

Navigational Algorithms

© Andrés Ruiz

Introducción a la Navegación Marítima

La Derrota, la Estima y la Posición

La navegación requiere del marino una serie de conocimientos y habilidades; la ciencia de la navegación se adquiere con el estudio, pero es la conjunción con la experiencia la que hace de la navegación un arte.

La principal tarea del navegante es planear cuidadosamente cada viaje, recopilando previamente información sobre la derrota a seguir: peligros, mareas, corrientes, vientos predominantes. Ya en rumbo determina la posición continuamente, en función de la información disponible, y la compara con la ruta planificada, corrigiéndola y anticipándose a los peligros existentes, ya sean debidos a la cercanía de la costa, como a una meteorología adversa.

Centrándonos en la ciencia, que es lo que se aprende en los libros, la navegación tiene por objeto principal dar solución a los dos problemas mencionados:

1. Determinar la derrota a seguir para navegar de un lugar a otro.
2. Conocer la posición sobre la superficie del mar, en todo instante de tiempo.

En navegación, al surcar los mares desde un punto de salida a otro de destino, se sigue un *proceso* de forma natural, que comprende:

- Planificación de la ruta.
- Pilotaje, siguiendo la derrota previamente establecida.
- Posicionamiento.
- Corrección de la derrota, si es necesario.

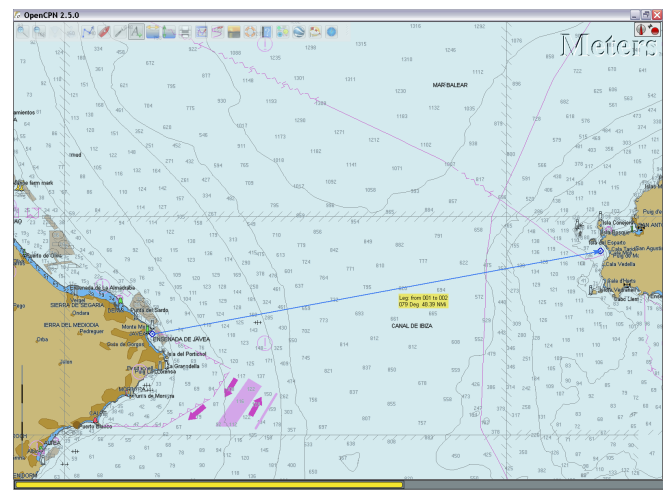
La planificación se efectúa en la carta náutica, lo que permite tener en cuenta toda la información de interés relacionada con la derrota a seguir, esta etapa es clave para evitar imprevistos y garantizar que la travesía pueda efectuarse de forma segura. Una vez en ruta, se sigue la derrota previamente planificada y se obtiene de forma regular la posición verdadera. Si el error entre la derrota real y la planificada inicialmente debe

ser tenido en cuenta, se corrige el rumbo hasta el siguiente *punto de derrota* o *waypoint*, comprobando la ausencia de peligros en este nuevo tramo de la derrota.

La planificación de travesías largas, implica la utilización de derrotas ortodrómicas en vez de loxodrómicas.

Hoy en día con las ayudas que proporciona la navegación electrónica, este proceso es continuo, y el error es corregido de forma inmediata, siendo además independiente de las condiciones de visibilidad, y en gran medida puede ser desarrollado bajo cualquier condición meteorológica.

Antaño, o cuando se prescindía de la navegación electrónica, generalmente en embarcaciones de recreo, la posición se obtiene por estima y se corrige usando la navegación costera o astronómica. En estos casos, y dependiendo en gran medida del tiempo transcurrido desde la última posición verdadera, el error acumulado puede llegar a ser grande.



Planificación de la derrota.

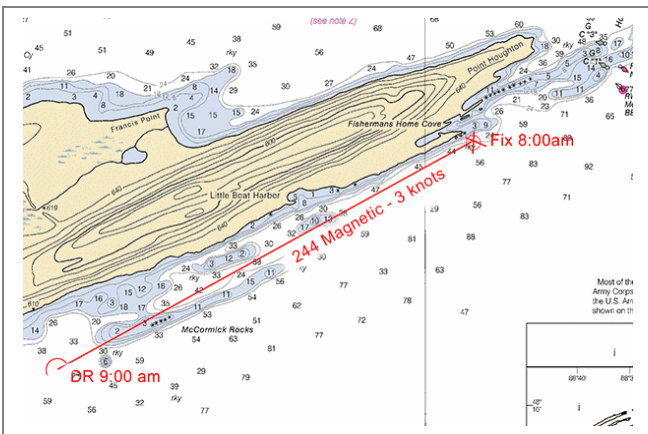
Navegación de Estima

La estima determina la posición actual a partir de una inicial conocida, generalmente una situación verdadera, llevando la distancia navegada sobre el rumbo al que se pilota. Se corrige el efecto del abatimiento debido al viento, y el de la deriva debida a las corrientes. Pero como el conocimiento de

estos fenómenos no es exacto, y además hay que añadir las desviaciones del rumbo debidas al oleaje, errores de gobierno o pilotaje y otros, la posición así obtenida es estimada y no verdadera.

Si bien por el propio significado de la palabra estima, el concepto de este tipo de navegación debería quedar suficientemente claro, en la literatura náutica en español hay un mal entendimiento de lo que supone la práctica de la “estima”, llegando incluso a conceptos totalmente erróneos en los que llega a afirmarse que la estima resuelve el problema inverso al de planificación de la ruta. En cambio en la literatura en inglés el concepto queda claramente definido, refiriéndose al proceso de cálculo como “sailings”, y a la estima como “dead reckoning”.

Generalmente la estima se realiza de forma gráfica sobre la carta náutica, utilizando la información recogida en el cuaderno de bitácora o de navegación, (logbook), pudiéndose también resolver de forma analítica, trasladando a la carta la posición así obtenida.



La estima en la carta.

Sistemas de navegación

El sistema de navegación a elegir esta condicionado por el tipo de embarcación, su equipamiento, las condiciones, y la experiencia de la tripulación. Una de las decisiones más importantes que tiene que hacer el navegante es elegir el mejor método en cada momento, sabiendo que cada uno de ellos tiene sus ventajas y sus desventajas, y

ninguno de ellos es efectivo para la totalidad de las situaciones que se puedan presentar.

Así se emplean los siguientes Sistemas:

- **Navegación Costera.** Este tipo de navegación se da en el mar a la vista de la costa, o dentro de aguas restringidas: canales, radas, bahías, estuarios y ríos, - aguas interiores y mar territorial -. utiliza referencias terrestres notables como faros o torres, para obtener una situación verdadera. Por la cercanía de peligros es indispensable situarse constantemente en base a accidentes geográficos e hidrográficos de posición conocida.
- **Navegación de Estima.** Que da una estimación de la posición.
- **Navegación Astronómica.** La posición se determina en base a la observación de los astros, - el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas -, midiendo su altura respecto del horizonte con un sextante.
- **Navegación Electrónica:**
 - **Radio Navegación.** Usa las ondas electromagnéticas en frecuencia radio para determinar la posición en base a un amplio abanico de dispositivos electrónicos como el radiogoniómetro.
 - **RADAR.** La posición se determina con la distancia y la demora o marcación a objetos de ubicación conocida, generalmente en la costa.
 - **GPS.** Una red de satélites en órbita alrededor de La Tierra, proporcionan la información necesaria por medio de radio señales, para que el receptor pueda determinar la posición de la antena.

El Rumbo

Rumbos: definición y clases

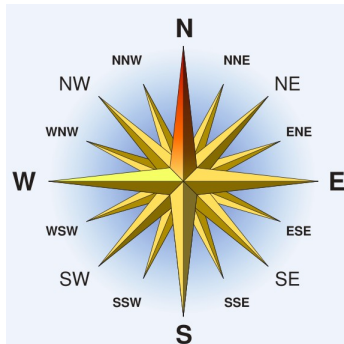
El rumbo es el ángulo horizontal que forma el meridiano que pasa por el móvil, (meridiano del lugar o local), con la trayectoria del mismo. - En navegación marítima el móvil es la embarcación -.

Según sea el meridiano de referencia, se distinguen los siguientes tipos de rumbos:

Rv, Rumbo verdadero, toma como referencia el meridiano geográfico, y se empieza a contar a partir del norte verdadero: Nv. Se mide directamente en la carta náutica.

Rm, Rumbo magnético, toma como referencia el meridiano magnético, y se mide a partir del norte magnético: Nm

Ra, Rumbo de aguja, es el marcado por el compás magnético de abord, que lo hace desde el norte de aguja: Na

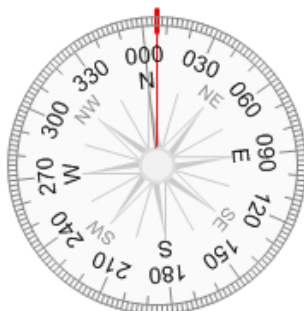


Los principales puntos cardinales en la Rosa de los Vientos.

Sistemas de medición

Existen varias formas de medir los rumbos:

En el **sistema circular**, el rumbo, R, se mide de 0° a 360° en el sentido de las agujas del reloj, es decir desde el meridiano del lugar hacia el este.



El rumbo en el sistema circular.
 $0^\circ \leq R \leq 360^\circ$

En el **sistema cuadrantal**, el rumbo se mide desde el norte o el sur, hacia el este u el oeste. Existe por lo tanto cuatro cuadrantes, y siempre toma un valor entre 0° y 90°.

El **sistema por cuartas**, esta basado en la rosa de los vientos, que divide el horizonte en 32 rumbos.

Cada uno de los cuatro cuadrantes se divide en ocho partes iguales, llamadas cuarta:

$$1 \text{ cuarta} = 11.25^\circ = 11^\circ 15'$$

Conversiones

La relación entre el sistema por cuartas y el circular es:

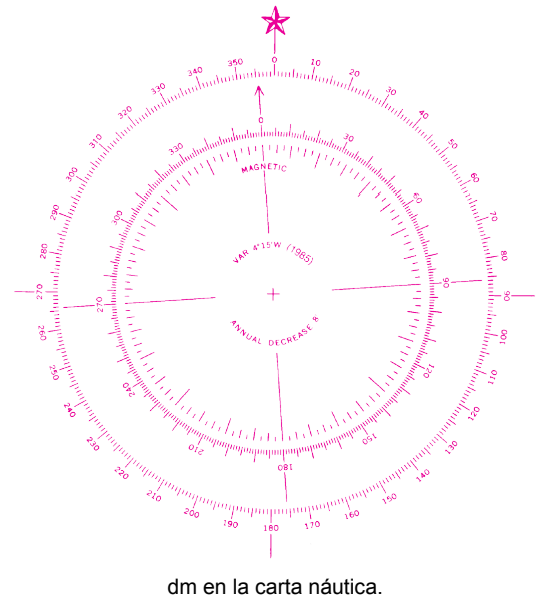
N	Norte	0°
N1/4NE	Norte cuarta al nordeste	11.25
NNE	Nornordeste	22.5
NE1/4N	Nordeste cuarta al norte	33.75
NE	Nordeste	45
NE1/4E	Nordeste cuarta al este	56.25
ENE	Estenordeste	67.5
E1/4NE	Este cuarta al nordeste	78.75
E	Este	90°
E1/4SE	Leste cuarta al sudeste	101.25
ESE	Lesudeste	112.5
SE1/4E	Sudeste cuarta al leste	123.75
SE	Sudeste	135
SE1/4S	Sudeste cuarta al sur	146.25
SSE	Sursudeste	157.5
S1/4SE	Sur cuarta al sudeste	168.75
S	Sur	180°
S1/4SW	Sur cuarta al sudoeste	191.25
SSW	Sursudoeste	202.5
SW1/4S	Sudoeste cuarta al sur	213.75
SW	Sudoeste	225
SW1/4W	Sudoeste cuarta al oeste	236.25
WSW	Oestesudoeste	247.5
W1/4SW	Oeste cuarta al sudoeste	258.75
W	Oeste	270°
W1/4NW	Oeste cuarta al noroeste	281.25
WNW	Oestenoroeste	292.5
NW1/4W	Noroeste cuarta al oeste	303.75
NW	Noroeste	315
NW1/4N	Noroeste cuarta al norte	326.25
NNW	Nornoroeste	337.5
N1/4NW	Norte cuarta al noroeste	348.75

Para la conversión de un rumbo entre el sistema circular y el cuadrantal, se emplea el siguiente criterio:

- x** Rumbo cuadrantal $0^\circ \leq x \leq 90^\circ$
- R** Rumbo circular $0^\circ \leq R \leq 360^\circ$

Cuadrante	Rumbo	Cuadrantal	Circular
1º	$0^\circ \leq R \leq 90^\circ$	N x E	$R = x$
2º	$90^\circ \leq R \leq 180^\circ$	S x E	$R = 180 - x$
3º	$180^\circ \leq R \leq 270^\circ$	S x W	$R = 180 + x$
4º	$270^\circ \leq R \leq 360^\circ$	N x W	$R = 360 - x$

Cuadrante	Rumbo	Circular	Cuadrantal
1º	$0^\circ \leq R \leq 90^\circ$	R	N R E
2º	$90^\circ \leq R \leq 180^\circ$	R	S 180-R E
3º	$180^\circ \leq R \leq 270^\circ$	R	S R-180 W
4º	$270^\circ \leq R \leq 360^\circ$	R	N 360-R W



Por ejemplo:

Circular	Cuadrantal
45º	N45E
160º	S20E
210º	S30W
350º	N10W

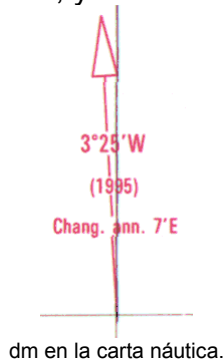
La declinación magnética

La declinación magnética o variación local, es el ángulo que forma el meridiano geográfico y el magnético en un punto de La Tierra. Se cuenta desde el Nv al Nm

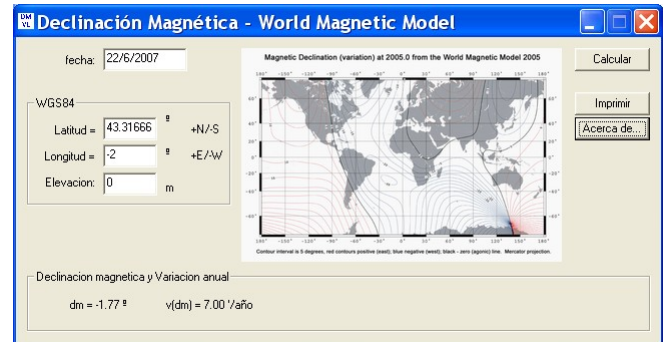
Nm al **E** del Nv \Rightarrow dm **NE (+)**
 Nm al **W** del Nv \Rightarrow dm **NW (-)**

Varia de un lugar a otro, y para una misma situación cambia a lo largo del tiempo.

Las cartas náuticas dan su valor para una fecha determinada, y su variación anual.



Actualmente la declinación magnética se calcula siguiendo un modelo matemático valido para cinco años: **World Magnetic Model**, que además proporciona todos los parámetros del campo magnético terrestre.

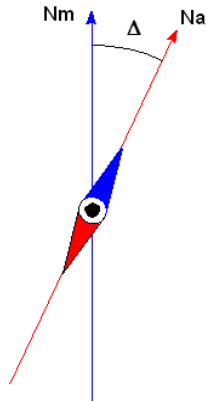


Software para calcular la dm y variación anual según el WMM.

El desvío del compás magnético

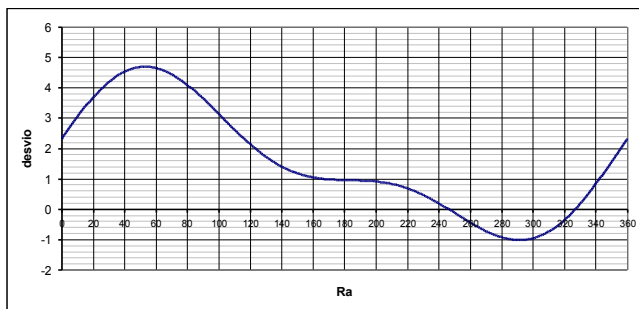
Debido a los campos magnéticos propios del buque, el compás magnético no señala el norte magnético.

El desvío Δ , es el ángulo contado desde el Nm al Na



Na al **E** del Nm $\Rightarrow \Delta$ **(+)**
 Na al **W** del Nm $\Rightarrow \Delta$ **(-)**

La tablilla de desvíos del barco nos proporciona para ciertos valores del rumbo de aguja el valor correspondiente del desvío.



Curva de desvío

Se puede obtener una expresión analítica de la curva de desvío a partir de la tablilla, permitiendo así calcular con precisión el valor del desvío para cualquier rumbo de aguja.

Corrección total

Es el ángulo contado desde el Nv al Na

$$Ct = dm + \Delta$$

Na al E del Nv, ct (+)

Na al W del Nv, ct (-)

De forma directa se puede hallar por diversos métodos, siendo los más utilizados calcular la ct:

- Por la estrella Polar
- Por enfilación y demora simultaneas

Se suelen dar dos efectos mientras se navega, uno debido al viento que actúa sobre la obra muerta de la embarcación, y otro debido a las corrientes que actúan sobre la obra viva.

Efecto del viento: el abatimiento

Cuando se navega en compañía de viento, este desvía a la embarcación de su derrota. El viento empuja de costado al barco, haciéndole variar su velocidad, hecho que acusa la corredera.

El abatimiento es el ángulo formado por la línea proa-popa del barco con la dirección de su movimiento sobre la superficie del mar. Se mide apreciando el ángulo que forma el eje longitudinal de la embarcación con la estela que deja.

Viento por **babor** \Rightarrow Ab a estribor **(+)**
 Viento por **estribor** \Rightarrow Ab a babor **(-)**

Toda embarcación afectada por el viento sigue un rumbo de superficie

$$Rs = Rv + Ab$$

Para seguir la derrota previamente fijada en presencia de viento, habrá que corregir el rumbo cayendo a barlovento un número de grados igual a los del abatimiento provocado sobre la embarcación, de esta forma se hace coincidir el Rs con la derrota deseada.

Efecto de la corriente: la deriva

Las corrientes de agua hacen que el barco siga un rumbo y velocidad efectivos que no acusan el compás ni la corredera.

El rumbo efectivo es el que la embarcación sigue respecto al fondo: Rf, rumbo de fondo, (COG –Course Over Ground-), y se halla por suma vectorial del vector velocidad del barco y el vector de corriente, caracterizado por su intensidad horaria, Ih, y su rumbo, Rc:

- Barco: Rs Vb
- Corriente: Rc, Ih
- Resultante: Rf, Ve

$$\vec{V}_e = \vec{V}_b + \vec{I}h$$

en módulo y dirección queda:

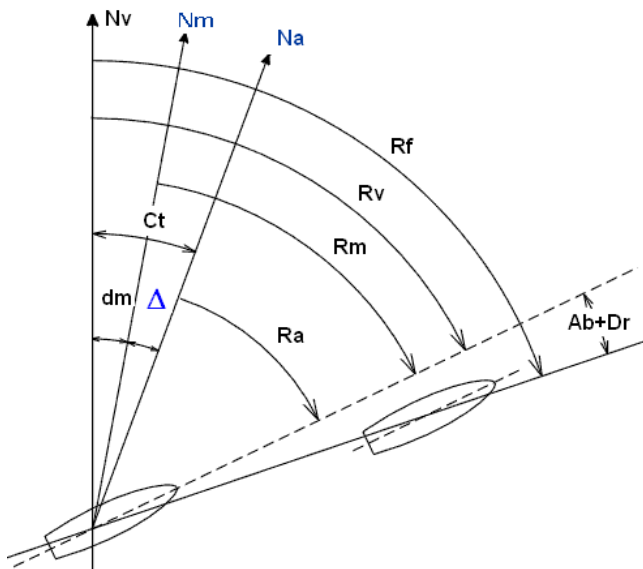
$$(V_e, R_f) = (V_b, R_s) + (Ih, R_c)$$

La deriva, Dr , es el ángulo que sumado al rumbo verdadero, o al de superficie si hay viento, da el rumbo de fondo.

$$R_f = R_v + Ab + Dr$$

En el capítulo dedicado a las corrientes marinas se amplía el tema.

Relaciones



Relación entre los distintos rumbos.

En la carta náutica se obtiene: R_v ó R_f

El compás magnético mide: R_a

$$R_v = R_m + dm$$

$$R_m = R_a + \Delta$$

$$R_v = R_a + ct = R_a + dm + \Delta$$

$$R_s = R_v + Ab$$

$$R_f = R_v + Ab + Dr$$

Medición del rumbo: el compás

El compás magnético da el rumbo de aguja, y es la forma tradicional de medir el rumbo.



Compás magnético.

El *girocompás* basado en el giroscopio proporciona directamente el rumbo verdadero.

Otros tipos son el *Flux Gate* que es un compás electrónico, y el *astrocompás* que obtiene la dirección del norte verdadero al observar un astro conocido, en función de las coordenadas.

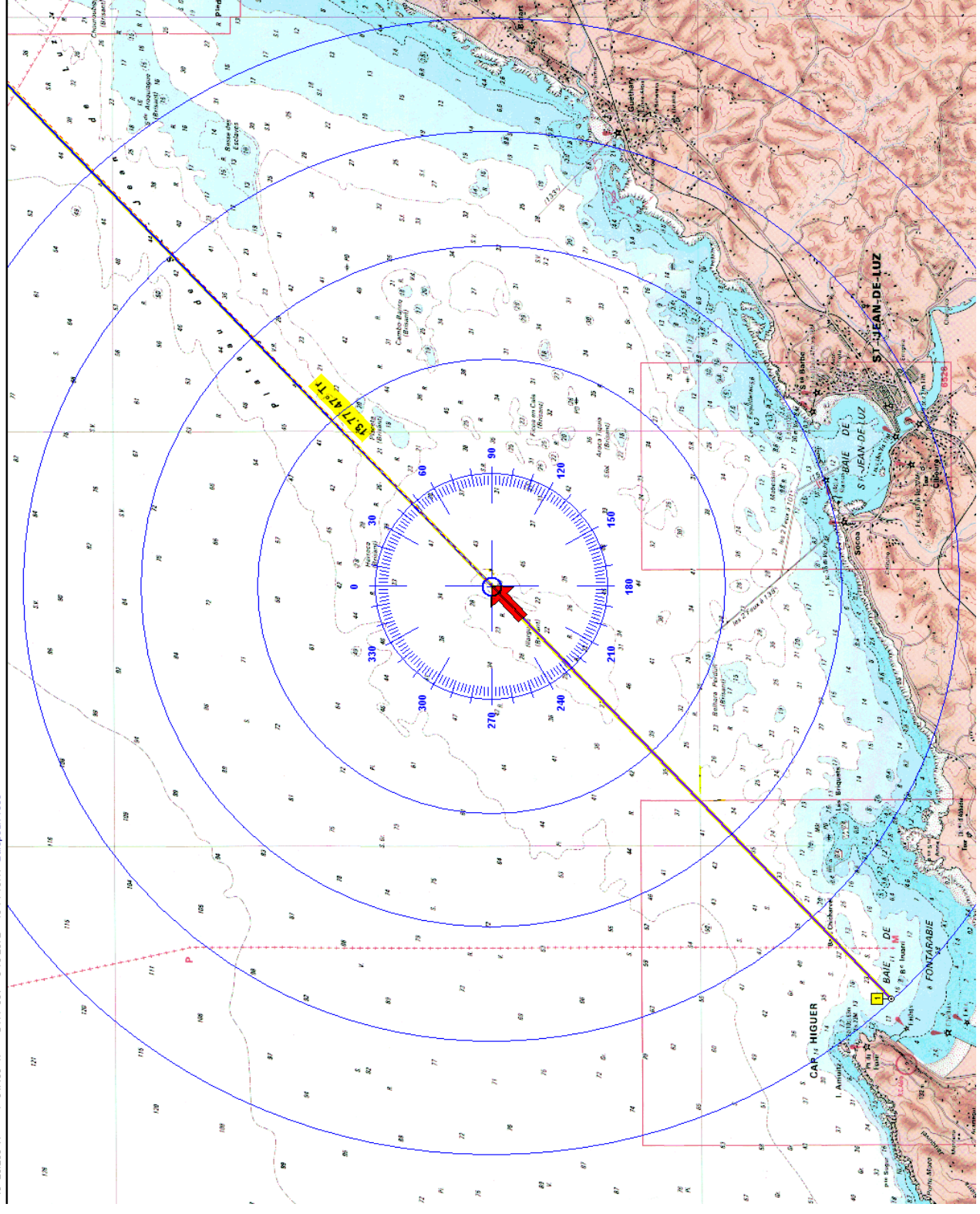
Están apareciendo modernos compases basados en diversas tecnologías:

- *FOG* – Fibre optic Compass
- *GPS compass* - basado en dos antenas GPS

El rumbo en la carta náutica

El rumbo se traza o se mide en la carta náutica utilizando un transportador:

43° 28.256' N 1° 34.498' W UTM 30T 6 15 267E 48 14 187N European 1950



La derrota y el rumbo en la carta náutica.

La Carta náutica

Situación de un punto: Latitud y Longitud

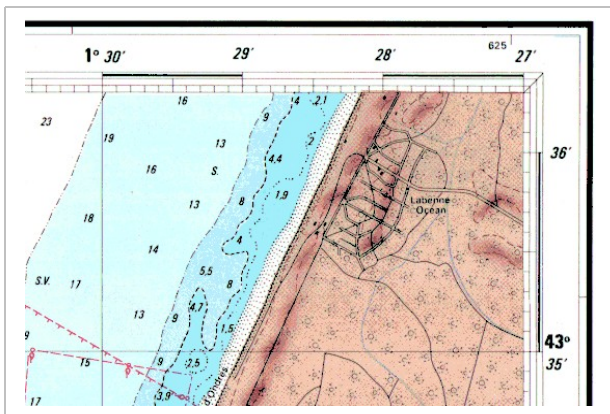
Un punto sobre la superficie de La Tierra queda determinado por dos coordenadas:

Latitud: es el ángulo contado desde el ecuador sobre un meridiano en dirección norte o sur. En la carta se mide en la escala vertical.

$$N/S \quad 0^\circ \leq |B| \leq 90^\circ$$

Longitud: es el ángulo contado desde el meridiano de Greenwich sobre el ecuador en dirección este u oeste. En la carta se mide en la escala horizontal.

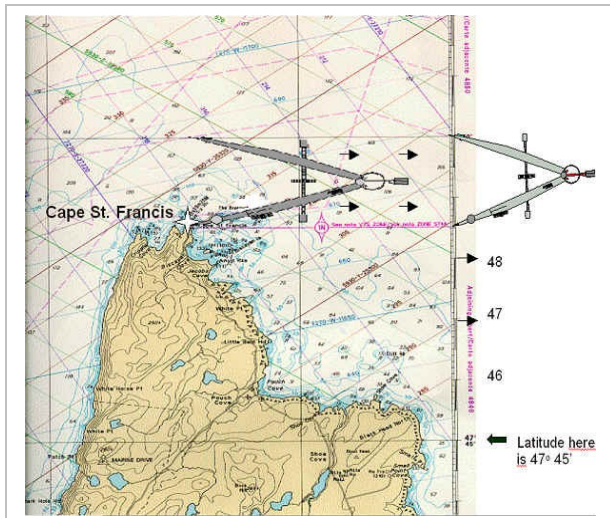
$$E/W \quad 0^\circ \leq |L| \leq 180^\circ$$



Coordenadas: 43°35'N 001°30'W.

Medición de distancias

La distancia se mide en la carta sobre los meridianos, en la escala de las latitudes, en el lugar de la medida, lo más cerca de la latitud media correspondiente a los extremos de la medida.



Medición de distancias en la carta náutica.

- Si la distancia es muy grande se divide en segmentos para ser medidos en el lugar del meridiano de igual latitud que la distancia a medir.
- Si la distancia está sobre un paralelo, se mide en el meridiano de forma que los extremos del compás lo promedien.

Si se precisa mayor precisión, es necesario calcularla por las ecuaciones de loxodrómica. La forma más sencilla en función de la diferencia de latitud y del rumbo es utilizar la ecuación:

$$d = \frac{\Delta B}{\cos R} \text{ para } R \neq E \text{ y } R \neq W$$

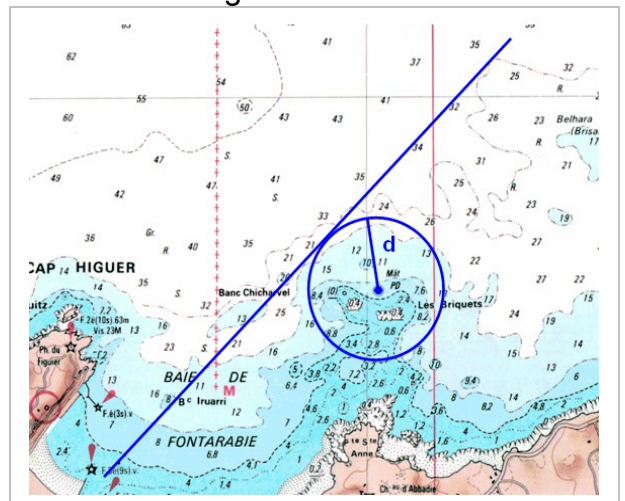
1 milla náutica = 1 minuto de arco de meridiano = 1852 m

Rumbo para pasar a una distancia determinada de la costa o peligro

En determinadas ocasiones es preciso alejarnos en nuestra derrota de puntos peligrosos para la navegación como bajíos, pecios, escollos, etc.

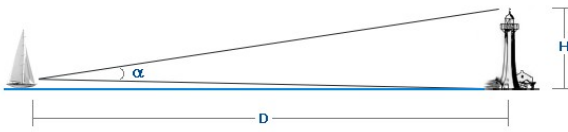
Para ello se traza en la carta una circunferencia con radio la distancia de seguridad elegida y centro el peligro o punto a evitar.

El rumbo se traza desde la posición de la embarcación tangente a esa circunferencia.



Rumbo para evitar los bajos con un margen de seguridad d.

Distancia a un objeto de altura conocida por ángulo vertical



- D = distancia al objeto
- $\alpha = \text{ANG_V}$ (nivel mar, parte superior objeto). Es el ángulo vertical subtendido por el objeto de altura conocida, situado a una distancia determinada dentro del horizonte visible del observador.
- H = altura del objeto sobre el nivel del mar

La solución se basa en resolver el triángulo rectángulo plano de la figura, bajo las siguientes hipótesis simplificatorias:

1. el ojo del observador esta al nivel del mar.
2. la superficie entre el observador y el objeto observado es plana.
3. la refracción atmosférica es despreciable.
4. la línea de agua en el objeto esta bajo la vertical de su extremo superior.

$$D = \frac{H}{\tan \alpha}$$

Errores:

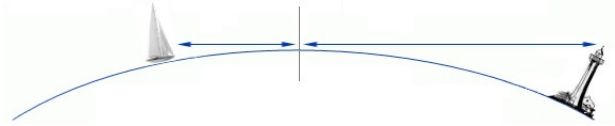
- El error debido a la altura del ojo del observador, no excede el 3% de la distancia para ángulos $\alpha < 20^\circ$ y alturas del ojo menores que 1/3 de H
- El error debido a que la línea de agua no este debajo del extremo superior del objeto observado, no excede del 3% de la distancia para alturas del ojo menores que 1/3 de H, y separaciones entre la línea de agua y la base del objeto menores que 1/10 de D
- Los errores debidos a la curvatura de La Tierra y a la refracción en la atmósfera, son despreciables en los casos de interés práctico.

La medida del ángulo vertical se realiza con el sextante de la siguiente manera:



Distancia a un objeto que aparece en el horizonte

El alcance geográfico es la máxima distancia a la cual la curvatura de La Tierra permite que una luz sea vista, estando el ojo del observador a una altura determinada, sin considerar la intensidad lumínica de la luz. Depende de la altura, tanto de la luz como del ojo.

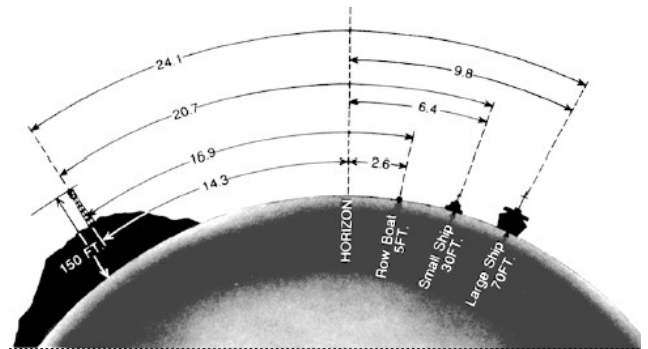


$$d = 2.1174 \cdot (\sqrt{H} + \sqrt{e})$$

- d - alcance geográfico [millas náuticas]
- H - altura de la luz sobre el nivel del mar [m]
- e - altura del ojo del observador sobre el nivel del mar [m]

A la noche se puede obtener la posición verdadera en el instante que la luz de un faro aparece en el horizonte; combinando su demora y su alcance geográfico:

$$s/v = D_{\text{Faro}} \cap d_{\text{Faro}}$$



Alcance RADAR

Viene dada por la ecuación:

$$d = 2.23 \cdot (\sqrt{H} + \sqrt{A})$$

- d – alcance RADAR [millas náuticas]
- H - altura del objeto [m]
- A - altura de la antena del RADAR [m]

Se puede obtener la posición verdadera combinando la demora RADAR y la distancia RADAR simultaneas al mismo objeto que aparece en la pantalla:

$$s/v = D_{\text{RADAR}} \cap d_{\text{RADAR}}$$