centro de la circunferencia

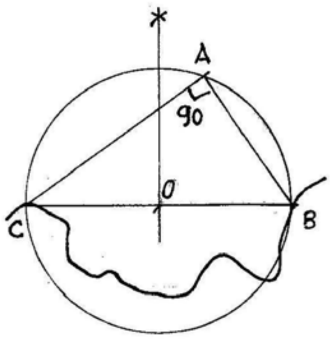


fig.4

2o caso: $\alpha = 90º$: (fig. 4) En este caso el centro de la circunferencia es el punto medio de BC

3r caso: $\alpha > 90º$: (fig. 5) Unimos los puntos BC
Por uno de estos puntos trazamos una recta que forme un ángulo de $\alpha$ - 90 con BC hacia la parte contraria a A
Trazamos la mediatriz a BC
La intersección de la mediatriz con la recta anterior, nos da el centro de la circunferencia

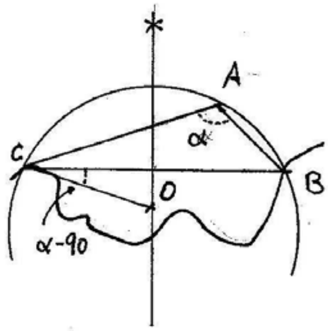


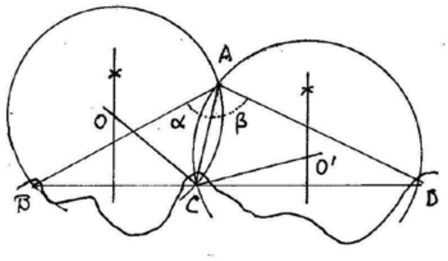
fig. 5

Construcción práctica:
Coloquemos el transportador en uno de los puntos de forma que los 90º coincidan con la recta BC.
Marquemos el ángulo 90º - $\alpha$ hacia A si $\alpha < 90º$ y $\alpha - 90º$ en sentido contrario si $\alpha > 90º$

Tracemos la mediatriz y marquemos el centro de la circunferencia

Situación por medida simultánea de dos ángulos horizontales.
Cálculo de la corrección total (fig. 6)

Si tomamos dos ángulos horizontales simultáneamente, estamos en dos arcos capaces de ángulos BAC y CAD y así podemos situarnos aún sin saber la $C_t$ de la aguja.
Entonces miramos la demora verdadera $D_V$ de un punto en la carta, p. ej: B y leemos la $D_A$ del mismo punto con el compás



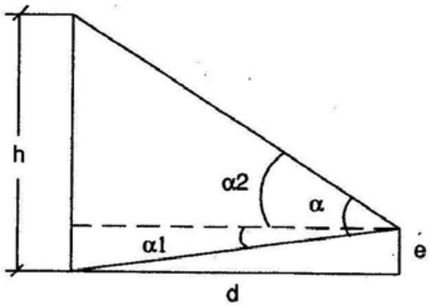

$$C_t = D_V - D_A$$

fig. 6

**Medida de ángulos verticales**

Cuando observamos un punto de la costa (punto de referencia), estamos en una circunferencia centrada en el punto observado y de radio la distancia al punto de referencia

La distancia se puede determinar leyéndola en el radar o por medida del ángulo sextantal a un punto elevado




a) Normalmente usamos la aproximación del triángulo rectángulo (es el caso de faros en la misma línea de la costa)

$$d = h \text{ cotan } \alpha$$

b) Si queremos tener en cuenta la elevación del observador

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

de la figura de la derecha se deduce que: $\tan \alpha_1 = e/d$
$\tan \alpha_2 = (h - e)/d$

así:

$$\tan\alpha = \tan\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2}{1 - \tan\alpha_1 \tan\alpha_2} = \frac{\square h \cdot d}{d^2 - e(h-e)}$$

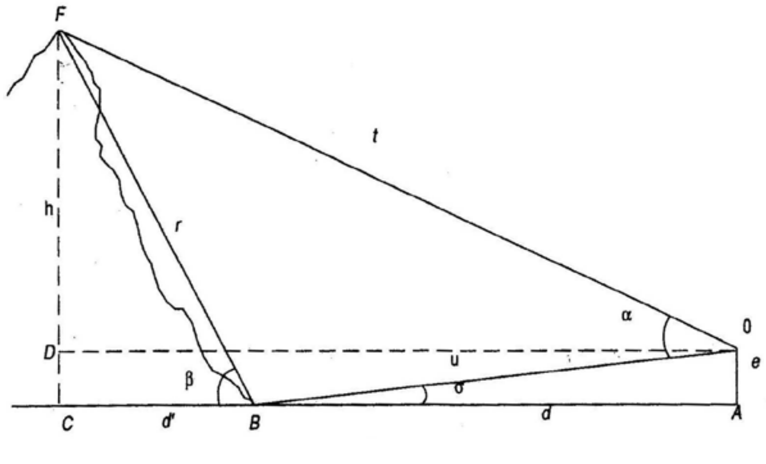
o sea: $[d^2 - e(h - e)] \tan \alpha = h \cdot d$

o bien: $d^2 \tan \alpha - e(h - e) \tan \alpha - h \cdot d = 0$

que es una ecuación de 2o grado en d que tiene por soluciones

$$d = \frac{h \pm \sqrt{h^2 + 4e(h-e)\tan\alpha}}{2\tan\alpha}$$

c) Caso general
Si el punto elevado no se puede considerar en la línea de la costa:




En el triángulo FBC:

$r^2 = h^2 + d'^2$

$\sin \beta = h/r$

$\cos \beta = d'/r$

En el triángulo FOD:

$t^2 = (h - e)^2 + (d + d')^2$

En el triángulo BOA:

$u^2 = d^2 + e^2$

$\sin \sigma = e/u$

$\cos \sigma = d/u$

Finalmente en el triángulo OFB, por el teorema del coseno: $r^2 = t^2 + u^2 - 2\, t\, u \cos \alpha$
y por el teorema de los senos: $r / \sin \alpha = t / \sin (\beta + \sigma)$ o también: $r\, u / \sin \alpha = t\, u /$ son $(\beta + \sigma)$
como: $\sin (\beta + \sigma) = \sin \beta \cos \sigma + \cos \beta \sin \sigma = (h / r) ( d / u) + (d' /r) (e / u)$

substituyendo y despejando t u, tenemos: $$t\,u = \frac{h\,d + d'\,e}{\sin\alpha}$$

Así pues: $h^2 + d'^2 = (h - e)^2 + (d + d')^2 + d^2 + e^2 - 2\,(h\,d + d'\,e)\cot an\,\alpha$

Operando: $h^2 + d'^2 = h^2 + e^2 - 2he + d^2 + d'^2 + 2dd' + d^2 + e^2 - 2\,(h\,d + d'\,e)\cot an\,\alpha$

Simplificando: $2e^2 + 2d^2 - 2be + 2\,dd' - 2\,(h\,d + d'\,e)\cot an\,\alpha$

Y ordenando: $d^2 \tan\alpha + d\,(d' \tan\alpha - h) - e\,(h \tan\alpha - e \tan\alpha + d') = 0$

que es una ecuación de 2o grado en d, cuya solución general es;

$$d = \frac{(h - d' \tan\alpha \pm \sqrt{(d' \tan\alpha - h)^2 \; + 4e \tan\alpha\,(h \tan\alpha - e \tan\alpha + d')}}{2 \tan\alpha}$$

Para obtener d hemos de conocer d' (distancia horizontal desde el punto de referencia a la línea de costa) y como d' varia con la demora, tendremos que conoer la demora, con lo que podemos situarnos por demora y distancia.

# IX. Uso del sextante en navegación astronómica.

Preparación de una observación

1.- Limpiar los espejos, filtros y anteojo (suavemente, con los paños adecuados y sin presionar demasiado para no desajustarlo)

2.- Graduar el anteojo a vuestra vista (de día con el horizonte o con un objeto lejano y de noche con una estrella y centrarla con el espejo de horizonte)

3.- Escoger el lugar de observación (protegido del viento y de los rociones y lejos de focos de aire caliente para evitar refracciones anómalas)

Con horizontes brumosos se observará desde un sitio bajo y si hay oleaje o balances fuertes hay que observar desde un sitio alto (per minimizar la deferencia de depresión de horizonte)

4.- Comprobar el error de índice y corregirlo (si hace falta; retocando el ajuste de los espejos) o anotarlo

5.- Como norma general, no se observarán astros con alturas menores de 15º (evitar error de refracción) ni superiores a 65º (evitar error de tangenteo)

Observación del Sol o la Luna

ANTES de la observación HAY QUE PONER LOS FILTROS adecuados ya que de no hacerlo **se poden producir lesiones graves e irreversibles de retina.**

Para el espejo índice es un buen hábito el colocar de entrada TODOS los filtros e irlos sacando hasta ver el disco del astro nítidamente sin que moleste

Para el espejo horizonte, colocaremos el filtro que haga falta para que el reflejo de la luz del astro no moleste y se vea bien el horizonte

Mirar la parte del horizonte más brillante, que es la que está en la vertical del astro a observar.

Abrir la alidada hasta encontrar la imagen reflejada del astro cerca del horizonte

Si solamente vemos resplandor, moveremos el sextante a derecha e izquierda hasta que aparezca el astro

Con el tambor micrométrico (o el tornillo de movimiento lento del nonio) se tangentea el astro con el horizonte.

Como en este caso es difícil observar el centro del astro, se observa uno de sus limbos.

Para el Sol se recomienda observar el limbo inferior (▯) y solamente observaremos el limbo superior (▯) cuando el limbo inferior esté tapado por las nubes.

Para la Luna, el caso es diferente, porqué solamente son visibles los dos limbos en Luna llena

En las otras fases tendremos que observar el limbo visible.

En Luna creciente, al este del meridiano se observa el limbo superior y al oeste se observa el inferior

En Luna menguante, al este se observa el limbo inferior y al oeste el superior.

Cuando estemos en plenilunio se pueden observar indistintamente ambos limbos, pero hemos de tener cuidado de no confundir el limbo con el terminador cuando la Luna está “casi” en plenilunio

En observaciones nocturnas de la Luna hay que tener un cuidado especial con los posibles falsos horizontes y reflejos generados por la misma Luna sobre la mar.

Medida de la altura de otros astros

Las estrellas y planetas se observan durante los crepúsculos, momento en el qué se distinguen bien el astro y el horizonte

Los astros a observar se han de escoger previamente y así saber aproximadamente su acimut y su altura

A veces, los planetas Júpiter y Venus se pueden observar de día, si sus acimutes difieren bastante de los del Sol

Métodos de observación para “hacer bajar el astro al horizonte”.

Sabiendo la altura aproximada (caso de la Polar; a ≈ l) fijamos la alidada en la altura y miramos en la dirección del acimut del astro

Si la estrella se ve bien y no está muy alta se usa el mismo procedimiento que con el Sol

Movemos la alidada hasta que aparezca el astro o veamos más resplandor, movemos el sextante a derecha e izquierda hasta que aparezca el astro

Alternativamente, ponemos la alidada a cero y enfocamos al astro. Movemos el sextante sin perder la imagen reflejada, hasta que aparezca la imagen directa del horizonte. Entonces ha de aparecer el astro cerca del horizonte

Si la estrella no se ve bien o está muy alta, se invierte el sextante (con el limbo hacia arriba), se mira por el vidrio del espejo horizonte a la estrella, se mueve la alidada hasta que aparece el horizonte, se coloca el sextante en posición normal para hacer el ajuste fino, y entonces tangenteamos haciendo oscilar el sextante con la muñeca

NOTA: Una observación precisa necesita de la cooperación de dos tripulantes; uno al sextante y un auxiliar encargado de leer el cronómetro y hacer las anotaciones.
Si hacemos la observación por la mañana, como la altura del Sol sobre el horizonte aumenta, es buena práctica dejar el limbo inferior un poco "mordido" o "sumergido" en el horizonte y si observamos por la tarde, como la altura del Sol disminuye lo dejaremos ligeramente por encima del horizonte.
Indicaremos al auxiliar que estamos preparados para la observación con la voz de "listos" que él repetirá para asegurarnos que también él está preparado.
Entonces, movemos el tambor o el tornillo de ajuste fino hasta conseguir la tangencia del limbo con el horizonte o simplemente dejamos que el Sol en su movimiento se tangentee él solito. Nos aseguraremos que tenemos el sextante vertical (perpendicular al horizonte) y lo haremos oscilar sobre el eje óptico ligeramente para asegurar la tangencia y entonces haremos el último ajuste.
Cuando estamos seguros, damos la voz de "top" y el auxiliar lee la hora y la anota por este orden: segundos, minutos y hora. A continuación leemos en la graduación del sextante la altura instrumental que el auxiliar repetirá y anotará al lado de la hora.

Obtención de la altura verdadera a partir de la instrumental.
Para obtener la altura verdadera, hemos de hacer una serie de correcciones a la altura que acabamos de anotar:
*Corrección de error de índice*. Ei
Si el 0 de la graduación no coincide con el punto de paralelismo de los espejos, a la separación entre ambos puntos se le llama error de índice Ei
La altura medida con el sextante (altura instrumental ai) y la altura observada $a_0$ sólo coinciden si Ei = 0 por lo que si Ei $\neq$ 0 hay que hacer una corrección por error de índice
Si el 0 de la alidada está a la derecha de 0 del limbo Ei > 0 y si está a la izquierda Ei < 0
Una vez hecha esta corrección, obtenemos la altura observada.
*Corrección por depresión de horizonte*. D
La altura, con el sextante, se mide sobre el horizonte aparente (o de la mar) y no sobre el horizonte verdadero.
La diferencia entre ambas se llama depresión del horizonte. La altura observada siempre es mayor que la verdadera, de forma que esta corrección es siempre negativa. Su valor es: $D = 1{,}7757' \sqrt{h}$, con h en metros.
Obtenemos así la altura aparente del astro.
*Corrección por refracción*. R
La luz viaja a velocidad constante y en línea recta si el medio en que se propaga es homogéneo e isótropo (¡y la atmósfera no lo es!). La luz que proviene de un astro no se propaga en línea recta a través de la atmósfera sino que sufre una serie de refracciones sucesivas y se curva.
Como resultado, aparentemente, los astros parecen estar más altos, así que habrá que restar la refracción.
*Corrección por semidiámetro.* SD
Las observaciones se han de hacer con respecto al centro de los astros, pero como el Sol, la Luna y los planetas no son objetos puntuales sino que tienen un diámetro aparente, es difícil encontrar exactamente el centro del astro, así que dirigimos las visuales a uno de sus limbos, para el Sol, normalmente el inferior.
La altura del centre del astro será la del limbo inferior más el radio (o semidiámetro), o la del limbo superior menos el semidiámetro.
*Corrección por paralaje*. P
Es el ángulo bajo el que se ve el radio de la Tierra visto desde el centro del astro (paralaje en altura)
Para los objetos del sistema solar tiene un valor apreciable (para el Sol p $\approx$ 8,8" $\approx$ 0,15' para la Luna p es mucho mayor, puede superar 1º)
Medidas hechas en distintos lugares de la Tierra dan valores ligeramente diferentes, por lo que se reducen las observaciones "al centro de la Tierra".
La paralaje hace disminuir la altura del astro, por tanto, habrá que restar
* Para el Sol, estas tres últimas correcciones vienen englobadas en una sola tabla (tabla A pág. 387 del A.N.)
* Para Marte y Venus la paralaje se da en la tabla C (derecha) pág. 387 del A.N.
* Para la Luna, a partir de PHE y de la altura aparente vamos al A.N. (pág.388-389) y con los º de altura aparente y ' de PHE encontramos la corrección por R SD y P de los º y ' de paralaje; por los' de altura aparente y décimas de ' de PHE, entramos 2 veces en la tabla de partes proporcionales: una primera con los ' de altura y diferencia tabular para º de altura (negativa) y otra con décimas de ' y diferencia tabular para ' de paralaje (positiva)

# X. Medida de distancias lunares.

El problema de la longitud y la hora

En navegación astronómica la longitud y el tiempo (la hora) son interdependientes.

Se puede medir el tiempo por el movimiento aparente de la Luna respecto del fondo de estrellas fijas porque la distancia entre la Luna y otro astro que se encuentre en su camino varia suficientemente rápido. ($\approx$ 0.5º/h)

El tiempo correspondiente a una distancia lunar observada, se encuentra por comparación con valores tabulados.

Las distancias lunares tabuladas se calculan a partir de las coordenadas ecuatoriales geocéntricas de la Luna (☾) y de un astro auxiliar (☼) mediante:

$$\cos D_C = \sin d_L \sin d_A + \cos d_L \cos d_A \cos (hG_L - hG_A)$$

dónde $D_C$, es la distancia lunar geocéntrica o calculada.

Podemos usar estas fórmulas para hacernos nuestra propia tabla junto con el AN. Se ha de conocer hG☾, d☾, hG☼, d☼ en las horas $T_1$ i $T_2$

Procedimiento

Para medir una distancia lunar es preciso:

* medir con el sextante el ángulo entre la Luna y un astro auxiliar siguiendo el arco de círculo máximo que pasa por ambos astros y aplicar las correcciones adecuadas para obtener la distancia lunar verdadera
* comparar la distancia lunar verdadera con la distancia lunar calculada (estimada) $D_C$.

Este procedimiento se denomina procedimiento de *limpieza* de la distancia lunar

Nomenclatura

Para las correcciones de medidas sextantales: $e_i$: error de índice
$D_p$: depresión de horizonte
SD: semidiámetro
R: refracción
P: paralaje

Para las medidas m: altura aparente de la Luna (corregida de $e_i$ $D_p$ y SD)
s: altura aparente del astro auxiliar (corregida de $e_i$ $D_p$ (y de SD si el astro auxiliar es el Sol)
d: distancia lunar aparente (corregida de $e_i$ y SD)
M: altura verdadera de la Luna (m corregida de R y P)
S: altura verdadera del astro auxiliar (s corregida de R y P)
D: distancia lunar verdadera

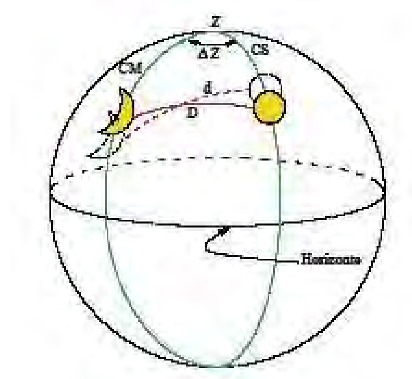


fig. 1

La diferencia entre m i M (o entre s i S) es que las alturas en mayúsculas contienen las correcciones por R i P

La corrección por R es siempre negativa (los astros parecen estar más altos de lo que están en realidad)

La corrección por P es siempre positiva, para todos los astros P $\approx$ 0, excepto para el Sol; P = 0.15' y para la Luna; P $\geq$ 1º por esto, en general M > m i s > S

Distancia lunar aparente y distancia lunar verdadera.

En el triángulo Luna, cenit, astro, (fig. 1) aplicamos el primer grupo de Bessel, así obtenemos ΔZ:

$$\cos d = \sin m \sin s + \cos m \cos s \cos \Delta Z \quad \Rightarrow \quad \cos \Delta Z = \cos d - \sin m \sin s/(\cos m \cos s)$$

R i P producen un desplazamiento de los 2 astros en el vertical, (no hacen variar ΔZ), y así, análogamente:

$$\cos D = \sin M \sin S + \cos M \cos S \cos \Delta Z \quad \Rightarrow \quad \cos \Delta Z = \cos D - \sin M \sin S/(\cos M \cos S)$$

Igualamos y sumamos 1 a cada miembro

$$\frac{\cos d - \sin m \sin s}{\cos m \cos s} = \frac{\cos D - \sin M \sin S}{\cos M \cos S} \quad \Rightarrow \quad \frac{\cos d - \sin m \sin s}{\cos m \cos s} + 1 = \frac{\cos D - \sin M \sin S}{\cos M \cos S} + 1$$

Operamos y recordando que cos (a + b) = cos a cos b – sin a sin b, obtenemos

$$\frac{\cos d - \sin m \sin s + \cos m \cos s}{\cos m \cos s} = \frac{\cos D - \sin M \sin S + \cos M \cos S}{\cos M \cos S} \Rightarrow \frac{\cos d + \cos(m+s)}{\cos m \cos s} = \frac{\cos D + \cos(M+S)}{\cos M \cos S}$$

Despejando ahora cos D, obtenemos la fórmula de Young (exacta para una Tierra esférica)

$$\cos D = \cos M \cos S \frac{\cos d + \cos(m+s)}{\cos m \cos s} - \cos(M+S)$$

Para corregir la distancia lunar medida con el sextante, d, hemos de medir m i s para así calcular después M i S y obtener D

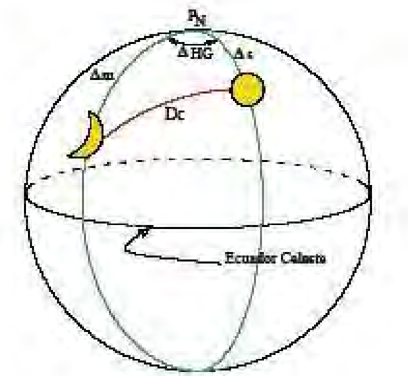
Distancia lunar calculada y obtención de la hora

Las tablas de distancias lunares dan la distancia entre la Luna y una selección de astros elegidos adecuadamente para cada día a diferentes horas UT, a intervalos de 3 horas

Buscamos en la columna del astro auxiliar las distancias $D_1$ y $D_2$ de dos horas consecutivas de forma que: $D_1 < D < D_2$ y suponemos que en 3 horas la distancia lunar varia linealmente.

La hora UT de la observación se obtiene por una interpolación inversa

$$T = T_1 + (T_2 - T_1)\ D - D_1/(D_2 - D_1)$$




La máxima precisión en la hora UT que se puede obtener por este método está comprendida entre 1 i 2 minutos

Comentarios

¿Cómo se obtiene la hora UT a partir de una distancia lunar?

Calculamos la distancia lunar $D_C$ a la hora UT entera anterior y $D'_C$ a la hora entera posterior al instante de la observación. (vid. supra)

Suponemos que estas $D_C$ varían linealmente, e interpolamos para hallar la hora UT del instante de observación

Comparamos la hora UT calculada con la lectura del cronómetro en el instante de la observación.

Las $D_C$ se calculan por:

$$\cos D_C = \sin d_L \sin d_A + \cos d_L \cos d_A \cos(hG_L - hG_A)$$

Observemos que en este cálculo *no interviene la posición del observador*

uno de los vértices del triángulo esférico *es el polo norte celeste* y no el polo elevado

como $(hG_L - hG_A)$ es argumento de un coseno no importa el orden de la resta

El límite de precisión del método está condicionado por la velocidad de la Luna respecto del fondo de estrellas fijas. (Variación de la distancia entre la Luna y el astro auxiliar por unidad de tiempo).

Cuanto más de prisa varíe esta distancia mejor será la precisión, ello se consigue eligiendo astros muy cercanos a la trayectoria aparente de la Luna en el cielo.

Como la Luna no se separa nunca más de 5 - 6º de la eclíptica, habremos de elegir astros en esta zona: el Sol, los planetas Venus, Marte, Júpiter y Saturno y un número limitado de estrellas: Altair, Fomalhaut, Hamal, Aldebaran, Pollux, Regulus, Antares, Spica y Markab.

La Luna tiene un movimiento propio hacia el este de ≈ 0.5º/h respecto del fondo de estrellas fijas. Si medimos la distancia con una precisión de 1'de arco, el error obtenido en el tiempos es ≈ 2 min. Por eso se han de hacer las medidas con el mínimo error posible y los cálculos con la mayor precisión.

Consejos prácticos

La calidad de la medida afecta mucho a la precisión obtenida. Hay que ir con mucho cuidado para tener una medida excelente.

Así hemos de tener en cuenta que:

- El horizonte no nos interesa a la hora de medir una distancia lunar.

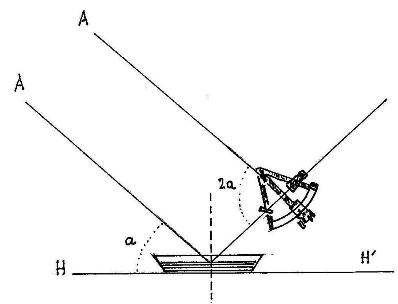
Podemos colocarnos cómodamente, bien apoyados, para tener la posición más estable posible.

- Se puede medir una distancia lunar en un lugar donde no se vea el horizonte.
  Lo importante es ver los dos astros, aún que haya obstáculos entre medio. (velas, palos,...)
- El espejo índice lo mantendremos permanentemente apuntando al astro que veamos a través del anteojo.
- Se enfocará el sextante de forma que observemos la imagen directa del astro menos brillante. (a través del espejo horizonte)
- El astro más brillante se enfocará con el espejo índice y será el que llevaremos a coincidir con el otro astro al mover la alidada.
- Como el arco de circulo máximo que pasa por los dos astros normalmente es oblicuo, nos obligará a colocar el sextante en posiciones incómodas, incluso al revés, si queremos medir lunares con precisión.
- Una vez enfocado el astro menos brillante y colocado el sextante según el arco de círculo máximo, movemos la alidada hasta conseguir ver simultáneamente los dos astros a través del anteojo.
- Entonces hay que tangentear la estrella (o planeta) con el limbo de la Luna (con el Sol, se tangentean los limbos de los dos astros). Esta es la operación más delicada y hay que hacerla con el máximo cuidado, porque es donde se introducen los mayores errores.
- Hay que tener en cuenta que la Luna presenta un limbo nítido y otro borroso (terminador).
  Para alturas: En Luna creciente, al E del meridiano se observa el limbo superior y al W el inferior.
  En Luna menguante, al E del meridiano se observa el limbo inferior y al W el superior
  Para distancias lunares: Se usa el limbo nítido aún que tengamos que hacer pasar la imagen del astro auxiliar por encima de la de la Luna y tangentear el limbo lejano. (anotaremos el limbo para hacer la corrección por SD)
- Para mejorar la precisión (disminuir errores) hay que hacer diversas medidas sucesivas de la distancia lunar (anotando el tiempo de cada una) y después hacer las medias de las distancias y de los tiempos.
- El orden de las medidas será
  = medir la altura del astro auxiliar
  = medir la altura de la Luna
  = medir una secuencia de diversas distancias lunares
  = volver a medir la altura de la Luna
  = volver a medir la altura del astro auxiliar
  
  Así la media de las alturas del astro auxiliar y de la Luna corresponderán al instante de la media de las lunares.
- Finalmente hay que recordar que las lunares se miden de noche, y que entonces la visión del horizonte es mala (o nula), lo cual dificulta la medida de las alturas; no obstante la altura que hay que medir con mayor precisión es la de la Luna (tiene un efecto mayor en la corrección) y la misma Luna nos ilumina un arco de horizonte

# XI. Uso del sextante con horizonte artificial.

Si desde el lugar de observación no vemos el horizonte, lo podemos sustituir por un “horizonte artificial”, también llamado “falso horizonte”
Los exploradores, cartógrafos, topógrafos y aviadores hacen uso a menudo del horizonte artificial.

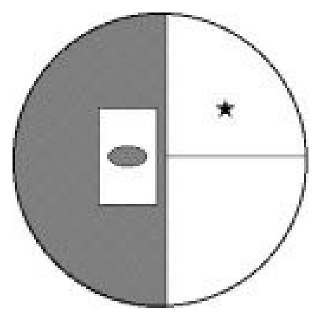
Se han ideado diversos tipos de horizontes artificiales:
* *de mercurio*: una cubeta llena de mercurio se comporta como como un espejo, siendo además una superficie libre de un líquido, que por definición es horizontal. (fig)
* *de espejo negro*: lleva unos tornillos de ajuste y un nivel de burbuja para conseguir la horizontalidad.
* *de agua*: un recipiente con agua también refleja los rayos del Sol o de la Luna y se puede usar para tomar alturas de estos astros. Se puede sustituir el agua por un líquido más viscoso, como por ejemplo el glicerol o el aceite de oliva.




En este tipo de horizontes artificiales hay que corregir la altura instrumental solamente de error de índice, refracción y paralaje.

Los horizontes artificiales hasta ahora descritos se pueden usar sólo para alturas de los astros inferiores a 60º porqué con ellos se mide el ángulo que forma la imagen directa con la reflejada por el horizonte (ver fig.) que es el doble de la altura del astro

* *de burbuja*: Se sustituye el anteojo por el “horizonte artificial” que es un anteojo especial dividido en dos partes; a la izquierda tenemos una burbuja (como la de un nivel de albañil) y a la derecha una línea horizontal (fig.). Al tangentear el astro con la línea horizontal, la burbuja ha de ser también tangente a esta línea.



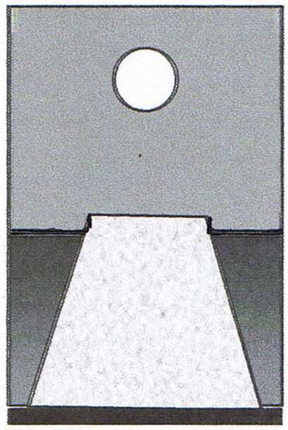
En este  tipo de horizontes artificiales hay que corregir la altura de error de índice, refracción, semidiámetro y paralaje.

# XII El uso del sextante de noche

Casi siempre es posible determinar si el reflejo de la luz de la Luna en el agua distorsiona el horizonte, observando a través de un filtro “ligero” colocado en el espejo horizonte.

Moviendo el sextante poco a poco hacia un lado y hacia el otro a través de la franja brillante del reflejo de la luz de la Luna en el agua, es posible saber si el horizonte iluminado está en una misma recta con el horizonte real donde se unen la parte iluminada y la oscura.

A menudo, lo que parece un buen horizonte bajo la Luna, no sigue la línea del horizonte real resultando así inútil para tomar una altura.



¿Inútil?

Depende de la necesidad que tenga el navegante de obtener una línea de posición y de la precisión que necesite.

Si carecemos de una LDP fiable, podemos intentar lo siguiente:

- Tomamos la altura de la Luna respecto del supuesto horizonte con el filtro más oscuro que podamos en el espejo índice
- Ponemos en el sextante su corrección de índice para que el horizonte reflejado coincida con el observado directamente.
- Apuntamos así a la parte del horizonte iluminado por la Luna, sin ella en el campo de visión y sin filtros
  A menudo se distingue una discontinuidad entre el segmento de horizonte iluminado y el real, oscuro. La línea del horizonte iluminado parece más alta respecto de la del horizonte real a causa de un efecto de irradiación. (fig.)
- El horizonte se puede examinar también con el filtro más claro en el espejo horizonte para ver si se detecta un escalón en los bordes de la parte iluminada por la Luna (hacia arriba o hacia abajo) y en caso positivo, con el tambor micrométrico se ajusta el horizonte reflejado al nivel del horizonte real; esto nos dará una diferencia (en grados y minutos) entre el falso horizonte y el horizonte real, que se aplicará a la altura sextantal como si fuese una corrección de índice.
- Acto seguido se calcula la observación con y sin corrección por falso horizonte para ver cual de las dos es más compatible con la situación.

Es posible medir la altura de estrellas a la luz de la Luna en algunas ocasiones.
Depende esencialmente de su posición relativa respecto de nuestro satélite.
Se puede hacer una cuidadosa interpretación del horizonte con unos binoculares 7 x 50 por su amplio campo y buena resolución. Con ellos se ve cuando el horizonte aparente son en realidad resplandores de la Luna o cuando es una línea continua, clara y definida que se une con el horizonte oscuro, y por tanto, bueno para tomar una medida.

**Hay que evitar la tentación de mirar a la Luna, aunque sólo sea una rápida ojeada, para evitar la pérdida de adaptación del ojo a la oscuridad.**

También son útiles los filtros más claros para la observación de las estrellas más brillantes y los planetas  - Venus y Sirius en particular. Estos astros brillantes observados sin filtro en según que condiciones meteorológicas pueden presentar un brillo o centelleo irregular como si fuesen faros de auto.
En el caso de Venus sobre todo, un filtro claro elimina el resplandor y ayuda a la observación.

**PRÁCTICAS**

A continuación y de manera orientativa, se sugieren una serie de prácticas a realizar para tener un dominio eficaz del sextante. Pueden no ser las únicas, quizá sería conveniente intentar una práctica avanzada, de medida de distancias lunares o con horizonte artificial, por ejemplo; o bien ser sustituidas por otras, a gusto del consumidor

## PRÁCTICA 1

## AJUSTE DEL SEXTANTE

Se trata de ver los ajustes que necesita mi sextante para solucionar los posibles errores de falta de perpendicularidad, lateral, y de índice.
Estos son los únicos errores que podemos corregir. Se procederá por éste orden, según se explica en el capítulo IV

## PRÁCTICA 2

## EVALUACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ÍNDICE

Se evalúa la corrección de índice por el Sol y de paso el semidiámetro. (ver capítulo V)
Para ello se tomarán series de observaciones, que se anotarán sistemáticamente en una parrilla como la que se indica abajo.
Finalmente se comparará el valor del SD obtenido con el que indica el A. N. en la página diaria para el día de la fecha.
Cálculos de la corrección de índice del sextante por el Sol

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sèrie 1 | $l_1$ = | $l'_1$ = | $E_{1i}$ = | $SD_1$ = | | |
| | $l_2$ = | $l'_2$ = | $E_{2i}$ = | $SD_2$ = | $E_i$ = | SD = |
| | $l_3$ = | $l'_3$ = | $E_{3i}$ = | $SD_3$ = | | |
| Sèrie 2 | $l_1$ = | $l'_1$ = | $E_{1i}$ = | $SD_1$ = | | |
| | $l_2$ = | $l'_2$ = | $E_{2i}$ = | $SD_2$ = | $E_i$ = | SD = |
| | $l_3$ = | $l'_3$ = | $E_{3i}$ = | $SD_3$ = | | |
| Sèrie 3 | $l_1$ = | $l'_1$ = | $E_{1i}$ = | $SD_1$ = | | |
| | $l_2$ = | $l'_2$ = | $E_{2i}$ = | $SD_2$ = | $E_i$ = | SD = |
| | $l_3$ = | $l'_3$ = | $E_{3i}$ = | $SD_3$ = | | |

## PRÁCTICA 3

## ÁNGULOS EN NAVEGACIÓN COSTERA

Esta práctica depende del lugar en que nos encontremos, de los accidentes geográficos de los alrededores... ya sean naturales (cerros, montes, picos...) o artificiales (edificios singulares, campanarios...)
Convendría que se tomasen dos ángulos horizontales consecutivos para poderse situar por arco capaz y también tomar algún ángulo vertical para calcular la distancia.
La situación por ángulos horizontales se puede evaluar con el compás de demoras, tomando tres demoras de aguja.
En el caso ideal, buque sin movimiento, conocimiento del desvío a todos los rumbos, etc. Obtendríamos una precisión al grado.
Si tomamos dos ángulos horizontales con el sextante, obtenemos una precisión mejor que el minuto de grado.
Es preciso escoger los tres puntos a observar de forma adecuada:
Las dos circunferencias se han de cortar bajo un ángulo “lo más recto posible”
Los puntos han de estar “en la misma línea horizontal”. (no ha de ser uno mucho más alto que el otro)

## PRÁCTICA IV

## USO DEL SEXTANTE EN NAVEGACIÓN ASTRONÒMICA

Esta práctica es quizá la más importante, ya que es la más habitual.
Hemos de empezar por prepararla: poner a punto el sextante, escoger los astros a observar, calcular sus alturas a la hora de la observación...
Convendría hacer observaciones al Sol, la Luna y algún otro astro, para practicar las cuatro formas de tomar alturas explicadas en el capítulo IX.
Se procederá también a obtener la altura verdadera a partir de la instrumental, aplicando las correcciones necesarias en cada caso.
Para ello se procederá sistemáticamente, anotando el astro observado, la hora de observación, y las correcciones si es necesario en plantillas.

PLANTILLA PARA EL CÁLCULO DE ALTURAS VERDADERAS DE ASTROS PREVIAMENTE ELEGIDOS

| | | | |
|---|---|---|---|
| Estrella | hora: | Planeta | hora: |
| | $a_i$ | | $a_i$ |
| | $c_i$ | | $c_i$ |
| | $a_o$ | | $a_o$ |
| | $D_p$ | | $D_p$ |
| | $a_a$ | | $a_a$ |
| | R | | R |
| | $a_v$ | | $a_R$ |
| | | | P |
| | | | $a_v$ |
| Sol | hora: | Luna | hora: |
| | $a_i$ | | $a_i$ |
| | $c_i$ | | $c_i$ |
| | $a_o$ | | $a_o$ |
| | $D_p$ | | $D_p$ |
| | $a_a$ | | $a_a$ |
| | SD,R,P | | $P_{HE}$: |

## PRÁCTICA V

## DISTANCIAS ASTRO - ASTRO

PLANTILLA PARA MEDIDA DE DISTANCIAS ASTRO – ASTRO

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Astro 1 (m) | antes | $a_1$ | hora | $H_1$ | limbo |
| | después | $a_2$ | | $H_2$ | |
| Astro 2 (s) | antes | $a_1$ | hora | $H_1$ | limbo |
| | después | $a_2$ | | $H_2$ | |

Distancia astro – astro (hay que tener en cuenta $c_i$ y si es con la Luna o el Sol también SD)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | secuencia | $d_1$ | hora | $H_1$ |
| | | $d_2$ | | $H_2$ |
| | | $d_3$ | | $H_3$ |
| | | $d_4$ | | $H_4$ |
| | | $d_5$ | | $H_5$ |
| | media | $d_i$ | media | $H_i$ |
| media (m) | $a_i$ | | | |
| media (s) | $a_i$ | | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Cálculo (m) | $a_i$ | Cálculo (s) | $a_i$ | |
| | $c_i$ | | $c_i$ | |
| | $a_o$ | | $a_o$ | |
| | $D_p$ | | $D_p$ | $D_p = 1{,}7757\ (e)^{½}$ |
| | $a_a$ | | $a_a$ | |
| | (SD) | | (SD) | SD☾ = 0,2724 PHE(1+sin a/55) |
| | m | | s | SD☉ = A. N. |
| Cálculo (M) | m | Cálculo (S) | s | |
| | R | | R | $R(') = 0{,}97127 \cot a - 0{,}00137 \cot^3 a$ |
| | $m_o$ | | $m_o$ | |
| | P | | P | P☾ = PHE cos a $(1 - \sin^2 l/300)$ |
| | M | | S | P☉ = 0,147 cos a |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Distáncia aparente | $d_i$ | Correcciones | m | M |
| | $c_i$ | | s | S |
| | SD☾ | | m + s | M + S |
| | SD☉ | | | |
| | d | | | D |

$$\cos D = \cos M \cos S \frac{\cos d + \cos (m + s)}{\cos m \cos s} - \cos (M + S)$$

## PRÁCTICA VI

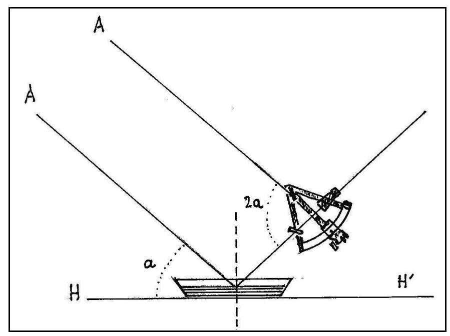
## HORIZONTE ARTIFICIAL

Si desde el lugar de observación no vemos el horizonte, lo podemos sustituir por un "horizonte artificial", también llamado "falso horizonte"
Los exploradores, cartógrafos, topógrafos y aviadores entre otros, hacen uso a menudo del horizonte artificial.

Se han ideado diversos tipos de horizontes artificiales:

Para la práctica usaremos un horizonte de líquido.

Se toma un plato y se llena de un líquido viscoso, (aceite de oliva) en el que se refleje bien el astro a observar normalmente el Sol o la Luna.
Por el anteojo se visa la imagen directa a través del espejo horizonte con el sextante a cero.
Se abre la alidada hasta que aparezca la imagen doblemente reflejada, se llevan a coincidir ambas imágenes y se anota la lectura del sextante.




Es una buena práctica hacer un número impar de lecturas (3, 5 o 7) seguidas y promediarlas con los tiempos para minimizar errores.

Alternativamente podemos proceder como en la práctica II para evaluar el SD del astro observado y compararlo con el dado en el A.N.

En este tipo de horizontes artificiales hay que corregir la altura instrumental solamente de error de índice, refracción y paralaje.

NOTA: Los horizontes artificiales de líquido se pueden usar sólo para alturas de los astros inferiores a 60º porqué con ellos se mide el ángulo que forma la imagen directa con la reflejada por el horizonte (ver fig.) que es el doble de la altura del astro.

**Apéndice I**

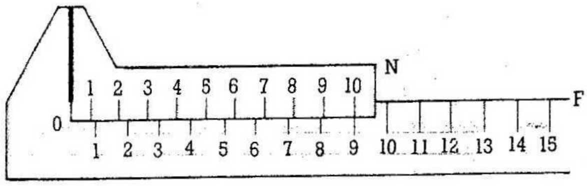
**ESTUDIO DE APARATOS DE MEDIDA LINEALES Y ANGULARES**

1.- Nonio recto

1.1.- nonio decimal

Introducción

Para medir "exactamente" pequeñas longitudes se usa el calibrador o pie de rey.
Consiste en una regla fija milimetrada F, sobre la cual desliza una pequeña regla móvil N (llamada nonio).
Si queremos medir hasta la décima de milímetro, la longitud de 9 divisiones de la regla principal han de ser igual a 10 divisiones del nonio. (fig.1)

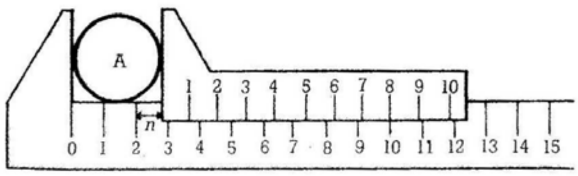



Exposición o desarrollo

En efecto, si la longitud de 9 mm de la regla principal, ocupan 10 divisiones del nonio, la relación entre divisiones de la regla y el nonio es de 9/10.

Así pues, la diferencia entre las longitudes de una división de la regla principal y una del nonio será 1/10 mm, o bien, la diferencia entre 2 divisiones de la regla principal y 2 del nonio será 2/10 mm etc. etc.

Si en una medida, la división de la regla principal es 2 y un poco más, y la división del nonio que coincide con una división de la regle principal es la 8, la lectura será 2,8 (fig.2)




Así, la forma de leer la longitud es la siguiente:

Primero; se lee en la regla principal el número más cercano al cero del nonio

Segundo; se mira en el nonio la graduación **que coincida** con una de la regla principal

La lectura será: El número leído en la regla principal seguido de una coma decimal y el número de la graduación del nonio que coincida con la de la regla principal. Las unidades serán mm.

1.2.- nonio no decimal

Si cogiésemos la longitud de n - 1 divisiones de la regla principal y las dividiésemos en el nonio en n divisiones, entonces, podríamos apreciar n - ésimas de las divisiones de la regla principal

En efecto: Por un razonamiento similar al anterior, si la longitud de n - 1 divisiones de la regla principal las dividimos en n del nonio, la relación entre las divisiones de la regla y del nonio será n - 1/n.

Si las divisiones de la regla principal valen D i les del nonio valen d, entonces:

$$(n - 1)\cdot D = n\cdot d \qquad [1]$$

La diferencia entre las longitudes de una división de la regla principal y una del nonio valdrá:

$$D - d = 1/n\cdot D \qquad [2]$$

Y el nonio mediría n - ésimas de D

¿Qué pasaría si cogiésemos n partes de la regla fija, cada una de valor D, y la misma longitud del nonio el dividiésemos en n + p partes?

Que el valor de cada una de les divisiones del nonio seria: $D \cdot n/(n + p)$ [3]

La diferencia de longitud entre las divisiones de la regla principal y del nonio a, valdrá:

$$a = D - [D \cdot n/(n + p)] = D \cdot [p/(n + p)] \quad [4]$$

y el nonio medirá $p/(n + p)$ de la última división de la regla principal.

2.- Nonio circular

Introducción:

El principio de construcción del nonio circular es el mismo que el del nonio recto.
Se utiliza el nonio circular para apreciar fracciones de grado de arco en aparatos que tienen por misión la medida de ángulos, como son: aparatos topográficos, geodésicos o astronómicos.

Exposición o desarrollo

Si el transportador principal está dividido en grados sexagesimales, podemos obtener minutos de grado recordando que 1º tiene 60'. Así, si dividimos un arco de 59º del transportador principal en 60 partes del nonio, aplicando la fórmula [4], tendremos:

$$a = [60 \cdot 59/60]\ 1^{\circ} = [1/60] \cdot 60' = 1'$$

Si el transportador principal está dividido en medios grados sexagesimales podemos obtener minutos de grado, como ½º son 30', tendremos que dividir un arco de 59 divisiones del transportador principal en 60 del nonio, es decir, 29,5º (o 29º 30') en 60 partes. Con ello obtendremos minutos de grado.

¿Cómo podemos obtener fracciones de minuto?

Este problema ya es más complicado y depende en esencia de la medida mínima (sensibilidad) que se pueda conseguir con el transportador principal y de la fracción de minuto que queramos obtener.

Un ejemplo de un caso real puede aclarar conceptos:

Un familiar mío, hermano de mi abuelo materno era capitán de la Marina Mercante, y como es lógico tenia un sextante, que hoy pertenece a su bisnieta, profesora de matemáticas de secundaria.

Éste sextante tiene la escala principal dividida en fracciones de 20' (3 divisiones per grado!) y la escala del nonio está dividida 20' con marcas cada minuto y cada medio minuto.

Puede apreciar pues, medios minutos es decir 30"

Hay aparatos que poden apreciar hasta fracciones de segundo con ayudas ópticas

**Apéndice II**

## REFRACCIÓN ATMOSFÉRICA

Introducción:

La atmósfera, capa gaseosa que rodea la Tierra, se puede considerar formada per una serie de capas concéntricas de densidad decreciente a medida que nos alejamos de la superficie del planeta hasta llegar al "vacío interplanetario"

Un rayo de luz que proviene de una estrella A, mientras va por el vacío se desplaza en línea recta y a velocidad constante c

Cuando llega al "límite de la atmósfera", se encuentra con un medio que tiene diferentes propiedades ópticas que el vacío y se mueve a otra velocidad v, que depende de les características del medio.

Desde el punto de vista óptico cada medio se caracteriza por su *índice de refracción,* $\mu$ definido por: $\mu = c/v$.

Se dice que una sustancia es más refringente que otra cuando su índice de refracción es mayor.

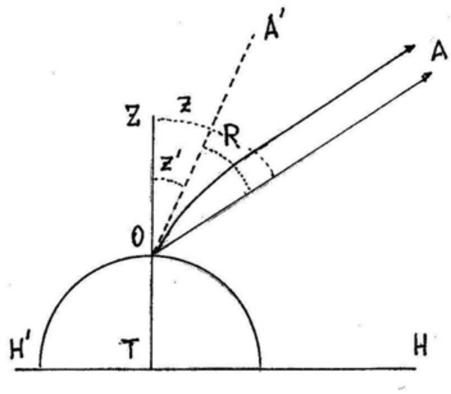
Todos los medios tienen índice de refracción $\mu > 1$. Eso quiere decir que la luz es propaga a través de ellos a una velocidad menor que en el vacío.

Leyes de la refracción:

Cuando la luz incide en la separación de dos medios de diferentes propiedades (p. ej. densidad) se refracta (se desvía) en el mismo plano y ya no sigue una trayectoria recta, sino que se curva siguiendo les leyes de Snell de la refracción:

Un rayo de luz, al pasar de un medio menos denso a otro más denso, se acerca a la normal; el ángulo normal – rayo incidente *i* es mayor que el ángulo normal – rayo refractado *r*, de forma que:

$$\sin i / \sin r = \mu_r/\mu_i \qquad \text{o bien,} \qquad \sin i\ \mu_i = \sin r\ \mu_r$$




En un modelo de Tierra llana, con capas atmosféricas planas horizontales, esta ley se puede aplicar a cada una de las capas atmosféricas, y sustituyendo sucesivamente: $\sin i\ \mu = \sin r_0\ \mu_0$

con $i = z$, $r_0 = z'$ i $\mu = 1$ (índice de refracción del vacío)

por tanto $\sin z = \sin z'\ \mu_0$

De la figura; $z = z' + R$ y sustituyendo: $\sin(z' + R) = \sin z'\ \mu_0$

así: $\sin z' \cos R + \sin R \cos z' = \sin z'\ \mu_0$

Como R es un ángulo pequeño, $\cos R \approx 1$ y $\sin R \approx R$ (en radianes!), tendremos aproximadamente:

$$\sin z' + R \cos z' = \mu_0 \sin z'$$

Dividiendo miembro a miembro por sin z' nos queda finalmente: $\mu_0 - 1 = R \operatorname{cotan} z'$ o bien $\alpha = R \operatorname{cotan} z'$ con $\alpha = \mu_0 - 1$ Es la llamada constante de refracción. En condiciones normales de presión (1013 hPa) y temperatura (0ºC) vale: $\alpha = 60{,}37''$

Entonces: $R = \alpha \tan z' = 60{,}37'' \tan z'$

Si las condiciones de presión y temperatura son diferentes, se ha de corregir la expresión anterior por:

$$R = 60{,}37 \frac{P}{1013} \frac{273{,}16}{273{,}16 + t} \tan z'$$

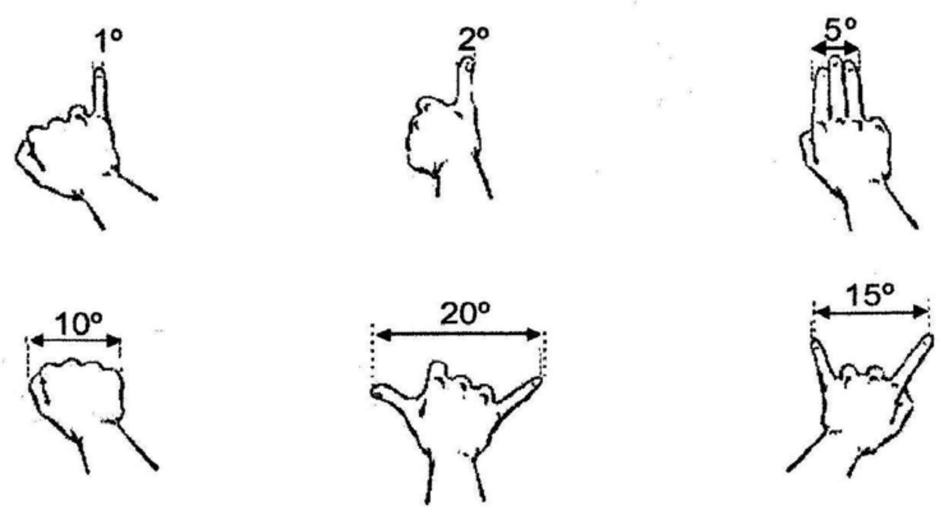
Donde: P/ 1013 es el llamado factor barométrico y 273,16 / (273,16 + t) es el factor termométrico

En un modelo más real de Tierra, esférica, la solución es mucho más laboriosa, se necesitan matemáticas superiores y es necesario hacer aproximaciones sucesivas, para obtener al fin la conocida fórmula de Smart – Laplace $\boxed{R(') = 0{,}97127 \operatorname{cotan}\ a_{ap}(^\circ) - 0{,}00137 \operatorname{cotan}^3\ a_{ap}(^\circ)}$

**Apéndice III**

## MEDIDAS APROXIMADAS DE ÁNGULOS

A pesar que cada persona tiene sus medidas específicas, las proporciones corporales son muy similares para todo el mundo y hay relaciones bastante aproximadas para poder localizar astros e incluso hacer algunas medidas angulares (aproximadas).
Eh ahí  algunas:




**BIBLIOGRAFIA:**

Aparatos Topográficos:  Fco Valdés;  Editorial CEAC 1982 pp 127-132
Física 6º: Constantino Marcos, Jacinto Martinez; Editorial S.M. 1968 pp 5-6
Navegación Astronómica Básica: Conrad Dixon; Editorial Paraninfo 1985
Navegación Astronómica: L Mederos; Editorial Noray 2007
Astronomía: F. Martin Asín; Editorial Paraninfo 1982
Astronomía Náutica y Navegación: J. M. Moreu Curbera; 1982
Capitanes de Yate: J. De Simón Quintana; 2001
Capitán de Yate: R. Gaztelu-Iturri et ald; Editorial del Gobierno Vasco 2000
Capitán de Yate: J. B. Costa; 2001
Tratado de Náutica: I. Fossi; Editorial Dossat 1961
El Sextante: Rosa M. Ros, Javier Moreno; Editorial Equipo Sírius SA 2002
Navegación Costera: P. Bernardos, F. J. Correa; Editorial Parninfo 1990
Navegación Costera: J. Vaquero; Ediciones Pirámide 1996
Reed’s sextant simplified: Reg Pike; Sheridan house 2003
The Sextant Handbook: Adjustment, Repair, Use and History: Bruce A. Bauer; International Marine, P.O. Box 220, Camden, ME 04843, USA
The History of the Sextant; Peter Ifland, talk at Coimbra University 3 October 2000

**WEBGRAFIA:**

http://home.earthlink.net/~nbrass1/cardart.htm
Evolution of the Sextant: Rod Cardoza; 2004
www.jmr.es/pub/00101/0010106.pdf
Aportación de las correcciones astronómicas a la precisión de la situación:
Juan J. Achútegui Rodriguez; 2000
www.rodamedia.com/navastro/formacion
En artículos,
Correcciones a las alturas sextantales: Francesc Bou Fort
En cursos on-line
Distancias lunares: Luís Mederos
Distancias estrella – estrella: Luís Mederos
A Short Guide to Celestial Navigation: Henning Umland 1997-2004 (libro on line)