

Fundamentos da navegação astronómica.

"E pur si muove" Galileu Galilei

Ângulos, ângulos, ângulos...

Ângulos, como veremos neste capítulo, são a matéria-prima do astrónomo. As posições dos astros e dos objetos sobre a Terra são dadas por ângulos. O sextante é um instrumento que mede ângulos. As distâncias na superfície da Terra podem ser expressas na forma de ângulos.

Os ângulos são medidos em graus, minutos e segundos. **A circunferência completa tem 360° . Um grau corresponde a 60 minutos. Os segundos de grau não são usados na navegação, porque o sextante não tem precisão suficiente para medi-los. A menor unidade de ângulo para o navegador astronómico é o décimo de minuto.**

A milha náutica (=1852 m) é uma medida que foi definida convenientemente de modo a simplificar as conversões entre ângulos e distâncias. **Uma milha náutica corresponde a um arco de um minuto de grau sobre a superfície terrestre. A qualquer momento podemos converter ângulos de graus para milhas e vice-versa.** Ângulos e distâncias são, portanto, equivalentes. Uma exceção são os minutos de longitude, que valem uma milha somente nas proximidades do Equador terrestre.

Uma outra equivalência importante da navegação é entre horas e graus de longitude. Como a Terra faz uma volta de 360° a cada 24 horas, cada hora corresponde a 15° de longitude.

A Terra e a Esfera Celeste

Vamos imaginar por um momento que a Terra está no centro do universo. Imaginemos que em torno da Terra está uma outra esfera maior, centrada no mesmo ponto, onde os astros estão fixados, como se estivessem pintados na sua parede. Esta outra bola é chamada de **Esfera Celeste**.



fig. 1 - A Terra e a Esfera Celeste

Para especificar a nossa posição na Terra, usamos um sistema de coordenadas que consiste em dois ângulos. A **latitude** é a distância em graus medida a partir do Equador terrestre na direção Norte-Sul. A **longitude** é o ângulo no polo entre os meridianos de Greenwich (na Inglaterra) e do ponto considerado (fig. 2).

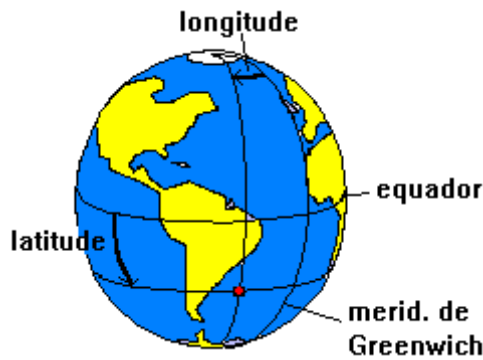


fig.2 - Sistema de coordenadas terrestres

De modo análogo, a posição de um astro na esfera celeste pode ser descrita por dois ângulos. À medida equivalente à latitude do astro na esfera celeste chamamos **declinação**. A declinação é medida na direção Norte-Sul a partir do equador celeste. A medida correspondente à longitude do astro na Esfera Celeste é denominada **Ascensão Reta**, ou AR. A figura 3 mostra o sistema de coordenadas celestes. **Assim, como a longitude é medida a partir de um meridiano arbitrário (Greenwich), a Ascensão Reta é medida a partir do chamado Ponto Vernal (também chamado de primeiro ponto de Áries).**

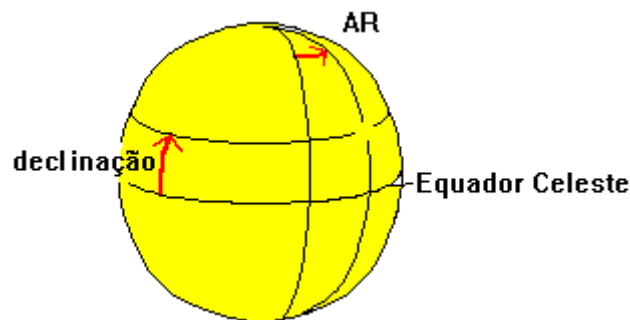


fig.3 - Sistema de coordenadas celestes

O movimento aparente dos astros

As estrelas têm as suas posições quase fixas na Esfera Celeste. O Sol, a Lua e os planetas movem-se ao longo do ano, mas este movimento é lento quando comparado ao movimento da rotação da Terra. Consideremos que os astros têm posições fixas na Esfera Celeste.

Usando ainda o conceito da Terra como centro do universo, vamos imaginar que a Terra esteja parada e que a Esfera Celeste gire em torno dela, completando uma volta a cada 24 horas. O Eixo de rotação da Esfera Celeste passa pelos polos da Terra e da Esfera Celeste. Os equadores da Terra e da Esfera Celeste estão, assim, no mesmo plano (fig. 1).

Os astros fixos na Esfera Celeste também giram em torno da Terra. Os polos celestes, estando no eixo de rotação, ficam parados no céu. Assim, um astro situado próximo de um polo da Esfera Celeste parecerá estar estático quando visto da Terra. É o caso da estrela Polar, que se situa nas proximidades do polo Norte Celeste (sua declinação é de $89^{\circ}05'N$). Ela está sempre na direção Norte. É fácil, portanto, determinar o Norte pela estrela Polar. Infelizmente ela não pode ser vista do hemisfério Sul e não existe nenhuma estrela tão convenientemente posicionada no Polo Sul Celeste.

Determinação da posição pelos astros

Quando em determinado instante traçamos uma reta que liga o centro de um astro ao centro da Terra, o ponto onde esta reta "fura" a superfície da Terra tem o nome de **Posição Geográfica do astro**, ou simplesmente PG (fig.4). Um observador colocado sobre a PG de um astro verá este astro diretamente na vertical, sobre a sua cabeça.

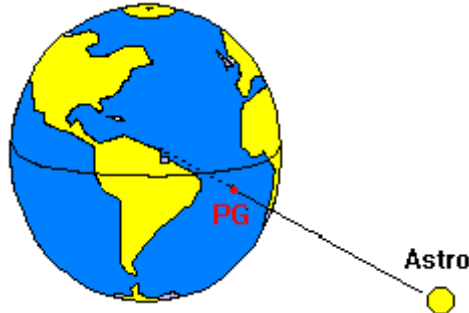


Fig.4 - Posição Geográfica do Astro

Uma vez que o astro gira com a Esfera Celeste, a sua PG move-se na superfície da Terra. A PG do Sol, por exemplo, move-se a uma velocidade de aproximadamente 900 nós - cerca de 1 milha náutica em cada 4 segundos. Os astros mais próximos dos polos movem-se mais lentamente. A PG da estrela Polar move-se a cerca de 14 nós (lentamente), porque está próxima do Polo Norte.

Como os equadores terrestre e celeste estão no mesmo plano, a latitude da PG é igual à declinação do astro. A longitude da PG é chamada de **Ângulo Horário em Greenwich** ou AHG, numa alusão à correspondência entre horas e longitude.

Podemos determinar, com auxílio do Almanaque Náutico, a Posição Geográfica (AHG e declinação) de um astro em qualquer instante. Para isso é de fundamental importância que saibamos o momento exato que nos interessa. Como vimos, 4 segundos de erro podem significar até 1 milha de erro na PG do astro. Por isso é importante ter um relógio com a hora precisa para a navegação.

Um outro ponto importante é o **Zénite**. O Zénite é o ponto da esfera celeste situado na vertical, sobre a posição do navegador. A reta que une o Zénite ao centro da Terra fura a superfície terrestre na posição do navegador, a posição que pretendemos determinar. Temos então as seguintes correspondências entre pontos:

Superfície da Terra	Esfera Celeste
Posição Geográfica do Astro	Centro do Astro
Posição do navegador	Zénite

Na figura abaixo, a PG do astro é representada pela letra X e o Zénite pela letra Z.

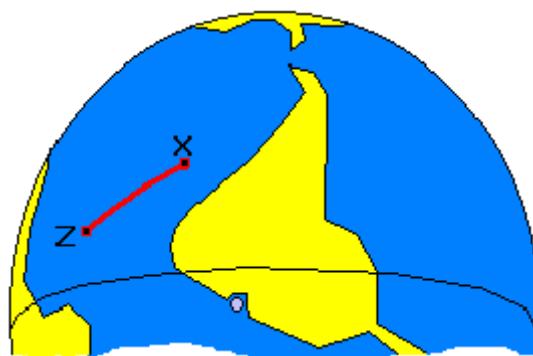


fig. 5 - PG do astro e Zênite

À distância XZ do ponto X (PG do astro) ao ponto Z do navegador dá-se o nome **distância Zenital**. Esta distância pode ser expressa em tanto em milhas como em graus, já que representa um arco sobre a superfície esférica da Terra.

O ângulo horizontal que XZ forma com o norte verdadeiro é chamado **Azimuth (Az) do astro** (fig. 6). Azimuth, assim, é a direção ou rumo em que se encontra a PG do astro.

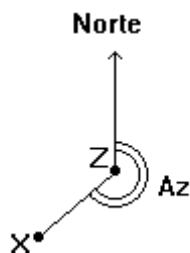


fig. 6 - Azimuth do astro

Os astros estão a grande distância da Terra de modo que os raios de luz provenientes deles que incidem sobre a PG (ponto X) e sobre o navegador (ponto Z) são paralelos. Deste modo, conforme ilustrado na figura 7, podemos concluir que a distância zenital (XZ), medida em graus, é igual ao ângulo que o navegador observa entre o astro e a vertical. Vou repetir. **A distância zenital, medida em graus, é igual ao ângulo que o navegador observa entre o astro e a vertical.**

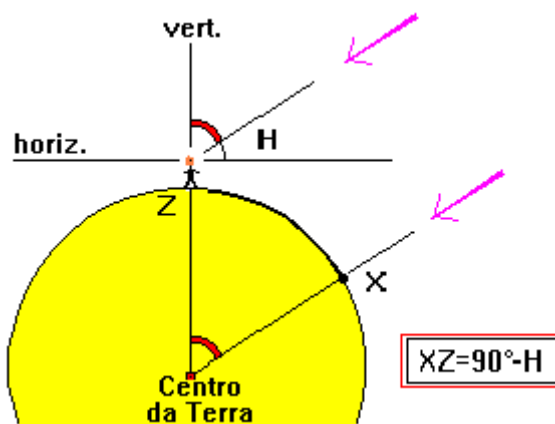


fig.7 - Altura e distância zenital de um astro

É difícil, porém, medir este ângulo dada a dificuldade de se determinar com precisão a direção vertical. É mais fácil medir o ângulo formado entre a horizontal e o astro. Este

importante ângulo para a navegação é denominado **altura (H)** do astro. A altura do astro é tomada com o sextante na vertical, medindo-se o ângulo entre o horizonte e o astro. Ainda pela figura 7, podemos ver que a distância zenital é igual a 90° menos a altura do astro.

Vimos como determinar a distância zenital de um astro usando o sextante. A distância zenital e a PG do astro, contudo, ainda não são suficientes para determinarmos nossa posição. Com esses valores, sabemos somente que nossa posição real está sobre o círculo cujo centro é a PG do astro e o raio é a distância zenital. Este círculo é chamado **círculo de altura**. A figura 8 mostra um círculo de altura. O ponto X é a PG do astro.



fig.8 - Círculo de altura

Qualquer observador posicionado sobre este círculo vê o astro com a mesma altura, só que em Azimutes diferentes. **No exemplo da figura, suponhamos que um navegador posicionado sobre o círculo observe o astro a uma altura de 65° . Como já vimos, distância zenital é $90^\circ - H$, ou 25° . Para determinar a distância zenital em milhas, multiplicamos por 60, pois cada grau equivale a 60 milhas. Assim, a distância zenital do exemplo da figura, que é também o raio do círculo, é de 1500 milhas.**

Se pudéssemos determinar com a bússola a direção exata em que se encontra a PG do astro - o Azimute - poderíamos dizer em que ponto do círculo de altura estamos. Esta determinação, contudo, não é possível com a precisão necessária à navegação. Ainda no exemplo da figura 8, um erro de apenas 3° , normal em leitura de bússolas, corresponde a um erro de 78 milhas na posição!

Tomemos então uma estimativa da nossa posição. Por mais perdidos que estejamos, conseguimos sempre estimar, mais ou menos, a nossa posição. Poderemos, a partir da Posição Geográfica do astro (obtida no Almanaque Náutico) e da distância zenital (calculada com a altura do astro medida com o sextante), determinar o **erro da nossa estimativa na direção** do astro. Este erro pode tanto ser no sentido do astro como no sentido contrário ao astro. É chamado de **Delta**.

Como a Posição Geográfica do astro normalmente está a milhares de milhas da nossa posição, o círculo de altura é extremamente grande e o pequeno pedaço deste círculo que nos interessa - aquele nas proximidades de nossa posição estimada - pode ser considerado uma reta perpendicular ao Azimute do astro. Esta reta é chamada de **Reta de Altura** (fig. 9).

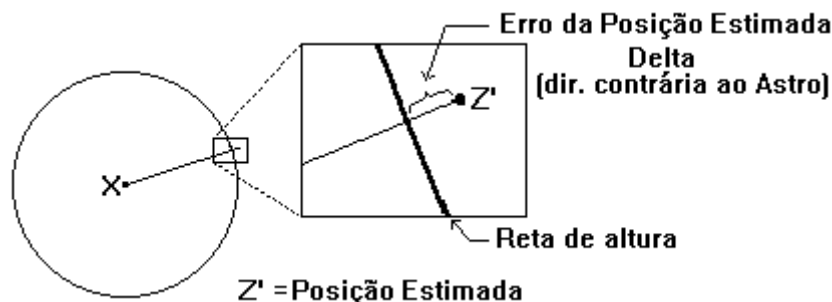


fig. 9 - reta de altura

Conseguimos, a partir da medida da altura de um astro e da nossa posição estimada, traçar na Carta Náutica uma reta de altura. Sabemos que nossa posição real está num ponto ao longo desta reta. Para determinar este ponto deveremos traçar uma segunda reta obtida de forma análoga para um outro astro. O cruzamento das duas será nossa posição real ou **Posição Astronômica**.

Normalmente repetimos o procedimento para um terceiro astro, obtendo outra reta de altura, para nos certificarmos dos resultados. Dada a imprecisão inerente às medidas com o sextante, é provável que as três retas de altura não se cruzem num mesmo ponto, formando um pequeno triângulo. A nossa Posição Astronômica provavelmente estará em algum ponto deste triângulo (fig. 10). Quanto menor o triângulo, melhor. Por defeito assumiremos que a nossa posição astronômica está no centro do triângulo.

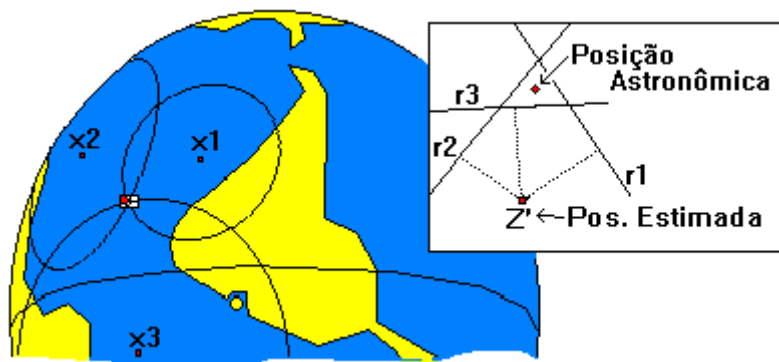


fig. 10 - Triângulo formado pela intersecção de 3 retas de altura

Na figura 10 podemos ver como os círculos de altura de 3 astros determinam as 3 retas de altura r1, r2 e r3.

Na navegação astronômica tradicional, a determinação da reta de altura a partir da altura de um astro envolve a determinação da PG do astro (AHG e Declinação) usando o Almanaque Náutico e a solução por tabelas do triângulo de posição PXZ; formado pelo Polo terrestre (P), a PG do astro (X) e a posição estimada do navegador (Z) (figura 11). Estes dados fornecem a altura calculada e o Azimute do astro. A diferença, em minutos de grau, entre a altura calculada e a altura do astro medida no sextante é a distância em

milhas náuticas entre a reta de altura e a posição estimada - o erro Delta da posição estimada.

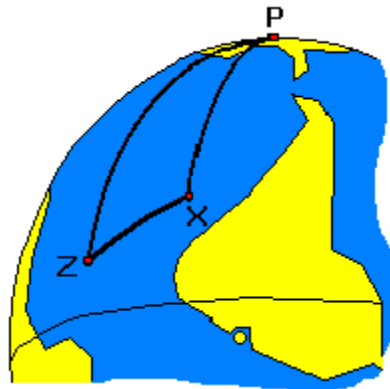


fig. 11 - Triângulo de posição PXZ

O sextante

O sextante é um instrumento para medição de ângulos. A figura 12 mostra esquematicamente um sextante. A **Luneta** está apontada para o **espelho pequeno**, que é fixo no quadro do aparelho. Este espelho tem uma metade espelhada e a outra transparente. Pela parte transparente, o navegador pode avistar o horizonte diretamente. A parte espelhada reflete a imagem que vem do espelho grande. O **espelho grande** é móvel e gira juntamente com o **braço** do sextante. Fazendo isso, variamos o ângulo entre os espelhos pequeno e grande. O astro é avistado através da reflexão no espelho grande. A Altura do astro é medida na **Escala**. Normalmente existe um tambor micrométrico para ajuste fino do ângulo. A leitura é feita tomando-se os graus inteiros na escala e os minutos no tambor micrométrico. Como sabemos, cada minuto da altura corresponde a uma milha e cada grau a 60 milhas.

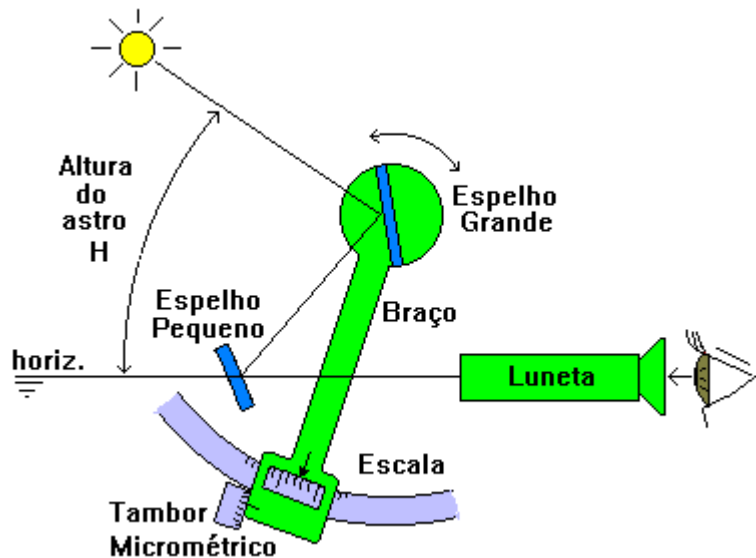


fig. 12 - Sextante

O Sextante conta também com dois jogos de filtros coloridos para suprimir o excesso de luz, principalmente no caso do Sol. **O uso de dois ou mais filtros na frente do espelho**

grande quando observando o Sol é imprescindível para proteção do olho. Graves lesões oculares podem resultar da observação desprotegida do Sol.

Olhando pela luneta e ajustando o ângulo do sextante para a altura de um astro, temos a seguinte imagem:

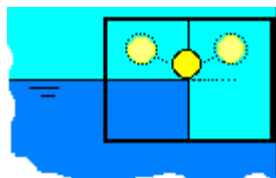


fig. 13 - Imagem do astro no sextante

As leituras com o sextante devem sempre ser tomadas com o aparelho na vertical. Inclinando levemente o aparelho já ajustado verá que a imagem do astro descreve um pequeno arco que toca o horizonte num ponto próximo ao centro do espelho. Nesta situação, o ângulo está ajustado e podemos fazer a leitura da altura do astro na escala.

Antes de usar o valor medido da altura (ou **altura instrumental**) em cálculos, devem ser feitas algumas correções. Essas correções são altura do olho, semi diâmetro do astro, erro instrumental, refração e paralaxe.

Um observador posicionado num lugar alto observará um astro com uma altura maior do que outro ao nível do mar. A altura do olho (ou Dip) corresponde a este erro decorrente da altura do observador. Em pequenos veleiros esta altura não ultrapassa 2 metros e o erro na leitura do sextante é pequeno. Contudo, se o navegador se encontrar na ponte de comando de um grande navio, o erro pode ser considerável. A figura 14 ilustra este desvio de forma exagerada. Normalmente o erro é de poucos minutos de grau.

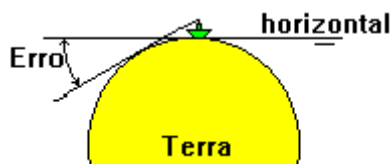


fig. 14 - Erro de leitura do sextante devido à altura do olho do observador(Dip).

O erro instrumental (EI) é devido a uma pequena diferença de paralelismo entre os dois espelhos do sextante quando ajustado para um ângulo de $0^{\circ}00'$. Embora este erro possa ser corrigido através da aferição do sextante, é mais prático descontá-lo da altura instrumental do astro. Para ler o erro instrumental do sextante, ajuste o ângulo na escala para $0^{\circ}00.0'$ e aponte para o horizonte. Na figura 15 da esquerda, vemos a imagem de um erro instrumental. Gire o parafuso micrométrico até que as duas imagens do horizonte formem uma única linha (fig.15 à direita). Leia então o erro instrumental no tambor micrométrico.

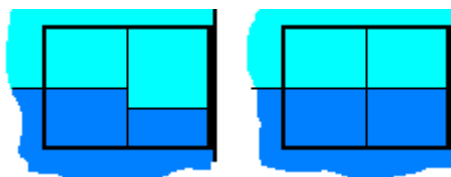


fig. 15 - Erro instrumental do sextante na luneta

O Erro Instrumental pode ser para dentro da escala do aparelho (ângulo positivo) ou para fora (ângulo negativo) conforme ilustrado na figura 16.

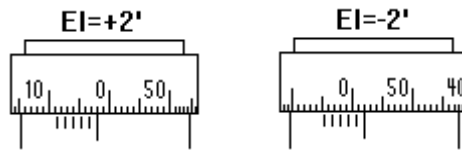


fig. 16 - Sinal do Erro Instrumental

Aferição do sextante

A forma de regular o sextante varia de modelo para modelo. Normalmente regula-se através dos parafusos de suporte dos espelhos. Para verificar a aferição do aparelho, ajuste o ângulo na escala para $0^{\circ}00.0'$ e aponte-o para uma estrela (ou outro objeto distante). Se o sextante estiver aferido, a imagem direta do astro deverá superpor a refletida. Esta condição deverá permanecer mesmo inclinando o sextante de lado.

Exercícios propostos

1- No dia 26 de julho de 1993 com o relógio marcando 13h15m22s hora local, um navegador tira a altura do Sol com o sextante, obtendo o valor instrumental $55^{\circ}58'$. A

posição estimada é $24^{\circ}19'W$, $48^{\circ}19'N$. Calcule a reta de altura sabendo ainda que: fuso horário +2 horas, relógio 1m30s adiantado, altura do olho 2.5 m, erro instrumental 5' para dentro da escala do sextante.

2- Quais os horários dos crepúsculos civis e da passagem meridiana do Sol na posição $29^{\circ}10'W$ $22^{\circ}30'S$, no dia 15/01/94 ? (fuso horário = +2 horas, relógio exato).

3- Com os mesmos dados do exercício 2, no horário do crepúsculo matutino, quais as alturas calculadas e azimutes de Acrux, Júpiter, Antares e Arcturus ?

4- Em 4 de outubro de 1995, após um período sem tirar a posição astronômica, um navegador tira as seguintes leituras no crepúsculo vespertino:

Estrela GMT Altura Instrumental

Mirfak 18h46m00s $19^{\circ}37.5'$

Altair 18h46m35s $47^{\circ}50.0'$

Arcturus 18h47m00s $26^{\circ}44.0'$

A posição pela navegação estimada é $9^{\circ}30'W$ $50^{\circ}11'N$. Fuso horário=0 (usando GMT), relógio 1m12s atrasado, altura do olho 2.0 m, erro instrumental 3' para fora da escala. Qual a posição astronômica e qual o erro da posição estimada ?

5- No dia 10/7/1997, posição estimada $35^{\circ}30.0'W$ $13^{\circ}00.0'S$, um navegador tira a altura do Sol às 8h12m15s (hora local, fuso horário +2 horas) obtendo $18^{\circ}15'$. Navega então por algumas horas a 5.5 nós no rumo $195^{\circ}V$. Às 12h42m15s tira uma segunda altura instrumental do Sol obtendo $54^{\circ}33'$. Qual a posição astronômica no horário da segunda medida, sabendo que: altura do olho 3.0m, erro instrumental 3' para dentro da escala e relógio 30s adiantado ?

6- Estando na posição $45^{\circ}21'W$ $23^{\circ}46'S$ no dia 21 de julho de 2010, um navegador tira a altura de uma estrela brilhante às 18h00m00s horário local obtendo o valor instrumental $75^{\circ}30'$. Sabendo que o azimute aproximado é 330° , que estrela é essa ?

(relógio exato, altura do olho = 2m, Erro instrumental = 0, fuso=3)

7- Qual a distância e o rumo inicial do percurso entre Cabo Frio ($42^{\circ}00'W$ $23^{\circ}02'S$) e a Ilha de Trindade ($29^{\circ}20'W$ $20^{\circ}30'S$) ?

Respostas aos exercícios propostos:

1- Delta=18.5 MN na direção do astro. Azimute = 220° (rumo verdadeiro). Lembre-se que a latitude Norte é negativa.

2- Crepúsculo matutino às 5h01m, crepúsculo vespertino às 19h11m, passagem meridiana 12h06m05s (horários locais).

3- Alturas calculadas às 5h01m local (use o comando Astros Visíveis).

Acrux $H_c=49^{\circ}20.8'$ $A_z=183^{\circ}$ Júpiter $H_c=61^{\circ}14.1'$ $A_z=78^{\circ}$

Antares $H_c=38^{\circ}40.3'$ $A_z=107^{\circ}$ Arcturus $H_c=42^{\circ}30.1'$ $A_z=30^{\circ}$

4- Posição astronômica $10^{\circ}08.1'W$, $49^{\circ}39.8'N$. Erro da posição estimada (usando o comando Calcula Trecho) = 39.7 MN.

5- Use Retas Transporta na reta 1. A posição astronômica às 12h42m15s é $35^{\circ}38.1'W$, $12^{\circ}57.2'S$.

6- Spica (use o comando Astro Qual).

7- 721.7 MN, rumo $80^{\circ}V$.

Bibliografia

Navegação Astronômica, Geraldo L.M. de Barros (Edições Marítimas) - Texto completo e abrangente sobre navegação astronômica e salvatagem. Ideal para quem deseja aprender a navegação astronômica tradicional para obter a carta de capitão amador.

Ocean Yachtmaster - Celestial Navigation, Pat Langley-Price e Philip Ouvry (Adlard Coles Nautical)

Davis Master Sextant - How to find your position with the master sextant - Este pequeno manual que vem com os sextantes Davis ensina a ajustar o sextante e obter a posição pelo método da passagem meridiana. Este método pode ser muito útil em emergências, pela sua simplicidade.

Carta Celeste do Brasil - Ronaldo Rogério de Freitas Mourão (Ed. Francisco Alves) - Carta para identificação das estrelas. Traz os nomes das estrelas mais brilhantes e das constelações.

The Monthly Sky Guide - I. Ridpath, W. Tirion (Cambridge University Press).

Glossário

A seguir estão definidos alguns termos usados neste manual:

Altura do astro (H) - Ângulo vertical formado entre o horizonte e o astro.

Altura calculada (H_c) - Altura calculada do astro na posição estimada.

Altura corrigida (H_{corr}) - Altura resultante da aplicação de correções na Altura instrumental.

Altura instrumental (H_i) - Altura obtida na leitura do sextante, antes das correções.

Ângulo Horário em Greenwich (AHG) - Longitude da Posição Geográfica de um astro.

Ano luz - Medida de distância usada na astronomia. Corresponde à distância percorrida pela luz no vácuo no período de um ano (aproximadamente 9.467.280.000.000 Km). A estrela mais próxima da Terra, Alfa Centauro, fica a 4.3 anos luz. O Sol fica a 8 minutos-luz e a Lua a pouco mais de 1 segundo-luz.

Ascensão Reta (AR) - Ângulo entre o meridiano do ponto vernal e o meridiano do astro, na direção Leste-Oeste. A Ascensão Reta Versa (ARV ou SHA), listada no Almanaque Náutico para as estrelas pode ser calculada pela fórmula $ARV = 360^\circ - AR$ em graus. AR é normalmente expressa em horas.

Azimute do astro (Az) - Ângulo horizontal formado entre o Norte verdadeiro e a direção da Posição Geográfica de um astro. É o rumo verdadeiro da PG do astro.

Crepúsculo civil - Horários antes do nascer e depois do ocaso do Sol, quando este se encontra a uma altura de 6° abaixo do horizonte. São os horários ideais para medida da altura das estrelas e planetas, pois as estrelas e o horizonte estão visíveis ao mesmo tempo.

Correções instrumentais - Correções aplicadas à altura instrumental para obter a altura corrigida. São elas: Erro instrumental, Altura do olho, Refração, Paralaxe da altura e Semidiâmetro do astro.

Declinação (d) - Latitude de um astro na Esfera Celeste.

Distância Zenital - Distância, na superfície da Terra, entre a Posição Geográfica de um astro e o Zênite do observador.

Eclíptica - Trajetória que o Sol, a Lua e os planetas descrevem na Esfera Celeste.

Esfera Celeste - Esfera imaginária que suporta os astros. Esta centrada no centro da Terra e dá uma volta a cada 24 horas.

GMT - (Greenwich Meridian Time) - Horário no meridiano de Greenwich, na Inglaterra.

GPS - (Global Positioning System) - Sistema de navegação por satélites baseado em sinais de rádio sincronizados emitidos por satélites. Na versão civil, dá precisão de 0.1 milhas.

Latitude - Distância, medida em graus, a partir do equador terrestre até o paralelo do observador, na direção Norte-Sul. A latitude pode ser N ou S.

Limbo inferior - Corresponde a parte mais baixa do Sol e da Lua. A leitura do sextante usando o Limbo Inferior corresponde à medida obtida fazendo a parte inferior do astro tocar o horizonte.

Linha de Grande Círculo (LGC) - Linha na superfície da Terra contida em um plano que passa pelo centro da Terra. As LGCs são o caminho mais curto entre dois pontos.

Longitude - Ângulo formado entre o meridiano de Greenwich na Inglaterra e o meridiano do observador, na direção Leste-Oeste. A longitude pode ser E ou W.

Mercator - Tipo de projeção plana usado em cartas náuticas onde os meridianos são paralelos e 1 milha na direção NS = 1 milha na direção WE.

Passagem meridiana - É o horário em que o astro atinge a altura máxima. No caso do Sol, ela ocorre em torno do meio dia. A passagem meridiana é o horário ideal para obtenção da latitude, pois uma reta de altura obtida neste horário é perpendicular ao meridiano do observador (Latitude constante).

Posição Astronômica (PA) - Posição do navegador. É o resultado que pretendemos determinar pela navegação astronômica.

Posição Geográfica de um astro (PG) - Ponto na superfície da Terra determinado pela reta que passa pelo centro da Terra e centro do Astro.

Waypoint - Destino de um trecho de navegação. É caracterizado por um nome e por uma posição.

Zênite (Z) - Ponto na esfera celeste na vertical sobre o observador. É a posição na esfera celeste corresponde à posição astronômica do navegador.