



## NAVEGAÇÃO CELESTIAL EM TEMPOS DE TECNOLOGIA GPS

José Alberto Gonçalves Bastos Filho<sup>1</sup>  
Salmen Chaquip Bukzem<sup>2</sup>

### RESUMO

A navegação celestial, que consiste na utilização de astros celestes para se orientar, foi o método original de navegação desenvolvido pela humanidade. Com o advento da tecnologia GPS e outros sistemas avançados de navegação, muitos passaram a considerar a navegação celestial como antiquada e obsoleta, sem mais utilidade na aviação moderna. A partir dessas premissas, este estudo busca evidenciar, por meio do emprego metodologia qualitativa, de caráter experimental, aplicada e descritiva, a relevância dessa navegação na atualidade, demonstrando que ela proporciona aos pilotos compreensão e consciência situacional ampliada, uma vez que envolve o conhecimento dos astros e constelações como referências de voo visual e procedimentos de verificação cruzada de posição. Além disso, em rotas polares, onde a cobertura GPS é limitada, a navegação celestial pode ser especialmente útil, permitindo que os pilotos determinem sua posição com precisão. Com o advento da Guerra fria, foram necessários avanços tecnológicos que permitissem um processo automático desse tipo de navegação a fim de corrigir automaticamente as imprecisões provocadas pelas aeronaves que percorriam grandes distâncias em alta velocidade. Esses processos de navegação celestial automatizada estão presentes em equipamentos militares e o no uso de *star trackers* em satélites orbitais e estão impulsionando o desenvolvimento de sistemas de navegações mais confiáveis e precisos no campo de estudo aeronáutico. Assim, a navegação astronômica tem um futuro promissor, com o contínuo avanço da tecnologia.

<sup>1</sup> Graduando em Ciências Aeronáuticas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO). E-mail: [ja21sierra.pilot@gmail.com](mailto:ja21sierra.pilot@gmail.com)

<sup>2</sup> Graduado em Desenvolvimento de Sistemas de Informação, Especialista em Docência do Ensino Superior e em Gestão de Segurança da Informação e Comunicações pela Universidade de Brasília (UnB). Coordenador do Curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. E-mail: [salmen@pucgoias.edu.br](mailto:salmen@pucgoias.edu.br)

**Palavras-chave:** Navegação Celestial. Navegação Astronômica. Sextante. GPS. Tecnologia.

## **CELESTIAL NAVIGATION IN TIMES OF GPS TECHNOLOGY**

### **ABSTRACT**

*Celestial navigation, which consists of using celestial stars to guide oneself, was the original method of navigation developed by mankind. With the advent of GPS technology and other advanced navigation systems, many have come to regard celestial navigation as antiquated and obsolete, no longer useful in modern aviation. Based on these assumptions, this study seeks to demonstrate, through the use of a qualitative, experimental, applied and descriptive methodology, the relevance of this navigation today, demonstrating that it provides pilots with an expanded understanding and situational awareness, since it involves knowledge of the stars and constellations as visual flight references and position cross-checking procedures. Also, on polar routes where GPS coverage is limited, celestial navigation can be especially useful, allowing pilots to pinpoint their position accurately. With the advent of the Cold War, technological advances were needed that would allow an automatic process of this type of navigation in order to automatically correct the inaccuracies caused by aircraft that traveled long distances at high speed. These automated celestial navigation processes are present in military equipment and in the use of star trackers on orbital satellites and are driving the development of more reliable and accurate navigation systems in the field of aeronautical study. Thus, astronomical navigation has a promising future, with the continuous advancement of technology.*

**Keywords:** Celestial Navigation. Astronomical Navigation. Sextant. GPS. Technology.

## **1 INTRODUÇÃO**

A navegação celestial, também conhecida como navegação astronômica, tem sido uma necessidade humana ao longo da história, permitindo explorar terras desconhecidas e estabelecer rotas comerciais. Com os avanços tecnológicos, a navegação por satélite, em particular o Sistema de Posicionamento Global (GPS), tornou-se uma ferramenta amplamente utilizada e confiável para determinar a localização e orientação nos processos de navegações mundiais. No entanto, a

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 3, p. 204-237, jun-jul. 2023.

questão de falhas na precisão persiste mesmo com o advento do GPS, especialmente em áreas remotas, onde a cobertura do GPS é limitada, e em tempos de guerra, uma vez que aeronaves em alta velocidade podem apresentar falhas por interferência eletromagnética e a cobertura GPS pode ser prejudicada por ataques cibernéticos.

Diante desse contexto, a problemática central a ser abordada diz respeito à precisão da navegação e à relevância contínua da navegação celestial em tempos de avanços tecnológicos. O objetivo geral deste artigo é mostrar como a navegação celestial é usada na atualidade, destacando suas aplicações práticas. Para alcançar esse objetivo, são objetivos específicos descrever a evolução da navegação astronômica e evidenciar suas vantagens.

Quanto à estrutura, descreve-se inicialmente o histórico da navegação astronômica, explorando a evolução dos instrumentos e técnicas empregadas nessa prática de orientação. Em seguida, busca-se descrever brevemente a tecnologia GPS, analisando suas limitações e comparando-o com a navegação celestial, além de discorrer sobre a automação da navegação celestial para aviônicos e suas aplicações diversas, com destaque para o uso de *star trackers*. Na seção posterior, é descrita a metodologia empregada na pesquisa.

Após, é realizado o estudo de caso para ilustrar a aplicação prática da navegação celestial em um contexto atual, demonstrando sua eficácia e precisão em comparação ao GPS. Para tanto, foi utilizado o simulador de voo *Microsoft Flight Simulator*, um *software* de sincronização de localização Little Navmap e um *software* de Sextante. A seção posterior exibe a coleta dos dados das coordenadas usadas na navegação do estudo de caso e processados esses dados, gerando um gráfico comparativo entre a rota GPS com a Rota de navegação celestial. Após, os resultados são analisados para, enfim, serem tecidas as considerações finais.

A metodologia adotada nesta pesquisa é qualitativa, de caráter experimental e preditivo, aplicada e descritiva, baseada em fontes bibliográficas. A análise preditiva do estudo é detectada, pois, a partir da investigação dos fatos e do acúmulo de experiências, ela indicará qual será o futuro da navegação

celestial. Além disso, entende-se ser o estudo de relevância social, com um processo de acumulação seletiva, em que novos conhecimentos se somam aos anteriores. Ao final, pretende-se evidenciar as vantagens da navegação celestial em termos de precisão e confiabilidade em comparação com o GPS.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Ao olharmos para cima e contemplarmos o céu noturno, somos levados a um passeio pela história cósmica. Se observarmos a estrela mais próxima do sistema Solar, a Alpha Centauri C, sua luz leva cerca de 4,37 anos para chegar na Terra. Isso significa que a luz que estamos vendo agora, quando olhamos para Alpha Centauri, foi emitida pela estrela há cerca de 4,37 anos. Como a velocidade da luz é a mais rápida hoje conhecida, com cerca de 299.792.458 metros por segundo no vácuo, a distância entre a Alpha Centauri e a Terra é medida em anos-luz, que é a distância percorrida pela luz em um ano. Isso posto, quando observamos uma estrela a uma grande distância, estamos, na verdade, vendo a luz que ela emitiu no passado, não a estrela em si, no presente. Isso ocorre porque a luz precisa viajar até nossos olhos, levando tempo para percorrer grandes distâncias (BENNETT *et al.*, 2009).

A prática de olhar para as estrelas não apenas nos conecta com o passado histórico da humanidade, mas também continua a desempenhar um papel fundamental na navegação astronômica moderna. Sobre essa trajetória, discorre-se a seguir.

### 2.1 HISTÓRICO DA NAVEGAÇÃO CELESTIAL

Na perspectiva de um passado histórico, a navegação astronômica remonta a milhares de anos, sendo uma das formas mais antigas de orientação e localização utilizadas pela humanidade. Ao longo da história, diversas civilizações desenvolveram técnicas e instrumentos para auxiliar na navegação baseada nas estrelas e outros corpos celestes. Uma das primeiras referências históricas à

navegação astronômica pode ser encontrada no antigo Egito, por volta de 4.000 a.C. Os egípcios utilizavam as estrelas como guias durante a noite para navegar pelo rio Nilo. Eles observavam a posição das estrelas, como a Estrela Polar, e as utilizavam como pontos de referência para traçar rotas seguras (HOHENKERK; SEIDELMANN, 2020).

Os mesmos autores explicam que após o antigo Egito, no período clássico, a civilização grega contribuiu significativamente para o desenvolvimento da navegação astronômica. Filósofos e astrônomos gregos, como Tales de Mileto e Pitágoras, estudaram as estrelas e a movimentação dos planetas, estabelecendo as bases para a compreensão da geometria esférica e da astronomia.

Após o período clássico, a navegação astronômica, ainda segundo Hohenkerk e Seidelmann (2020), continuou a evoluir. No século II a. C., o astrônomo grego Hiparco desenvolveu o primeiro catálogo estelar, no qual registrou a posição e a magnitude de mais de mil estrelas. Esse catálogo foi utilizado por séculos como referência para a navegação estelar que serviu de base para as Grandes Navegações.

As grandes navegações foram um marco histórico do fim do século XV, época marcada pelo descobrimento das Américas e por estabelecer rotas transoceânicas por meio das viagens de circunavegação (viagens pelo globo terrestre). Essas viagens só foram possíveis graças aos navegantes que dedicaram seus estudos para o desenvolvimento da ciência e da arte de navegar pelas estrelas (OLIVEIRA, 2017).

Dada essa relevância da navegação astronômica como prática primordial de orientação e localização, ela vem sendo aprimorada em detalhes. De acordo com o estudo de Bennett *et al.* (2009), a exploração do universo e o estudo da astronomia desempenham um papel fundamental na compreensão da localização humana no cosmos. Através da investigação dos corpos celestes e dos fenômenos astronômicos, adquirem-se conhecimentos valiosos sobre a natureza do espaço, o funcionamento do universo e a localização da humanidade.

A navegação astronômica também é destacada por Bennett *et al.* (2009) como uma das conquistas mais impressionantes da humanidade, pois que permitiu

– e ainda permite – a exploração dos mares e dos céus. Nesse sentido, eles ainda a compreendem como relevante hoje em dia, mesmo com os avanços da tecnologia moderna, como o GPS.

Logo, a perspectiva histórica nos revela a importância da navegação astronômica, que nos permitiu explorar e entender o universo em que vivemos, e nos incentiva a continuar buscando novos horizontes e descobertas no cosmos.

A navegação astronômica emerge, assim, como uma ferramenta essencial para a exploração e a compreensão do universo em que estamos inseridos e sua evolução, ao longo dos séculos, é permeada pelo desenvolvimento de técnicas e instrumentos cada vez mais sofisticados.

## 2.2 EVOLUÇÃO DOS INSTRUMENTOS

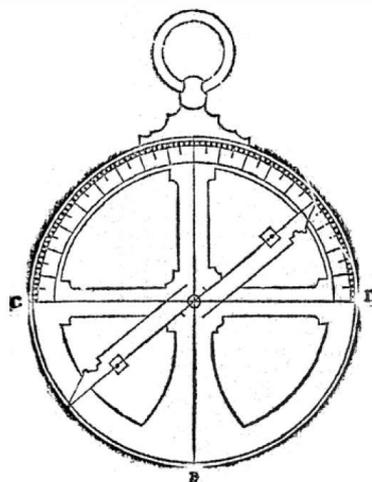
A matemática desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento de instrumentos náuticos, que permitiram aos navegadores determinar sua localização no mar e traçar rotas precisas. Entre os instrumentos náuticos mais importantes desenvolvidos durante as Grandes Navegações estão, além do astrolábio e do quadrante, a bússola e o sextante.

O astrolábio (Figura 1), segundo Gesteira (2014), foi inventado pelos gregos antigos e aperfeiçoado pelos árabes medievais. Ele permitia aos navegadores determinar a altura do sol ou das estrelas acima do horizonte, o que possibilitava a determinação da latitude. Para determinar a latitude, o marinheiro segurava o astrolábio com a mão, apontando o disco para o céu. A estrela desejada era observada através do “alidade”, uma espécie de régua móvel que se deslocava ao longo do limbo (a escala graduada) do astrolábio.

Ao encontrar a posição da estrela desejada, o marinheiro movia o alidade para que sua extremidade inferior coincidisse com o horizonte. Nesse momento, os navegantes podiam ler a altitude da estrela no quadrante do astrolábio, leitura esta que permitia calcular a latitude do navio. Além disso, a precisão do instrumento dependia da habilidade do observador em manuseá-lo, de cálculos

trigonométricos, além das condições climáticas com a qualidade da visibilidade (GESTEIRA, 2014).

Figura 1 – Astrolábio

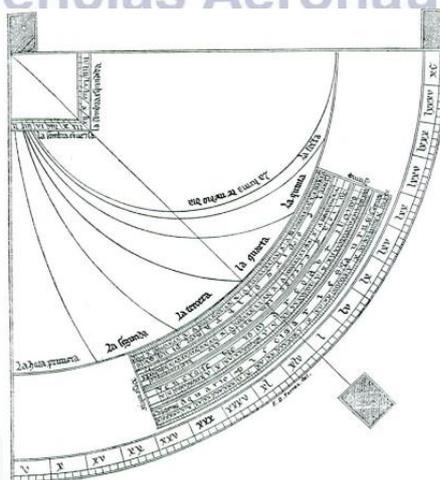


Fonte: Gesteira, 2014.

O quadrante, ilustrado na Figura 2, é um instrumento semelhante ao astrolábio. Utilizado para medir a altura angular do sol ou das estrelas, ele foi fundamental para identificar a posição do navio, especialmente em relação à latitude (GESTEIRA, 2014).

## Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas

Figura 2 – Quadrante



Fonte: Reis, 1998.

Outro instrumento de navegação astronômica bastante utilizado é a bússola, importante para a navegação tanto marítima quanto aérea. Ela permite determinar a direção de forma precisa e confiável, tornando-se essencial para os

navegantes de todos os tempos. A história da bússola remonta a cerca de 200 a.C., na China, onde se acredita que tenha sido inventada. Inicialmente, ela era formada por uma agulha magnetizada flutuando em uma tigela de água, apontando sempre para o norte magnético da Terra. Esse método foi aprimorado ao longo dos séculos, com a introdução de melhorias na agulha e na forma de suspensão, tornando esse instrumento cada vez mais preciso e fácil de usar (GESTEIRA, 2014).

Gesteira (2014) ainda relata que, com o passar dos anos, a bússola ganhou ainda mais importância para os navegantes, especialmente a partir do século XV, com as Grandes Navegações. Na época, os navegantes precisavam atravessar grandes distâncias pelo mar, sem ter muitas vezes qualquer uma referência visual de terra ou estrelas. A bússola (Figura 3) foi então usada para ajudar a determinar a direção do navio e manter o curso desejado.

Figura 3 – Bússola B737



Fonte: Flydeck, 2020.

No entanto, o uso desse instrumento requer um conhecimento específico para interpretar suas leituras e realizar os cálculos necessários para navegação. Os navegantes devem saber, por exemplo, como corrigir os erros de leituras da bússola provocados pela variação magnética, que é a diferença entre o norte magnético e o norte verdadeiro da Terra. Essa variação se dá de acordo com a localização geográfica do navio e pode mudar com o tempo. Dito de outro modo, a bússola é usada em procedimentos de navegação aérea com cálculos de

correção de vento e desvios de declinação magnética para corrigir a orientação do avião. Esses procedimentos são especialmente importantes em voos de longa distância, em que a orientação precisa é fundamental para garantir que o avião chegue ao destino desejado (SANTOS, 2018).

A bússola, ainda de acordo com Santos (2018), é uma das ferramentas mais importantes para a aviação por instrumentos, também conhecida como *Instrument Flight Rules* (IFR), quando as referências visuais são limitadas ou inexistentes. Isto porque, durante o voo, as condições climáticas podem mudar rapidamente e a visibilidade pode ficar extremamente reduzida, tornando quase impossível para os pilotos manterem a orientação correta e voar com precisão. Nesses casos, a bússola é fundamental para manter o avião em curso, indicando a direção do norte magnético, o que permite aos pilotos manterem a orientação correta e seguirem o curso desejado.

Ademais, ela também é usada em conjunto com outros instrumentos, como o horizonte artificial, giroscópio direcional e periscópio sextante, para fornecer uma leitura precisa da posição do avião no espaço. O horizonte artificial indica a posição do avião em relação ao horizonte, enquanto o giroscópio direcional mostra a direção do avião em relação ao norte geográfico. O periscópio sextante é um instrumento de navegação astronômica que mede ângulos dos corpos celestes visíveis no horizonte, conforme retratado na Figura 4. Juntos, esses instrumentos ora citados fornecem aos pilotos informações cruciais para manter o controle do avião durante o voo (SANTOS, 2018).

Já o sextante (Figura 4), criado no século XVIII, é um instrumento de navegação ainda utilizado na navegação astronômica para determinar a posição de navios e aeronaves em relação à linha do horizonte e aos astros celestes (BOWDITCH, 2002).



Figura 4 – Navegador usando o sextante do periscópio da aeronave



Fonte: Rogoway, 2019.

Seu funcionamento é baseado em princípios trigonométricos e astronômicos. Ele possui um arco graduado de 0 a 120 graus, dividido em minutos e segundos de arco, e um espelho que reflete a luz dos astros. Os marinheiros posicionam o sextante de forma que o seu espelho reflète a imagem do astro e a imagem do horizonte. Em seguida, ajustavam o instrumento para que a imagem do astro fique nítida com a do horizonte. O ângulo de elevação do astro é lido no arco graduado do sextante e, a partir daí, pode-se calcular a posição do navio no mar (KARL, 2007).

O cálculo é feito, ainda segundo Karl (2007), a partir da tabela conhecida como almanaque náutico, desenvolvido por Hiparco de Niceia<sup>3</sup>, que fornece as posições dos astros em um determinado momento. Com a altura do astro medida no sextante e a hora do dia, é possível calcular a latitude do navio. A longitude, por sua vez, é controlada por meio de outras técnicas de navegação, como o uso de cronômetros e a observação de marcas geográficas.

Apesar de ser um instrumento antigo, o sextante ainda é muito usado em missões de ciência e da tecnologia, como nas que estudam a estrutura da posição de satélites em órbita com a técnica de triangulação, usada para medir a posição dos satélites em relação às estrelas e ajudar a garantir uma órbita precisa. Trata-se de um instrumento confiável, capaz de determinar com alta precisão a posição

<sup>3</sup> Hiparco de Niceia foi um grande astrônomo Grego que elaborou o primeiro catálogo de estrelas (850 estrelas). Além disso, foi responsável pela criação do astrolábio, criou a escala de magnitude das estrelas baseadas em seus brilhos e determinou a duração do ano terrestre com 365 dias (com erro de apenas 6 horas).

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 3, p. 204-237, jun-jul. 2023.

de um navio, aeronave e satélites, sendo, portanto, sobremodo relevante para o desenvolvimento da humanidade (BOWDITCH, 2002).

Cabe acrescentar que poucas décadas antes do advento do GPS, em 1982, a navegação celeste manual ainda era uma importante habilidade usada nos céus. Aeronaves bastantes modernas foram inclusive projetadas com essa forma de navegação. Por exemplo, o Boeing 747 (datado de 1960 e fabricado até 2023) foi projetado com um porta sextante, e as aeronaves VC-10 (de 1962) e B737 (lançada em 1967) foram projetadas com um periscópio sextante. Além disso, o formato da janela no B737 que se assemelha a uma “sobrancelha” (Figura 5) é devido à navegação celestial, em que o navegante coloca o sextante para a visualização e aplicações de cálculos (KARL, 2007).

Figura 5 – Janela Boeing 737-300



Fonte: Allen, 2018.

E ainda hoje, embora a navegação aérea moderna seja fortemente baseada em sistemas de posicionamento global por satélite, como o GPS, a navegação celestial, hoje automatizada, ainda é considerada uma habilidade valiosa para pilotos em caso de falhas nos sistemas eletrônicos. Além disso, ela pode ser bastante útil para voos em rotas polares, onde a cobertura do GPS é limitada (KARL, 2007).

Em vista do exposto, verifica-se que dos astrolábios aos sistemas de navegação global, a tecnologia transformou a forma como navegamos pelos mares e pelos céus, e a precisão da localização vem, constantemente, sendo

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 3, p. 204-237, jun-jul. 2023.

aprimorada em detalhes, de modo que hoje é possível viajar para lugares nunca explorados com confiança e segurança. Por certo, a tecnologia tornou a navegação mais fácil e eficiente do que nunca, tornando o mundo mais acessível e conectado graças à navegação astronômica.

Mas, no coração dessa evolução, está a coragem dos pioneiros que se aventuraram em águas desconhecidas, guiados apenas pelas estrelas e pela sua determinação. Os personagens atuais, não menos corajosos, se beneficiam de todo esse aparato de instrumentos e técnicas que, juntos, aprimoram a atuação dos navegantes. Sobre o uso conjunto dessas tecnologias, passa-se a discorrer.

### 2.3 NAVEGAÇÃO CELESTIAL E TECNOLOGIA GPS

Com o uso da navegação celestial, cria-se um aumento de consciência situacional do piloto, pois as estrelas e constelações servem de referência e procedimentos *cross check* de posição<sup>4</sup>. Desse modo, a navegação celestial pode ser útil em casos de voo em rotas polares onde a cobertura GPS é limitada. Uma técnica dentro dessa navegação é a *Line of Position* (LOP), um método para determinar a posição da aeronave com base em medidas de distância.

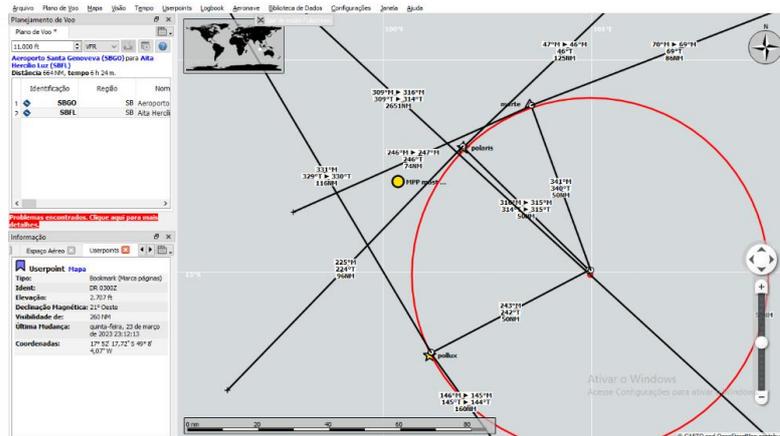
Nas linhas de posição, utilizam-se ângulos a partir de referência de três ou mais estrelas. Com base na interceptação desses ângulos e linhas, é possível calcular a provável posição da aeronave (BOWDITCH, 2002). A Figura 6 ilustra essa triangulação.

Como exemplo de LOP, foi feita uma triangulação entre as estrelas e planetas de referência Marte, Pollux e Polaris. Ao escolher as referências, foi traçada uma perpendicular de cada estrela, criando uma triangulação. Isso posto, a aeronave poderá estar localizada dentro deste triângulo (ponto amarelo). Assim, quanto mais linhas de posição com estrelas e planetas feitas, maior é a precisão e possível posição da aeronave.

---

<sup>4</sup> Os procedimentos '*cross-check* de posição' na aviação são técnicas utilizadas pelos pilotos para verificar a posição atual da aeronave em relação aos parâmetros de navegação, como o plano de voo, os instrumentos de bordo, as referências visuais e as informações de navegação (ANAC, 2014).

Figura 6 – Entendendo a triangulação



Fonte: Little Navmap, 2023.

A navegação celestial utiliza a triangulação através de ângulos de observação de astros para determinar a posição, enquanto o sistema GPS utiliza a trilateração, que envolve o cálculo de distâncias entre satélites. Na trilateração bidimensional do GPS, dois círculos são desenhados com base em distâncias conhecidas, e as interseções desses círculos representam as possíveis localizações do objeto. Para determinar a posição final, é necessário considerar um terceiro raio representando a superfície da Terra, eliminando soluções improváveis. Já na trilateração tridimensional, o GPS leva em conta coordenadas de latitude, longitude e altitude, e adicionando um quarto satélite para maior precisão. No entanto, em áreas sem cobertura satelital, pode ocorrer falha (Figura 7) no sistema de navegação por satélite (BOWDITCH, 2002).

Figura 7 – Falha do GPS primário no ND Airbus



Fonte: Dubois, 2020.

Desse modo, embora o sistema de posicionamento global (GPS) seja amplamente utilizado na aviação, ele está sujeito a interferências, bloqueios de sinal, ataques cibernéticos e falhas. Para contornar essas situações, foi desenvolvida a automação da navegação celestial para aviônicos, oferecendo uma alternativa confiável e precisa. Através do uso do sistema *Star Tracker*, as aeronaves podem determinar continuamente sua posição e orientação. Essa abordagem proporciona segurança e eficiência operacional, garantindo que, em caso de falhas do GPS, a navegação celestial automatizada possa atuar como uma alternativa confiável ou *backup*.

#### 2.4 AUTOMAÇÃO DA NAVEGAÇÃO CELESTIAL PARA AVIÔNICOS E APLICAÇÕES DIVERSAS

A navegação celestial passou por uma evolução significativa ao longo do tempo, indo desde métodos manuais até a prática automatizada. No desenvolvimento das práticas de navegação automatizada, o processo ficou mais fácil e aprimorado, tendo sido introduzidos sistemas de navegação inercial, como giroscópios e acelerômetros, permitindo que as aeronaves determinassem sua posição e orientação de forma mais precisa e contínua (ROGOWAY, 2019).

Anos depois, na época da Guerra Fria, a aeronave americana SR71 *Blackbird* foi equipada com um sistema de navegação celestial automatizado, o *Star Tracker*<sup>5</sup>. Esse sistema foi criado devido à altíssima velocidade que a aeronave tinha, pois as aeronaves rápidas podem sofrer de degradação do sinal e podem resultar em perda temporária do sinal GPS (ANAC, 2012).

---

<sup>5</sup> Os *Stars Trackers* são dispositivos ópticos de alta sensibilidade integrados com sistema de inteligência artificial que capturam imagens do céu noturno e identificam estrelas conhecidas para calcular a altitude do satélite. Através desse equipamento, a navegação astronômica está sendo explorada como uma alternativa estratégica para garantir a operação eficiente e segura de aeronaves em situações críticas. A utilização de sensores avançados e algoritmos de processamento de dados está permitindo a automação desse processo de determinação de posição por meio de astros celestes. Isso oferece aos militares a capacidade de realizar operações de navegação em ambientes desafiadores, onde os sistemas de posicionamento global (GPS) podem estar indisponíveis ou comprometidos. Além disso, no campo de satélites orbitais, os *Stars Trackers* determinam, de modo preciso, a posição e a orientação desses veículos espaciais (NASA, 2016).

Em outros termos, era necessário um sistema que não apresentasse interferências ou falsificações de sinais de posição devido às circunstâncias da Guerra. Esse sistema, embarcado na SR71, acabou sendo conhecido carinhosamente pelas tripulações da *Blackbird* e planejadores de missões de equipe de manutenção como “R2D2”, um droide astromecânico de *Star Wars* (ROGOWAY, 2019). A Figura 8 ilustra a semelhança.

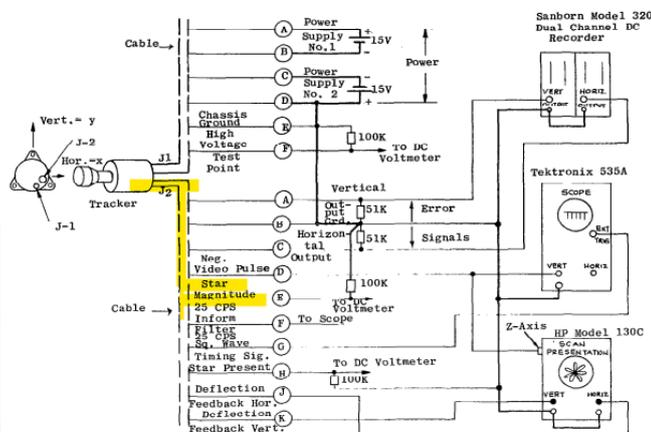
Figura 8 – SR71 e R2D2



Fonte: Rogoway, 2019.

O *Star Tracker* do SR71 funciona por meio de sinais de erro horizontais (eixo x) e verticais (eixo y) monitorados e gravados em um voltímetro de corrente contínua preciso. O eixo x indica a diferença na posição da estrela no plano horizontal e o eixo y indica a diferença na posição da estrela no plano vertical, conforme exibido na Figura 9.

Figura 9 – Funcionamento do *Star Tracker*



Fonte: NASA, 1969.

Esses sinais de erro são usados para orientar o avião em relação à sua posição e altitudes corretas, permitindo que ele navegue com precisão em altas velocidades e altitudes. O sinal de vídeo negativo é monitorado através de um osciloscópio<sup>6</sup>, que pode ser utilizado para intensificar o padrão de varredura a fim de auxiliar na localização da estrela durante os testes. Além disso, o sinal de magnitude da estrela é transmitido através de um canal de telemetria<sup>7</sup>, sincronizando com o tempo e ondas, para indicar se há ou não uma estrela presente. Esses dados são enviados para um banco de dados de inteligência artificial das posições das estrelas e, ao compará-las, temos a localização da aeronave (NASA, 1969).

O *Star Tracker* pode funcionar tanto durante o dia quanto à noite, fornecendo uma referência confiável em qualquer condição. Ademais, ele apresenta um cálculo de magnitude da estrela, uma medida da sua luminosidade aparente ou absoluta observada a partir da Terra.

Ao fazer a navegação astronômica na atmosfera, é utilizada pelo piloto a magnitude aparente, que é a medida da luminosidade da estrela como vista a partir da Terra, enquanto a magnitude absoluta é a medida da luminosidade real da estrela. Além disso, as estrelas mais brilhantes são classificadas como estrelas de primeira magnitude e as mais fracas como estrelas de sexta magnitude (ZEILIK, 1998).

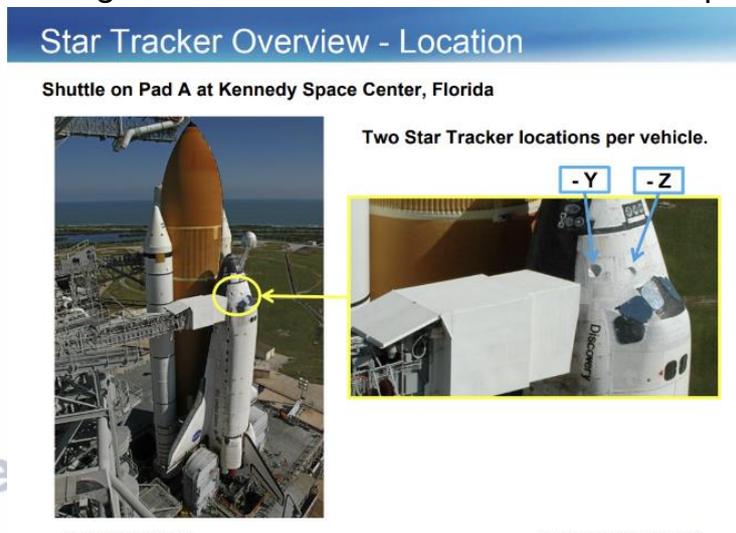
Zeilik (1998) explica que a magnitude aparente tem uma escala logarítmica inversa, ou seja, quanto menor o número da magnitude, maior é a luminosidade aparente da estrela. Ela é medida em uma escala que varia de -26,7 a +6,5, sendo -26,7 a magnitude aparente do Sol e +6,5 a magnitude aparente das estrelas mais fracas visíveis a olho nu. Por exemplo, a estrela Vega tem uma magnitude aparente de +0,03, enquanto a estrela Betelgeuse tem uma magnitude aparente de +0,45. Essas tabelas estão disponíveis no *software* Stellarium 2.0 e catálogo HIPARCCOS.

<sup>6</sup> Instrumento de medição eletrônico que é usado para observar a forma de onda de um sinal elétrico.

<sup>7</sup> Processo de medição e transmissão de informações de um objeto ou sistema à distância. Medição de grandezas físicas, como temperatura, pressão, velocidade, posição, entre outras, e as transmite para um receptor remoto para análise e controle.

Considerando todos esses aspectos fornecidos pela tecnologia de ponta no sistema de navegação celestial, ela foi além das rotas marítimas e aéreas, sendo o único tipo de navegação capaz de fazer voos em ônibus espaciais, visto que ainda não existem satélites com coberturas para o sistema solar inteiro. Assim, o balizamento é feito com as estrelas (NASA, 2010). Desse modo, a navegação celestial, antes vista como uma tecnologia arcaica e antiga, voltou com avançados sistemas em missões de explorações espaciais. A Figura 10 mostra dois *Star Trackers* no ônibus espacial da Boeing, desenvolvido em parceria com a NASA.

Figura 10 – Visão geral do rastreador estelar no ônibus espacial Boeing/NASA



Fonte: NASA, 2010.

Além de explorações espaciais, a navegação celestial é importante para posicionamento e órbitas satelitais. Alguns tipos de satélites que podem ser equipados com *Star trackers* incluem: satélite de observação da terra; satélites de comunicação; satélites de navegação; satélites científicos. Um dos projetos desenvolvidos pela NASA para explorar a aplicação da navegação astronômica por pulsares em missões espaciais com a utilização do Star Tracker é o SEXTANT (*Station Explorer for X-ray Timing and Navigation Technology*) (NASA, 2016).

O SEXTANT utiliza um instrumento chamado *Neutron Star Interior Composition Explorer* (NICER), que é um detector de raios-X acoplado à Estação Espacial Internacional (ISS), junto com um *Star Tracker*. O NICER foi projetado

para estudar a física dos pulsares e, ao mesmo tempo, o projeto SEXTANT aproveita seu potencial para a navegação astronômica (NASA, 2016).

No SEXTANT, o NICER recebe os sinais de raios-X de vários pulsares e mede o tempo de chegada desses pulsos em relação ao tempo universal. Ao comparar as diferenças de tempo de chegada dos pulsos com uma referência precisa de tempo, o sistema pode calcular a posição e a velocidade relativa da espaçonave em relação aos pulsares conhecidos. Ademais, o principal objetivo do projeto SEXTANT é demonstrar a navegação por pulsares em tempo real, com precisão suficiente para permitir que uma espaçonave se localize com relativa independência em relação aos sistemas terrestres de navegação. Isso seria particularmente útil para missões de longa duração no espaço profundo, onde os sinais de GPS não são facilmente acessíveis (WINTERNITZ *et al.*, 2016).

O projeto SEXTANT representa um avanço significativo no campo da navegação astronômica, abrindo possibilidades para explorar o espaço além do alcance dos sistemas tradicionais de navegação. No vasto e imprevisível espaço sideral, a navegação astronômica se destaca como a única maneira confiável de orientação e posicionamento nas futuras explorações espaciais. Enquanto tecnologias avançadas desempenham um papel fundamental pela busca do desconhecido, são as estrelas cintilantes no horizonte cósmico que se tornarão nosso guia mais confiável, levando-nos além das fronteiras da Terra. (WINTERNITZ *et al.*, 2016).

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Para a concretização do estudo, foi selecionada a metodologia de natureza experimental e preditiva, com objetivos exploratórios e procedimentos bibliográfico, documental e de estudo de caso. O método experimental consiste, especialmente, em submeter o objeto de estudo à influência de certas variáveis, em condições controladas e conhecidas pelo investigador, para observar os resultados que a variável produz no objeto (GIL, 2008). A pesquisa é de caráter preditivo, pois, a partir da investigação dos fatos e do acúmulo de experiências,

dirá, a partir do passado e dos estudos atuais, qual será o futuro da navegação celestial.

Já o estudo de caso, segundo Prodanov e Freitas (2013, p. 59), é utilizado,

[...]com o objetivo de conseguir informações e/ou conhecimentos acerca de um problema para o qual procuramos uma resposta, ou de uma hipótese, que queiramos comprovar, ou, ainda, descobrir novos fenômenos ou as relações entre eles. Consiste na observação de fatos e fenômenos tal como ocorrem espontaneamente, na coleta de dados a eles referentes e no registro de variáveis que presumimos relevantes, para analisá-los.

Quanto à pesquisa bibliográfica, ela se volta para o estudo do tema em material publicado especializado no tema, como livros, artigos em revistas e periódicos, enquanto na documental as fontes podem ser reelaboradas conforme o objetivo do estudo. Nesse sentido, além da literatura utilizada para a coleta de dados, a busca avaliou informações contidas no Almanaque Náutico e PUB249 Vol. 1 e Vol. 2. Foram apuradas as ocorrências astronômicas disponibilizadas nesses documentos no dia 28 de maio de 2023, selecionadas para o segmento particular.

No estudo de caso, foi utilizado o simulador de voo *Microsoft Flight Simulator* para a navegação; um *software* de sincronização de localização *Little Navmap* para a triangulação de LOPs e *dead reckoning*; e um *software* que simula um Sextante. Após a realização da rota estipulada, foram gerados dados posteriormente processados em um programa de *software* livre e de código aberto utilizado para criação e visualização de gráficos. Em seguida, os dados foram analisados.

#### **4 RESULTADOS — ESTUDO DE CASO: NAVEGAÇÃO NOTURNA ASTRONÔMICA REALIZADA EM SIMULADOR**

O estudo de caso realizado para esta pesquisa consistiu uma aplicabilidade prática da navegação celeste utilizando um *software* no *Microsoft Flight Simulator* (MSFS) 2020. O objetivo principal foi simular a função básica de um sextante ou octante aerotransportado, reproduzindo ao máximo uma navegação real, sem

pausas<sup>8</sup>, permitindo a prática e aplicação da navegação celeste no ambiente virtual. Essa abordagem visa explorar o potencial e precisão do uso da navegação celeste a comparando com a rota GPS.

#### 4.1 PERFORMANCE DO AVIÃO: PARÂMETROS DA NAVEGAÇÃO SIMULADA E PROCEDIMENTOS

Na pesquisa aplicada, foi desenvolvida uma navegação inicial partindo do aeroporto de Goiânia (SBGO) com destino ao aeroporto de Florianópolis (SBFL). Foi utilizada a aeronave KingAirc90, do simulador virtual *Microsoft Flight Simulator* (MSFS) 2020. A configuração de gráfico para a operação de uma navegação astronômica deverá ser no mínimo a média. O MSFS apresenta as posições dos astros em tempo real, possibilitando cálculos de triangulação, latitude, longitude, DR<sup>9</sup>, GHA<sup>10</sup>, SHA<sup>11</sup>, declinação, entre outros.

A distância de Goiânia (SBGO) para Florianópolis (SBFL) é de 664 milhas náuticas ou 1.221,77 km; rumo 198°T (verdadeiro, não magnético). Nas informações de combustível, foram utilizados 70% da quantidade máxima de capacidade dessa aeronave. O combustível máximo permitido é de 1.638 kg, e foram colocados 1.147

Revista Brasileira de Aviação Civil  
& Ciências Aeronáuticas

<sup>8</sup> Durante a navegação, é importante manter o fluxo contínuo de informações e dados para auxiliar na tomada de decisões e no acompanhamento preciso da posição e rota. Se houver interrupções ou pausas, como parar o tempo do MSFS, isso pode afetar a continuidade do processo de navegação, podendo haver um desalinhamento entre o tempo no simulador e o tempo real, o que pode dificultar a navegação precisa e a correspondência com os eventos astronômicos ou outros aspectos relacionados à navegação celestial. Além disso, o objetivo do estudo de caso é simular ao máximo uma navegação real que não há pausas. Outro fator que merece destaque durante a navegação é a visibilidade: A visibilidade adequada é necessária para observar o horizonte, estrelas, corpos celestes e outros elementos que podem ser usados como pontos de referência para determinar a posição. Se a visibilidade estiver comprometida devido a condições meteorológicas desfavoráveis, como neblina densa, tempestades, nuvens espessas ou escuridão, isso pode dificultar a navegação visual, bem como a utilização de estrelas e outros astros para a navegação celestial (SONNEMAKER, 2012).

<sup>9</sup> *Dead reckoning* é um meio de navegação baseado no conhecimento da direção, velocidade e duração do voo; determinação de uma posição pelo avanço de uma posição anterior, de rumos e distâncias (DUTRA, 1979).

<sup>10</sup> Na navegação celestial, significa *Greenwich Hour Angle* ou Ângulo Horário de Greenwich. É uma medida angular usada para determinar a posição de um objeto celeste em relação ao Observatório Real de Greenwich, em Londres, que é o ponto de referência principal para medições de longitude na Terra (BOWDITCH, 2002).

<sup>11</sup> SHA é a abreviação de "Sideral Hour Angle". É o ângulo horário sideral que representa a posição angular de um astro em relação ao Ponto Vernal, utilizado para determinar a posição precisa da aeronave no momento da observação celeste (BOWDITCH, 2002).

kg – com 404.20 kg em cada tanque principal (esquerdo e direito) e 169.12kg em cada tanque auxiliar (esquerdo e direito). Sobre a carga útil, foram desconsiderados os passageiros e considerados tão somente os pesos do piloto e copiloto, com 77 kg cada um. Para construir o gráfico do centro de gravidade da aeronave, foi considerado como Peso vazio: 4.516 kg; Carga útil: 393 kg; Peso máximo de decolagem: 6.055 kg.

Apesar de essa aeronave ser bem rápida, foi utilizada uma velocidade de cruzeiro de 200 nós. Para este estudo de caso, a aeronave irá voar no *Flight Level* FL200.

Na aplicabilidade, foi utilizado um *software* no MSFS que simula a função básica de um sextante ou octante aerotransportado em sua respectiva navegação. Esse *software* permite a prática da navegação celeste no MSFS tendo como referências o Sol, a Lua, os quatro planetas navegacionais<sup>12</sup> e mais de 50 estrelas. O arquivo de dados (almanaque náutico) é válido para as datas desde março de 1900 até fevereiro de 2100. Isso posto, é possível realizar voos testes com esses dados e utilizá-los em outras áreas de pesquisa, a exemplo dos estudos sobre acidentes aéreos, que possivelmente poderiam ser evitados com o incremento da consciência situacional promovida pela navegação celeste.

O *software* é dotado de dois botões. O botão 1 permite selecionar o próximo corpo celeste a ser filmado (Sol, Lua, quatro planetas e mais de 50 estrelas) em uma lista disponível após clicar. O botão 2 inicia o intervalo de disparo de 2 minutos. Após selecionar o botão 2, quando é feito o disparo do sextante, é necessária uma atenção muito importante ao cronômetro da aeronave. Durante a navegação, foram utilizadas as correções dos efeitos: erro de índice, correção de Coriolis e refração. Erros de paralaxe são desconsiderados. Para que a navegação seja a mais precisa possível, esses itens deverão ser calculados.

As fases, exclusivas da navegação astronômica, realizadas no experimento virtual são descritas a seguir.

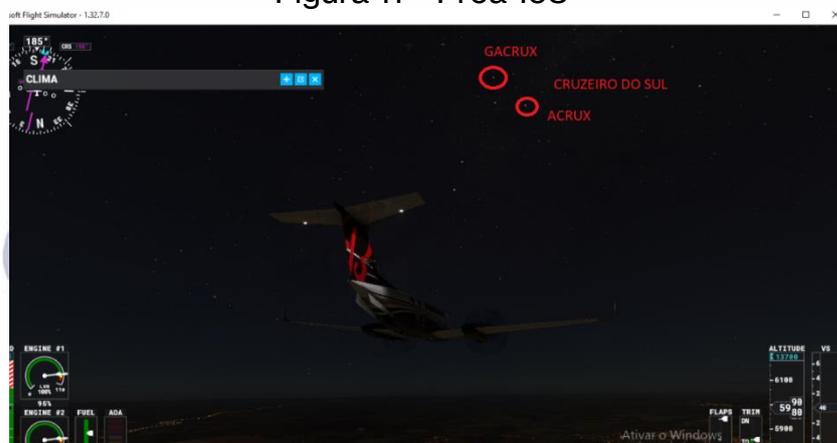
---

<sup>12</sup> Júpiter, Marte, Vênus e Saturno.

### 4.1.1 Procedimentos pré-voos

Foi utilizada a carta da pista *runway 32* SID omni direcional. Após a decolagem e subir 5000 pés de altitude, foi feito um procedimento de verificação cruzada de posição com as estrelas Acrux e Gacrux na constelação do cruzeiro do Sul. Após o procedimento de *cross check* de posição, foi realizada uma curva de média inclinação e seguida a navegação na proa de  $198^\circ$  (Figura 11) em relação ao norte magnético (BOWDITCH, 2002).

Figura 11 – Proa  $198^\circ$



Fonte: Microsoft Corporation (2020).

Revista Brasileira de Aeronáutica  
& Ciências Aeronáuticas  
ISSN 2763-7697

### 4.1.2 Waypoints

Durante a navegação foram feitos cinco *waypoints*, isso é, pontos de referência para fazer os cálculos da navegação celestial (BOWDITCH, 2002).

### 4.1.3 Almanaque náutico e *Pre-computation*

Para fazer os cálculos, foi necessário um catálogo de posições das estrelas e constelações da hora de voo e data sobrevoada no *waypoint*. Ao copiar o valor de Áries, foram colocados na caixa de “body” no documento os cálculos da



#### 4.1.5 Cálculos LHA

Foi pega a longitude para cálculos de Local Hour Angle (LHA). Caso a longitude esteja à Leste, o valor deverá ser somado com o GHA. Caso a longitude esteja à Oeste, o valor deverá ser subtraído. Resultado *Local Hour Angle*:  $217^{\circ}10' - 49^{\circ}10' = 168^{\circ}10' \text{ W}$  (BOWDITCH, 2002).

#### 4.1.6 Pub 249 Vol. 1

Após descobrir o LHA, é preciso identificar quais estrelas utilizar para os cálculos da navegação na latitude que a aeronave sobrevoa. Foi aberto o documento Pub 249 Vol. 1 e, no final da página, é exibida uma tabela de latitude. Ao selecionar a latitude que a aeronave voa no *waypoint* 1,  $18^{\circ}\text{S}$ , é necessário verificar a linha do LHA que cruza com a respectiva latitude. Foram obtidas como resultado três estrelas em asterisco: Arcturus, Acrux e Procyon. Neste caso dessa latitude, seguindo a tabela, também pode-se usar a estrela Sirius. Porém, optou-se por utilizar apenas as três citadas.

Após essas informações, foi calculada a hora de observação de cada estrela. Quatro minutos é um bom intervalo, visto que o aplicativo de sextante, que simula um sextante real, leva cerca de dois minutos para o processamento dos cálculos observacionais (BOWDITCH, 2002).

#### 4.1.7 Cálculos HC e ZN:

Foram colocados os valores do HC da tabela na linha HA HO249 (linha 17) e os valores de ZN na linha de ZN 4, no lado esquerdo do formulário de navegação (Figura 12). Nos cálculos de navegação astronômica, "ZN" refere-se à Zenith Nautical, também conhecida como Distância Zenital. É a distância angular entre a vertical do observador e a posição do astro observado no céu. É medida em graus e é usada para calcular a latitude do observador (BOWDITCH, 2002).

"HC" refere-se à Altitude Corrigida, que é a altitude angular de um astro acima do horizonte corrigida para levar em conta o efeito da refração atmosférica. A refração atmosférica causa uma leve curvatura nos raios de luz dos astros quando estes passam pela atmosfera, resultando em uma elevação aparente dos astros acima de sua posição real. A Altitude Corrigida leva em consideração esse efeito e é usada nos cálculos para determinar a posição do observador (BOWDITCH, 2002).

#### 4.1.8 Cálculos de refração e correção de altitude

Foi calculado o Rel ZN (ZN Relativo) para as duas primeiras estrelas:

$$\text{Rel ZN} = \text{ZN} - \text{TR} \text{ (sendo TR a direção do avião)}$$

$$\text{Rel ZN Arcturus} = 053^\circ - 198^\circ = -145^\circ$$

$$\text{Rel ZN Acrux} = 168^\circ - 198^\circ = -30^\circ$$

Após descobrir o Zenith relativo, foi aberto o documento Pub 249, Vol. 2, (*Sight Reduction Tables*), em sua página 10 (Table 2. *Altitude Correction for ... Body*). Essa tabela dirá a correção de altitude das estrelas. Como a altitude de cruzeiro é 20 000, nível par de voo, a correção a ser colocada no Motion of Body é: -13.

Ainda na Pub 249 Vol. 2 (Table 1. *Altitude Correction ... Observer*), foi pega a velocidade de 250kt com o Zênite relativo para cálculo da linha "*Motion of Observer*":

$$250\text{kt ZN Arcturus } 053 = 10$$

$$250\text{kt ZN Acrux } 168 = 15$$

Somados os valores de *Motion of Body* e *Motion of Observer*, o resultado sai na caixa 1 MIN ADJ. Esses valores são correções para observar uma estrela 4 minutos antes do *waypoint*. Foram multiplicados os valores para corresponder ao intervalo de tempo real entre observação e *waypoint*. Usa-se x2 para conseguir os 8 minutos para a 1ª estrela, e x1 para os 4 minutos da 2ª estrela).

Após abrir o aplicativo *CelNav*, a primeira estrela da observação selecionada teve um resultado *Index Error* de 3°, conforme o software. Após o resultado do sextante virtual, foi feito um cálculo de refração. Este cálculo persiste em olhar o erro de índice do sextante com a coluna correspondente em pés.

Além de cálculo de refração, foi feito um cálculo sobre o efeito de Coriolis. O efeito de Coriolis é um fenômeno físico que ocorre devido à rotação da Terra. Ele influencia o movimento de objetos em movimento relativo, em relação ao referencial terrestre, conforme explica Bowditch (2022). Como a aeronave voa a 250kt e está inserida na Latitude 18° Sul, o valor obtido foi “2”.

#### 4.1.9 *Intercept* = HO<sup>14</sup> - HC<sup>15</sup>

Se o resultado subtração entre o HO-HC for positivo, ele será colocado na caixa *TO*. Se negativo, será inserido na caixa *AWAY*. Ho: O ângulo horário observado (Ho) é o ângulo entre o plano meridiano do observador (um plano vertical que passa pelo Norte, pelo Zenite e pelo Sul) e o círculo horário do corpo celeste. Ele é medido a partir do Norte, no sentido horário, variando de 0° a 360°. O Ho é usado para determinar a posição angular do corpo celeste no momento da observação (BOWDITCH, 2002). Já o ângulo horário calculado (Hc) é o ângulo horário teoricamente previsto para o corpo celeste com base em cálculos matemáticos e modelos astronômicos. O Hc é calculado usando dados como a data, a hora e a posição geográfica do observador (Tabela 1).

<sup>14</sup> O ângulo horário observado (Ho) é o ângulo entre o plano meridiano do observador (um plano vertical que passa pelo Norte, pelo Zenite e pelo Sul) e o círculo horário do corpo celeste. O ângulo horário é medido a partir do Norte, no sentido horário, variando de 0° a 360°. Ho é usado para determinar a posição angular do corpo celeste no momento da observação (BOWDITCH, 2002).

<sup>15</sup> O ângulo horário calculado (Hc) é o ângulo horário teoricamente previsto para o corpo celeste com base em cálculos matemáticos e modelos astronômicos. O Hc é calculado usando dados como a data, a hora e a posição geográfica do observador. É uma estimativa da posição angular do corpo celeste em um determinado momento (BOWDITCH, 2002).

Tabela 1 – Distâncias angulares geradas no sextante virtual

Estrelas	HO	HC	HO - HC
Arcturus (awy)	31° 24'	31°27'	00°03'
Acrux	42° 51'	42°57'	00°06'
Procyon (awy)	32°42'	32°54'	00° 12'

Fonte: elaborada pelos autores a partir dos resultados originários da pesquisa (gerados pelo MSFS), 2023.

Trata-se de uma estimativa da posição angular do corpo celeste em um determinado momento (BOWDITCH, 2002).

#### 4.1.10 Little Navmap

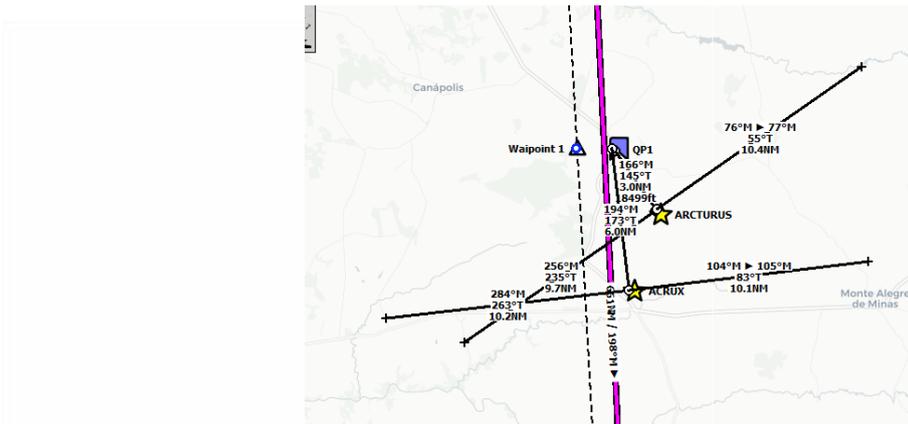
No *Little Navmap*, software de sincronização de localização integrado no MSFS, foi desenhada a triangulação das estrelas. Partindo da posição assumida, na direção do Zênite de Arcturus na proa 145°, foram traçadas duas linhas perpendiculares (55°T, 235°T).

Ao repetir esse processo para as duas estrelas seguintes, o centro do triângulo resultante das 2 ou 3 LOPs é a suposta posição da aeronave (BOWDITCH, 2002). Essa triangulação é exposta na Figura 13, a seguir, que compõe a coleta de dados da pesquisa.

ISSN 2763-7697

#### 4.2 COLETA DE DADOS

A Figura 13 exhibe a linha “rosa” representa a rota GPS, enquanto a linha tracejada representa a rota feita por navegação celestial”. Foram feitos cálculos de duas estrelas – Arcturus e Acrux –, estando neles presentes duas linhas de posição *LOPs*.

Figura 13 – Triangulação com *Line Of Position LOP*

Fonte: resultados originários da pesquisa (gerados no *Little Navmap*), 2023.

Dentro do respectivo triângulo, está a aeronave na sua posição assumida, podendo concluir que a navegação celestial é muito precisa se fizer maneira correta.

A Tabela 1 mostra essa sequência de medições e cálculos realizados durante a navegação, com o objetivo de obter e registrar as coordenadas geográficas precisas de cada ponto de passagem (*waypoints*) para a criação do gráfico comparativo, exibido na Figura 14 mais adiante. Esses dados foram coletados do *software Little Navmap* e indicam, além dos pontos de passagem, os eventos correspondentes ao "tiro" do sextante a cada ponto; as coordenadas em graus, minutos e segundos (GMS) dos *waypoints* transformados em coordenadas em graus decimais (GD).

Esses dados são importantes para monitorar a posição da embarcação ou aeronave durante a viagem e para avaliar a precisão e eficácia da navegação celestial utilizada. A Tabela 2 sintetiza os dados encontrados.

Tabela 2 – *Waypoints*: coordenadas e eventos associados

Waypoint	Evento	WP coordenadas GMS	Coordenadas GD	CELNAV GMS	CELNAV GD
1	Shoot 1	18° 45' 55,82" S 49° 5' 58,03" W	49.09945 - 18.76551	18° 51' 27,21" S 49° 5' 41,65" W	18.8575° -49.0947 °
2	Shoot 2	20° 53' 31,83" S 48° 59' 1,51" W	-48.98375 - 20.89218	20° 53' 31,25" S 48° 58' 30,61"W	-20.89194 ° -48.975°
3	Shoot 3	23° 2' 12,37" S 48° 51' 11,85" W	-48.85329 - 23.03677	23° 1' 6,97" S 48° 51' 8,14" W	-26.019166 ° -48.85222 °
4	Shoot 4	25° 10' 3,58" S 48° 43' 38,01" W	-48.72723 - 25.16766	25° 10' 48,32" S 48° 43' 34,07"W	-25.18° -48.72611 °
5	Shoot 5	27° 38' 28,54" S 48° 33' 18,89" W	-48.55525, - 27.64126	27° 37' 48,57" S 48° 34' 44,46"W	-27.63° -48.57888°

Fonte: elaborada pelo autor a partir dos resultados originários da pesquisa (gerados no Little Navmap), 2023.

#### 4.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados gerados foram processados em um programa de *software* livre e de código aberto utilizado para criação e visualização de gráficos denominado GNUPLOT (UFRGS, 2015). O comando "*plot*" é usado no GNUPLOT para criar gráficos bidimensionais. Os dados gerados foram processados em um programa de *software* livre e de código aberto utilizado para criação e visualização de gráficos.

O exemplo dado a seguir, "*plot "1.txt" with lines*", indica que o arquivo de dados "1.txt" será plotado no gráfico, utilizando linhas para conectar os pontos. No caso específico dos eixos, o eixo X representa a longitude em graus decimais (GD) e o eixo Y representa a latitude em graus decimais. Essas informações são úteis para identificar a posição geográfica dos pontos no gráfico. A resultante dos 5 *waypoints* da rota gerou duas linhas: uma representa a rota GPS, enquanto a outra representa a rota de navegação celestial. O gráfico e as linhas geradas são exibidos na Figura 14, apresentada após os parâmetros a seguir.

Exemplo de gráfico feito no GNUPLOT

```
gnuplot> plot "1.txt" with lines
```

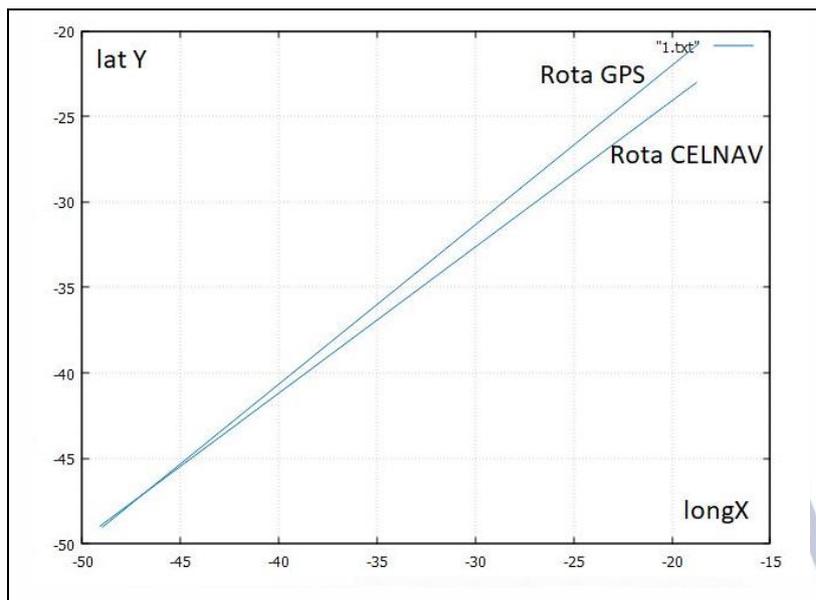
gnuplot> <sup>16</sup>plot "1.txt" with line and points

comando para gráfico gnuplot

Eixo X: Longitude em GD

Eixo Y: Latitude em GD

Figura 14 – Gráfico GNUPLOT apresentando a rota GPS (linha maior) e a rota CELNAV (linha menor)



Fonte: resultados originários da pesquisa (gerados no Gnuplot), 2023.

#### 4.4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Após a coleta de dados com as coordenadas GMS transformadas em GD (coordenadas decimais), foi feito um gráfico com dois eixos. O eixo horizontal representa a longitude, enquanto o eixo vertical representa a latitude. Além disso, após a coleta de cinco *waypoints* de cada rota, foi possível criar duas linhas. Como o gráfico (Figura 14) mostra, a precisão da rota de navegação astronômica – expressa em arcos de minutos<sup>18</sup> – é muito precisa se comparada à rota GPS.

<sup>16</sup> *Plot*: comando utilizado para criar gráficos.

<sup>17</sup> "1.txt" coordenadas convertidas para GD.

<sup>18</sup> Isso significa que a diferença entre as duas rotas é expressa em termos de minutos de arco, onde um grau representa 60 milhas náuticas e, deste modo, os minutos são representados pela divisão de 60/x. Por exemplo 6 minutos = 6 milhas náuticas (BOWDITCH, 2002).

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 3, p. 204-237, jun-jul. 2023.

A discrepância angular presente na diferença das coordenadas da Rota GPS com a rota CELNAV foi uma maneira de quantificar a precisão na navegação astronômica. Neste estudo de caso, nota-se uma concordância entre as rotas e a proximidade entre elas, conforme Figura 16, o que fornece uma indicação da acurácia da navegação celestial CELNAV, tão precisa quanto o GPS.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A navegação celestial tem desempenhado um papel fundamental na história da aviação. Conquanto a orientação por GPS tenha se tornado ferramenta indispensável na navegação moderna, a importância da navegação astronômica não pode ser subestimada, especialmente em contextos da aviação, das órbitas satelitais e da exploração espacial.

No campo da aviação, a navegação astronômica tem sido uma fonte confiável de informações para os pilotos, permitindo-lhes determinar com precisão sua posição e trajetória durante voos de longa distância ou em áreas onde o sinal do GPS é limitado. O uso de sextantes e estrelas como pontos de referência tem sido uma prática consagrada, garantindo a segurança e a eficiência das operações aéreas, especialmente em contexto de guerra.

Na manutenção e no controle de órbitas satelitais, os *stars trackers*, instrumentos de navegação astronômica que utilizam sensores sensíveis à luz das estrelas, são usados para determinar com precisão a atitude e a orientação dos satélites. Essas informações são essenciais para garantir que os satélites permaneçam na trajetória correta e executem suas funções de maneira precisa.

Essa precisão pôde ser identificada no experimento realizado, uma vez que os resultados apontaram uma indicação da acurácia da navegação celestial CELNAV em comparação à navegação por GPS).

À medida que a exploração espacial continua avançando, a navegação astronômica ganha ainda mais relevância. Missões espaciais para outros planetas, como Marte, exigem uma navegação precisa e confiável, não possibilitada pelos sistemas GPS terrestres, e considerando que não existe cobertura GPS no

sistema solar. Nesses casos, os astrônomos e engenheiros, especialmente da Boeing e NASA, confiam na observação de corpos celestes e no uso de algoritmos sofisticados para determinar as trajetórias das espaçonaves.

Olhando para o futuro, a navegação astronômica continuará a desempenhar um papel crucial, na medida em que a exploração espacial se expande. Por meio do desenvolvimento de tecnologias cada vez mais avançadas, como telescópios espaciais e sistemas de navegação por estrelas aprimorados cada vez mais automatizados, a precisão e a eficiência da navegação serão aprimoradas. Além disso, a colaboração entre cientistas, engenheiros e astrônomos permitirá a criação de métodos de navegação ainda mais sofisticados, que levarão a exploração humana a novos lugares e espaços, graças à navegação celestial.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, Patrick. **Aeroporto internacional de Lanseria**. 2018. Disponível em: <https://pt.dreamstime.com/imagens-de-stock-royalty-free-aeroporto-internacional-de-lanseria-image22353319>. Acesso em: 8 abr. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Instrução Suplementar n. 21-013**, de 16 de agosto de 2012. Instruções para obtenção de aprovação de instalação de equipamentos GNSS (Global Navigation Satellite Systems) stand alone para operações VFR e IFR PBN (Performance-Based Navigation) [documento eletrônico]. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-21-013>. Acesso em: 5 maio 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Instrução Suplementar 91-002 Revisão A**, de 16 de junho de 2014. Uso de informação aeronáutica em formato digital – Electronic Flight Bag (EFB). Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-91-002>. Acesso em: 5 maio 2023.

BENNETT, Jeffrey O.; DONAHUE, Megan O.; SCHNEIDER, Nicholas; VOIT, Mark. **The Cosmic Perspective**. 6th ed. Addison Wesley, 2009. Disponível em: <https://archive.org/details/full-6th-edition-full-cosmic-perspective-addison-wesley-2009/mode/2up> . Acesso em: 7 abr. 2023.

BOWDITCH, Nathaniel. **The American Practical Navigator: An Epitome of Navigation**. National Geospatial-Intelligence Agency, 2002. 892p. Disponível em: <https://bluepeteraustralia.files.wordpress.com/2012/12/bowditch.pdf>

DUBOIS, Thierry. **Be Ready If You Lose GNSS Signal, Airbus Advises Pilots**. Aviation Week. 2020. Disponível em: <https://aviationweek.com/air-transport/be-ready-if-you-lose-gnss-signal-airbus-advises-pilots>. Acesso em: 7 abr. 2023.

DUTRA, Luiz Costa e Silva. **Glossário aerotécnico: inglês-português**. São Paulo: Traço, 1979. 469 p.

FLYDECK. **Instrumentos – Bússola Magnética de Reserva**. Disponível em: <http://www.flydeck.com/instrumentos/bussola-magnetica-reserva>. Acesso em: 7 maio 2023.

GESTEIRA, Heloisa M. **The astrolabe, the sea and the Empire**. História, Ciências, Saúde-Manguinhos, Rio de Janeiro, v. 21, primeira edição, p. 315-335, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/cKRFM73SThtPpqQZfqVQgrG/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 2 mar. 2023.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GNU PLOT. **Versão 5.4.8. [Software]**. Disponível em: <http://www.gnuplot.info>. Acesso em: 5 maio 2023.

HERRERA, Linda M. **Space Shuttle Star Tracker Challenges**. Shuttle Guidance, Navigation & Flight Controls Engineer. Boeing Space Exploration, 13 maio 2010. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110003998/downloads/20110003998.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2023.

KARL, John. **Celestial Navigation in the GPS Age**. Paradise Cay Publications, 2007. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=UfXz8vGHGF0C>. Acesso em: 9 fev. 2023.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Flight Simulator 2020**. Microsoft Flight Simulator 2020. Redmond, WA: Microsoft Corporation, 2020.

OLIVEIRA, David Alisson Uchôa de. **As Grandes Navegações: aspectos matemáticos de alguns instrumentos náuticos**. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza. Universidade Federal da Paraíba, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/9838/2/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. 2013. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico** (2ª ed.). Novo Hamburgo, RS: Editora Feevale. Disponível em:

<https://www.feevale.br/institucional/editora-feevale/metodologia-do-trabalho-cientifico---2-edicao>. Acesso em: 20 mar. 2023.

ROGOWAY, Tyler. **SR-71's "R2-D2" Could Be The Key To Winning Future Fights In GPS Denied Environments**. 2019. Disponível em: <https://www.thedrive.com/the-war-zone/17207/sr-71s-r2-d2-could-be-the-key-to-winning-future-fights-in-gps-denied-environments>. Acesso em: 7 abr. 2023.

SANTOS, Ivanelson Lobato dos. **Navegação Aérea Descomplicada 2**. Parte: piloto comercial. 4ª ed. Belo Horizonte, 2018. 192p.

SEIDELMANN, Kenneth P.; HOHENKERK, Catherine Y. **The History of Celestial Navigation: Rise of the Royal Observatory and Nautical Almanacs**. Springer Nature. 2020. Disponível em: [https://books.google.com.br/books/about/The\\_History\\_of\\_Celestial\\_Navigation.html?id=MFruDwAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.br/books/about/The_History_of_Celestial_Navigation.html?id=MFruDwAAQBAJ&redir_esc=y). Acesso em: 6 mar. 2023.

SONNEMAKER, João B. (2012). **Meteorologia PP-PC-IFR-PLA** (31ª ed.). ASA.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Gnuplot**. 2015. Instituto de Física, UFRGS. Disponível em: <https://fiscomp.if.ufrgs.br/index.php/Gnuplot>. Acesso em: 8 mar. 2023.

WINTERNITZ, Luke M. B. *et al.* **SEXTANT X-ray Pulsar Navigation Demonstration: Flight System and Test Results**. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA, 2016. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160003122/downloads/20160003122.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2023.

VAN DER VEEN, Eric. **CelNav for MSFS**. Celestial Navigation Sextant. 2021. Disponível em: <https://flightsim.to/file/17738/celnav-for-msfs-celestial-navigation-sextant>. Acesso em: 7 maio 2023.

ZEILIK, Michael. **Introductory Astronomy and Astrophysics Fort Worth**: Saunders College Pub., 1998. Disponível em: <https://archive.org/details/introductoryastr0000zeil>. Acesso em: 11 maio 2023.

ZITO, George V.; CHILTON, E. A. **Design and Development of a Multipurpose, Boresighted Star Tracker**. Prepared by The Bendix Corporation, Teterboro, N. J., for Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., March 1969. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19690012140/downloads/19690012140.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2023.