

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
SISTEMAS DE ARMAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO INERCIAL E GPS:
Importância, conceitos e aplicações



1ºTEN MOISÉS CARDOSO DA PAIXÃO

Rio de Janeiro
2023

Paixão, Moisés Cardoso da
Sistemas de Navegação Inercial e GPS: Importância, conceitos e aplicações / Moisés Cardoso da Paixão. Rio de Janeiro, 2023.

38 f. : il.

Orientador: Leticia Ramos Lemos Collavizza / Rodolfo Saboia Lima de Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso – Centro de Instrução Almirante Alexandrino, Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas, 2023.

1. Sistema de Navegação Inercial. 2. GPS. 3. Unidade de Medida Inercial (*IMU*). 4. *e-Loran*. I. Collavizza, Leticia Ramos Lemos, 2023-, (Orient.). II. Souza, Rodolfo Saboia Lima de, 2023-, (Orient.). III. Centro de Instrução Almirante Alexandrino. IV. Sistemas de Navegação Inercial e GPS: Importância, conceitos e aplicações.

1ºTEN MOISÉS CARDOSO DA PAIXÃO

SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO INERCIAL E *GPS*:
Importância, conceitos e aplicações

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas.

Orientadores:

CC (EN) LETICIA Ramos Lemos Collavizza
Rodolfo Saboia Lima de Souza

CIAA
Rio de Janeiro
2023

1ºTEN MOISÉS CARDOSO DA PAIXÃO

SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO INERCIAL E GPS:
Importância, conceitos e aplicações

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

CC (EN) Leticia Ramos Lemos Collavizza – DSAM

Rodolfo Saboia Lima de Souza, DSc – PUC-Rio

CT (EN) Luiz Antônio Costa Carvalho – DSAM

Cesar Augusto Lampe Linhares da Fonseca, SCNS DSc – CIAA

CIAA
Rio de Janeiro
2023

A Deus que entregou seu filho para nos dar vida eterna.

Ao meu amado filho Isaac e esposa Thais Alves pela compreensão nas horas de ausência.

Aos meus pais Paulo Roberto e Valéria pela educação, investimento e sacrifícios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus criador, sustentador e salvador da minha vida.

Ao meu filho Isaac, que mesmo tão pequeno superou tantos desafios e sempre aparecendo com um sorriso.

Ao amor da minha vida, minha esposa Thais, por sustentar nosso lar com abnegação, principalmente na minha ausência.

Aos meus avós Dinéia e Pedro Paulo, servos de Deus, exemplo e inspiração em todas as áreas.

Aos meus pais Paulo Roberto e Valéria pelo amor, apoio em todos os momentos e por não medirem esforços financeiros e pessoais para que eu e minha irmã tivéssemos uma excelente educação.

Aos meus orientadores CC (EN) Leticia e Prof. Rodolfo pelo exemplo e orientação.

Ao Coordenador do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas, CMG (RM1) Richard H. G. Asch, pelo incentivo e abnegação na condução deste curso.

Aos meus amigos da Turma Alte. Gastão Motta pelo companheirismo de quase 13 anos.

“Não se conhece completamente
uma ciência enquanto não se
souber da sua história.”

Augusto Comte

SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO INERCIAL E GPS: Importância, conceitos e aplicações

Resumo

Este trabalho abordou através de uma revisão bibliográfica, conceitos-chave dos Sistemas *e-Loran*, *GPS* e de Navegação Inercial. Apresentou-se também suas aplicações, precisão e vulnerabilidades, e as recentes tendências tecnológicas que têm aprimorado esses sistemas de navegação, destacando a importância de sua evolução contínua para o sucesso das operações militares. As *IMU* se destacam como componentes vitais na garantia da precisão, confiabilidade e versatilidade dos sistemas militares em uma variedade de cenários operacionais.

Palavra-chave: Sistema de Navegação Inercial; *GPS*; Unidade de Medida Inercial; *e-Loran*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: <i>e-Loran</i> usado para comunicações.....	p. 17
Figura 2: Representação da constelação de satélites do <i>GPS</i>	p. 20
Figura 3: Charles Draper apresentando o Sistema <i>SPIRE</i>	p. 22
Figura 4: Diagrama de blocos de um SNI.....	p. 23
Figura 5: Acelerômetros e giroscópios, posicionados ortogonalmente nos três eixos de movimento.....	p. 25
Figura 6: Diagrama de blocos do processo de realinhamento.....	p. 31

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EUA	Estados Unidos da América
<i>e-Loran</i>	<i>Enhanced Long Range Navigation</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MEMS	Sensores Microeletromecânicos
NAVSTAR	<i>Navigation Satellite with Time And Ranging</i>
SBAS	Sistema de Aumento baseados em Satélites
SNI	Sistema de Navegação Inercial
U.S.S.	United States Ship

LISTA DE SÍMBOLOS

$a(s)$ aceleração

$\int_{t_0}^t ds$ integração do instante t_0 até o instante t

$v(t)$ velocidade em função do tempo

t_0 tempo inicial

t tempo

$v(t_0)$ velocidade no instante inicial

$x(t)$ posição em função do tempo

$x(t_0)$ posição no instante inicial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1. Apresentação do Problema	14
1.2. Justificativa e Relevância	14
1.3. Objetivos	15
2 METODOLOGIA	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Conceito de Navegação.....	18
3.2. Sistemas de Navegação por Rádio	19
3.2.1. <i>e-Loran</i>	19
3.2.2. <i>GPS</i>	20
3.3. Sistema de Navegação Inercial	24
3.3.1. Histórico.....	24
3.3.2. Conceito.....	25
3.3.3. Unidades de Medida Inercial (<i>IMU</i>)	27
3.3.4. Tecnologias e desenvolvimentos recentes em <i>IMU</i>	28
3.3.5. Aplicações de <i>IMU</i> em Sistemas Militares	30
4 ANÁLISE QUALITATIVA	33
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
5.1. Sugestões para Futuros Trabalhos	35
6 REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

A navegação se refere à identificação da posição, velocidade e direção angular (atitude) de um veículo em relação a um referencial. Um dos métodos mais elementares de navegação envolve o uso de pontos notáveis ou referências geográficas. A navegação astronômica, por exemplo, utiliza essa técnica observando as estrelas (Durão, 2009).

A navegação inercial, segundo Goel *et al.* (2021, p.104, tradução própria¹), “é uma estimativa de trajetória que utiliza apenas sensores inerciais, ou seja, acelerômetros e giroscópios; esses dispositivos detectam movimento em relação a um referencial inercial”. Um Sistema de Navegação Inercial (SNI) consiste em uma integração entre a Unidade de Medição Inercial, conhecida como *IMU (Inertial Measurement Unit)*, e um processador de navegação, tecnologias que abrangem um conjunto de sensores, incluindo acelerômetros e giroscópios, projetados para medir o movimento, orientação e aceleração de objetos em relação a um sistema de coordenadas inercial, fornecendo informações críticas sobre a posição, velocidade e orientação em tempo real, desempenhando um papel crucial nas operações militares modernas (Marques Filho, 2011).

O *GNSS (Global Navigation Satellite System)* é o sistema formado pela constelação de satélites artificiais, que engloba sistemas desenvolvidos por várias potências mundiais como o sistema russo *GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)*, o europeu Galileo, o sistema chinês *BDS (BeiDou Navigation Satellite System)* e o mais comum, *NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite with Time And Ranging – Global Positioning System)*, e permite determinar o posicionamento em tempo real. São amplamente utilizados no setor de posicionamento e navegação devido à sua versatilidade e variedade de preços. O sistema é acessível em todo o mundo, é utilizado em equipamentos compactos, econômico em termos de energia e pode ser integrado a outros dispositivos. Devido a esses atributos, é também utilizado em diversas outras aplicações como mapeamento, conservação ambiental, robótica,

¹ “*Inertial navigation is dead reckoning that uses only inertial sensors, namely, accelerometers and rate gyros; these devices sense motion relative to an inertial frame.*”

agricultura, para fins militares, recreação, e atividades esportivas (Marques Filho, 2011).

1.1. Apresentação do Problema

O GNSS de navegação tem vantagens, mas enfrenta desafios como interrupções de sinal em áreas com obstruções, vegetação densa e locais subterrâneos e em ambiente submarino. O sinal pode ser intencionalmente interferido ou negado pelo Departamento de Defesa dos EUA (Estados Unidos da América). Para funcionar corretamente, é necessário que pelo menos três satélites estejam visíveis sem interferência no sinal (Harbuck *et al.*, 2006).

1.2. Justificativa e Relevância

Esta pesquisa é motivada pelo reconhecimento de que o conhecimento sólido sobre a Navegação Inercial e as tecnologias *IMU* e suas aplicações é essencial para melhorar a eficácia e a precisão das operações militares, bem como para reduzir a vulnerabilidade a interrupções de sistemas de posicionamento, como o *GPS*.

A relevância desse tema para sistemas militares de posicionamento é inegável, sendo essencial para a navegação e orientação em veículos militares, drones, mísseis e sistemas de armas. Além disso, as *IMU* desempenham um papel crucial na estabilização de plataformas em condições adversas, reduzindo a dependência do GNSS em ambientes de guerra, garantindo a segurança nacional por meio da precisão na identificação de ameaças e contribuindo para avanços tecnológicos que beneficiam tanto as operações militares quanto a indústria civil (Bezerra, 2022).

Equipar um “veículo” com um SNI é uma solução para rotas sem cobertura. Utilizando os sensores inerciais de uma *IMU*, pode-se determinar a localização do veículo autônomo, ou de um míssil, sem depender de dispositivos externos, exceto durante sua inicialização. O SNI, além de permitir a navegação em áreas sem sinais do GNSS, pode também contribuir significativamente para a precisão da solução de navegação global ao combinar a abordagem inercial com a técnica GNSS (Mori, 2013).

1.3. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral organizar, apresentar e analisar informação relevante sobre a Navegação Inercial e o papel das Unidades de Medida Inercial (*IMU*) e sua relevância para sistemas militares de posicionamento, visando compreender a importância do desenvolvimento dessa tecnologia e técnicas de forma a aumentar o grau de autonomia e soberania do país. Para alcançar esse objetivo, três objetivos específicos são delineados:

- Apresentar tecnologias e serviços de posicionamento como o *e-Loran*, o *GPS* e o Sistema de Navegação Inercial;
- Investigar e aprofundar os conceitos fundamentais da Navegação Inercial e das *IMU*, incluindo acelerômetros e giroscópios, para proporcionar uma compreensão detalhada de sua operação e capacidades;
- Analisar qualitativamente os sistemas, destacando a importância do seu desenvolvimento nacionalmente tanto para interoperabilidade, quanto na redução da dependência do *GNSS* em ambientes de guerra;

2 METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica foi escolhida como método a ser utilizado na produção deste trabalho, onde foram utilizados trabalhos científicos e/ou acadêmicos sobre o tema em questão, como livros, artigos, teses e muitos outros trabalhos disponíveis na literatura como fontes de estudo. Essa estratégia foi estabelecida por meio de pesquisa em bibliotecas online (Bello, 2009 *apud* Almeida, 2021).

A pesquisa bibliográfica é uma técnica de documentação que inclui a aquisição de uma coleção dos principais estudos previamente realizados, destacados por sua capacidade de disponibilizar informações pertinentes e atuais relacionadas ao assunto. Trata-se de uma atividade que examina um determinado período e fornece informações pertinentes a essa época (Marconi; Lakatos, 2003).

O conjunto de dados foi produzido por meio de uma primeira leitura exploratória em que todo o material escolhido foi exposto a uma leitura seletiva para avaliar se a obra em questão contribui ou não para a estratégia de estudo. Além disso, foi realizada leitura seletiva com a intenção de fazer leitura extensa a fim de validar a coerência do material que seria gerado. Por fim, foram construídos registros dos dados utilizados por meio da conexão de conceitos, transferência de contextos e avaliação de intenções, auxiliando na resolução dos problemas (Gil, 2002).

A Pesquisa Quantitativa acredita que tudo pode ser transformado em números e ser quantificado, lidando com dados numéricos e usando ferramentas estatísticas como percentual, média, moda, desvio-padrão e mediana. Esta metodologia é utilizada em várias pesquisas, pois avalia as relações complexas entre variáveis e busca entender e categorizar os processos vivenciados por certos grupos sociais. (Almeida, 2021).

A análise qualitativa é menos formal do que a análise quantitativa, pois nesta última seus passos podem ser definidos de maneira relativamente simples. A análise qualitativa depende de muitos fatores, tais como a natureza dos dados coletados, a extensão da amostra, os instrumentos de pesquisa e os pressupostos teóricos que nortearam a investigação. Pode-se, no entanto, definir esse processo como uma sequência de atividades, que envolve a redução dos dados, a categorização desses dados, a interpretação e a redação do texto (Gil, 2002).

Este trabalho, por ter uma abordagem exploratória da informação, e pela metodologia utilizada, realiza predominantemente uma análise qualitativa, tentando compreender os dados e realizar observações comparativas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém os principais conceitos sobre os temas que serão abordados neste trabalho, como navegação inercial, *IMU* e sistemas de posicionamento.

3.1. Conceito de Navegação

Miguens (2019, p. 1) define navegação como “a ciência e a arte de conduzir, com segurança, um navio (ou embarcação) de um ponto a outro da superfície da Terra”, estende-se navio também para veículo, pessoal ou objeto. Para Grewal, Andrews e Bartone (2013), a definição de navegação pode ser ampliada para abranger a determinação do estado dinâmico desse objeto, indo além da simples localização. Em outras palavras, refere-se à competência de identificar não apenas a posição, mas também a velocidade e a atitude reais de um objeto. Para conseguir este feito, são necessários pontos de referência ao longo da passagem para confirmar se a posição atual está correta em relação à posição estimada, seja por meio de um mapa, estrela, constelação de satélites ou um ponto de referência. Quando esta referência não está disponível, é necessário um método alternativo para manter a navegação e a orientação. O uso da inércia como meio de detectar e medir mudanças no movimento tem sido uma abordagem amplamente adotada na navegação sem auxílio externo (Harris, 2023).

Para Grewal, Weill e Andrews (2001), estas são as formas de navegação:

1. Pilotagem, que essencialmente se baseia no reconhecimento de pontos de referência para saber onde você está. É tão antiga quanto a humanidade.
2. Navegação por dedução, que depende do conhecimento de onde você partiu, juntamente com alguma forma de informação sobre a direção e uma estimativa de velocidade.
3. Navegação celestial, usando o tempo e os ângulos entre a vertical local e objetos celestes conhecidos (por exemplo, sol, lua ou estrelas).
4. Navegação por rádio, que depende de fontes de radiofrequência com localizações conhecidas (incluindo satélites do Sistema de Posicionamento Global).

5. Navegação inercial, que se baseia no conhecimento da sua posição inicial, velocidade e atitude, e posteriormente na medição das taxas de atitude e acelerações. É a única forma de navegação que não depende de referências externas (Grewal; Weill; Andrews, 2001, p. 1, tradução própria).

3.2. Sistemas de Navegação por Rádio

3.2.1. e-Loran

O sistema *Enhanced Long Range Navigation (e-Loran)* é uma evolução do sistema de navegação *Loran*, que teve seu desenvolvimento durante a Segunda Guerra Mundial. Inicialmente, o *Loran* era utilizado para navegação marítima, mas posteriormente expandiu-se para uso em aeronaves e outros setores, como no exemplo representado pela Figura 1. O *e-Loran* foi desenvolvido para melhorar a precisão e a confiabilidade do *Loran*, tornando-o mais adequado para aplicações de posicionamento críticas (Lo; Uguen, 2015). Sua história é marcada por avanços tecnológicos significativos que permitiram sua adaptação para novos usos.

Figura 1: *e-Loran* usado para comunicações



Fonte: BoatTest².

² <https://boattest.com/article/loran-coming-back>

O *e-Loran* tem uma variedade de aplicações, incluindo navegação marítima de alta precisão, auxílio à navegação aérea, posicionamento geodésico e muito mais. É amplamente utilizado em aplicações críticas onde a precisão e a disponibilidade são essenciais (Gutt; Lo, 2019). Além das aplicações tradicionais, novas áreas de uso estão surgindo, como a integração com sistemas de transporte autônomo.

O *e-Loran* funciona baseado em transmissores terrestres que emitem sinais de rádio de baixa frequência. Os receptores calculam a posição com base na diferença de tempo entre os sinais recebidos de vários transmissores. A precisão do *e-Loran* é geralmente melhor que 10 metros, tornando-o adequado para muitas aplicações de navegação (Gutt; Lo, 2019). A análise da tecnologia por trás do *e-Loran* revela os princípios de sincronização e cálculo de posição que o tornam tão eficaz.

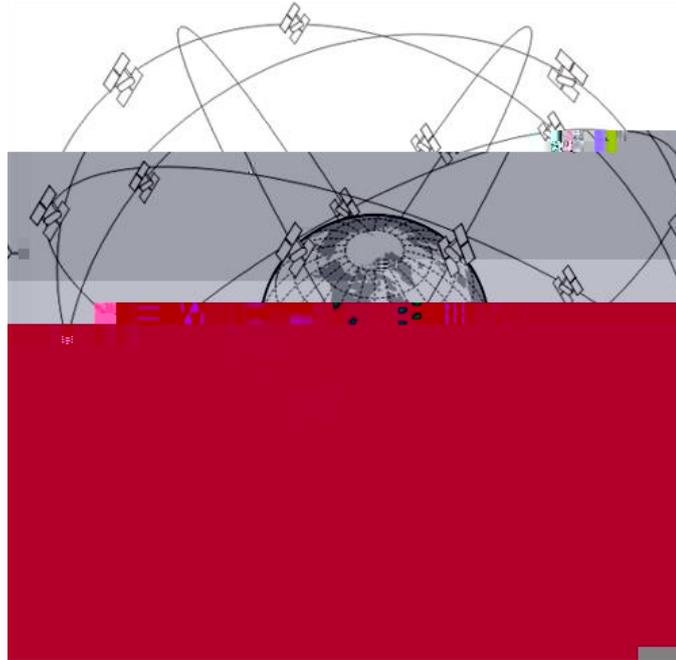
A precisão do *e-Loran* é afetada por várias fontes de erro. Isso inclui interferência eletromagnética, perturbações atmosféricas e variações na velocidade de propagação do sinal, que podem afetar a precisão. Além disso, problemas com a manutenção e calibração das estações de base também podem impactar a precisão do sistema (Lo; Uguen, 2015). O entendimento dessas fontes de erro é fundamental para o uso confiável do sistema.

Nos últimos anos, houve avanços significativos no aprimoramento do *e-Loran*. O sistema está sendo modernizado com tecnologias mais recentes para melhorar sua eficiência e capacidade de resistir a interferências. Além disso, esforços estão sendo feitos para padronizar e expandir o uso do *e-Loran* em nível internacional, o que tem implicações importantes para a segurança marítima e a infraestrutura crítica.

3.2.2. GPS

O NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite with Time And Ranging – Global Positioning System*) foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos e tornou-se totalmente operacional em 1995. Inicialmente, foi projetado para fins militares, mas seu uso se expandiu para aplicações civis, como navegação, georreferenciamento, agricultura de precisão e muito mais (Kaplan; Hegarty, 2006). A história do GPS é um exemplo notável de inovação tecnológica e cooperação internacional.

Figura 2: Representação da constelação de satélites do *GPS*



Fonte: Site da Penn State, College of Earth and Mineral Sciences³

O *GPS* opera através de uma constelação de satélites (Figura 2) artificiais que transmitem sinais de rádio precisamente cronometrados. Os receptores *GPS* recebem sinais de vários satélites e calculam sua posição com base na diferença de tempo entre os sinais. A precisão do *GPS*, para fim não militar, é geralmente de cerca de 3-5 metros, tornando-o uma ferramenta poderosa para uma ampla gama de aplicações (El-Rabbany, 2002). O *GPS* pode oferecer informações precisas sobre posição e velocidade, porém ele não é tão exato quando se trata de orientação angular. Assim, a atitude do veículo requer o uso de mais de uma antena receptora e a implementação de um algoritmo particular (Durão, 2009).

A precisão do *GPS* pode ser afetada por várias fontes de erro. Obstruções, como edifícios altos ou árvores densas, podem bloquear os sinais *GPS*, causando imprecisões. Distorções atmosféricas também podem afetar a precisão, especialmente em condições meteorológicas adversas. Erros nos relógios dos satélites e distorções de tempo podem levar a imprecisões na determinação da posição. No entanto, a correção diferencial e a utilização de receptores de alta precisão podem melhorar significativamente a precisão do *GPS* em muitas aplicações (Hofmann-Wellenhof; Lichtenegger; Collins, 2001).

³ <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1770>

O *GPS* desempenha um papel crucial em uma ampla variedade de aplicações, desde navegação veicular e sistemas de rastreamento de frota até mapeamento de terrenos e georreferenciamento de fotos aéreas (Rizos & Fisher, 2008). Além das aplicações tradicionais, o *GPS* está desempenhando um papel fundamental em sistemas de transporte autônomo e na expansão da Internet das Coisas (*IoT*).

O *GPS* está passando por uma série de aprimoramentos e atualizações. A constelação de satélites está expandindo, o que melhora a cobertura e a disponibilidade do sistema. Além disso, estão sendo desenvolvidas novas técnicas de correção diferencial, como o Sistema de Aumento baseados em Satélites (SBAS), para melhorar ainda mais a precisão em áreas urbanas e em condições adversas.

Interferências intencionais ou não intencionais podem afetar a precisão do *GPS* (Falck; Waeytens, 2015). Isso pode ser prejudicial em situações críticas, como navegação aérea e marítima. Para mitigar esse problema, esforços têm sido realizados para desenvolver tecnologias de detecção e proteção contra interferência.

Em locais com obstruções significativas, como edifícios altos ou túneis, o sinal *GPS* pode ser bloqueado ou atenuado, afetando a capacidade de determinar a localização (Kaplan; Hegarty, 2006). Soluções alternativas, como sistemas de navegação inercial, são usadas em combinação com o *GPS* para superar esse desafio.

Os sistemas *GPS* são suscetíveis a ataques cibernéticos que podem desviar informações de localização, o que pode ter implicações graves para a segurança nacional e a privacidade (El-Rabbany, 2002). Para combater isso, estão sendo desenvolvidas técnicas de autenticação e criptografia mais robustas.

Técnicas de falsificação de sinal, como o "*spoofing*," podem enganar receptores *GPS*, levando a informações de localização incorretas (Falck; Waeytens, 2015). Pesquisas estão em andamento para desenvolver métodos de detecção de *spoofing* e mecanismos de proteção.

A localização geográfica por meio de smartphones é possibilitada pelo uso de sinais de *GPS*, torres de celular, redes Wi-Fi e sensores internos dos dispositivos (Ashley et al., 2018). Os sistemas operacionais dos smartphones, como o Android e o iOS, permitem que aplicativos acessem informações de localização e forneçam serviços de georreferenciamento. Isso permitiu o desenvolvimento de inúmeras

aplicações, desde serviços de mapeamento e navegação até redes sociais baseadas em localização.

Uma tendência significativa no campo da localização de smartphones é a fusão de dados de várias fontes. Isso inclui não apenas o *GPS*, mas também informações de torres de celular, redes Wi-Fi e sensores inerciais. A combinação de múltiplas fontes de dados permite uma maior precisão na determinação da localização, especialmente em ambientes urbanos densos e internos, onde o sinal *GPS* pode ser fraco.

Além das aplicações atuais, o campo de sistemas de posicionamento e localização geográfica está em constante evolução. Futuras aplicações incluem sistemas de transporte autônomo, logística avançada, agricultura de precisão e muito mais. A capacidade de precisão e a segurança desses sistemas são fundamentais para o seu sucesso.

À medida que novas aplicações surgem, também trazem desafios tecnológicos. Os sistemas de posicionamento precisam se adaptar a ambientes complexos e dinâmicos. Além disso, a proteção contra vulnerabilidades, como interferência e ataques cibernéticos, é uma prioridade crescente.

O uso generalizado de sistemas de posicionamento e localização geográfica levanta questões éticas e de privacidade. A coleta de dados de localização de usuários de smartphones e dispositivos *IoT* (*internet of things*) tem implicações significativas para a privacidade. É importante abordar essas questões e desenvolver diretrizes éticas para o uso responsável de dados de localização.

Os sistemas de posicionamento desempenham um papel fundamental em nossa sociedade e economia. Do *e-Loran* ao *GPS* e à localização via smartphone, a capacidade de determinar a localização é essencial para uma ampla variedade de aplicações. No entanto, à medida que essas tecnologias continuam a evoluir, também enfrentam desafios significativos, como vulnerabilidades e a necessidade de aprimorar a precisão e a segurança (Kaplan; Hegarty, 2006; Teunissen; Montenbruck, 2017).

3.3. Sistema de Navegação Inercial

3.3.1. Histórico

O início da navegação inercial não tem uma data muito bem definida, para Marland (1992), inventores de partes do mundo distintas, como J. J. Murphy (irlandês) em 1873, Max Schuler (Alemanha) em 1923 e B. V. Bulgakov (Rússia) em 1932, trabalhavam em experimentos que utilizavam a teoria da navegação inercial.

Marland (1992) e Schmidt (2009) concordam que o impulsionamento para o desenvolvimento dessa tecnologia foi na 2ª Guerra Mundial. O primeiro autor credita aos alemães a criação do sistema de guiagem dos mísseis V-2, trabalho realizado pela organização *Kreiselgerate*, liderados por J. G. Gievers.

O segundo autor cita o Laboratório de Instrumentação do *MIT* (*Massachusetts Institute of Technology*) como um dos pioneiros na navegação inercial em aeronaves, com o sistema *SPIRE* (*Space Inertial Reference Equipment*) com mais de 1200 Kg e 1,5 m de diâmetro (Figura 3). Charles Stark Draper, no ano de 1953, desenvolveu o sistema *SPIRE*, coordenou e estava a bordo de em uma viagem aérea transcontinental que se baseou apenas nesse sistema para orientação e navegação, desde a decolagem até pouco antes do pouso, sem qualquer suporte adicional. Após testes bem-sucedidos, a Força Aérea Americana contratou o laboratório para criar um sistema de guiagem inercial para os mísseis Thor e Titan, e a Marinha Americana para o míssil Polaris.

Segundo Goel *et al.* (2021, p.104, tradução própria), o primeiro grande sucesso da navegação exclusivamente inercial, foi a jornada do submarino americano *U.S.S. Nautilus*, que navegou por 95 horas sob a camada de gelo do Polo Norte no dia 3 de agosto de 1958.

Figura 3: Charles Draper apresentando o Sistema *SPIRE*.



Fonte: EE World Online⁴.

3.3.2. Conceito

A navegação inercial refere-se ao método de calcular, continuamente, a posição, velocidade linear e angular de um veículo em relação a um sistema de coordenadas apropriado. Isso é feito usando uma unidade de medida inercial, ou *IMU*, que possui acelerômetros para avaliar forças lineares específicas e giroscópios para determinar as velocidades angulares (Marques Filho, 2011).

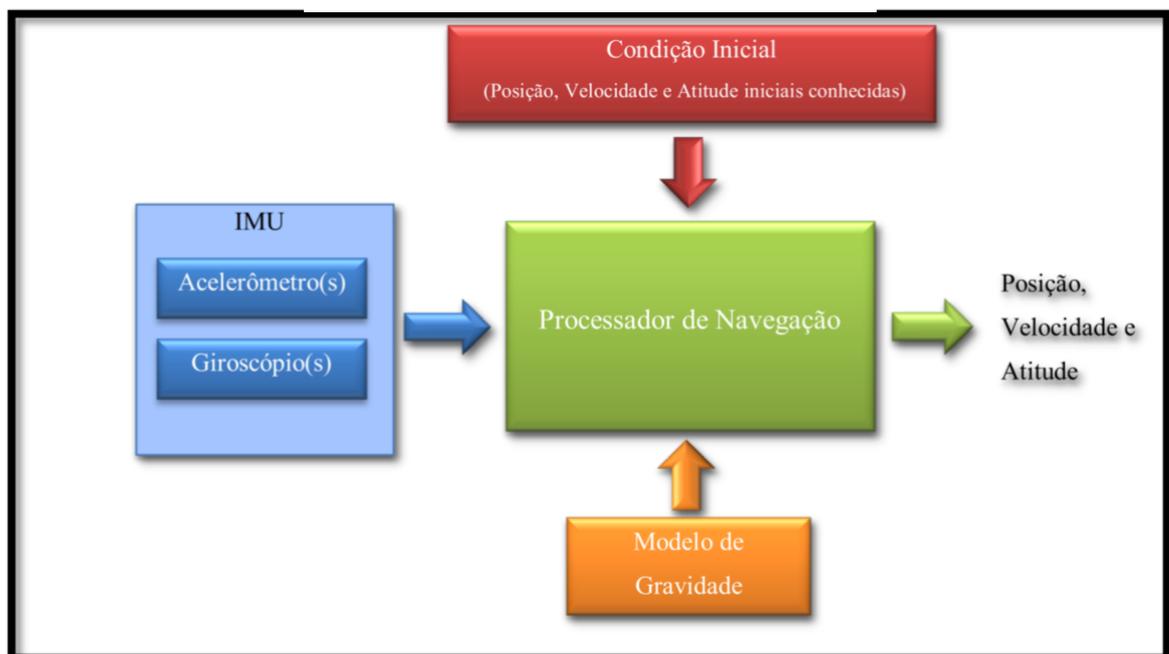
A *IMU*, que possui uma eletrônica relacionada a esses sensores e uma capacidade básica de processamento, envia os dados medidos para o computador navegação (Figura 4). Algoritmos específicos para correção de erros são utilizados na *IMU* para lidar com os erros probabilísticos. Já erros aleatórios são atenuados por um estimador ótimo, como um Filtro de Kalman⁵, processado no Computador de Navegação (Gonçalves, 2017).

⁴ <https://www.eeworldonline.com/inertial-measurement-units-the-hidden-key-to-apollo-success-now-a-mems-device/>

⁵ “O filtro de Kalman é um estimador linear recursivo que computa, de forma ótima sob diversos critérios e hipóteses, uma estimativa de variância mínima de um estado que evolui no tempo, a partir de observações linearmente relacionadas com esse estado. É um procedimento que combina saídas ruidosas de sensores para estimar o estado de um sistema com incertezas dinâmicas” (Marques Filho, 2011, p. 28).

O Computador de Navegação, ao conectar-se à *IMU*, processa as leituras, já compensadas, dos sensores inerciais no software do sistema, começando pelo algoritmo de alinhamento e depois pelo de navegação. Durante a inicialização, a postura inicial da plataforma é determinada usando informações conhecidas de posição e velocidade. Uma vez que o sistema esteja alinhado, os ângulos de postura iniciais são estabelecidos (Gonçalves, 2017).

Figura 4: Diagrama de blocos de um SNI



Fonte: Mori, 2013.

Segundo Harris (2023), a navegação inercial precisa de um ponto inicial, ou seja, a partir do momento inicial t_0 , conhecendo as posições iniciais $x(t_0)$, a velocidade $v(t_0)$ e a aceleração $a(s)$ para $s > t_0$, é viável calcular a solução de navegação de um objeto.

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a(s) \cdot ds \quad (1)$$

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v(s) \cdot ds \quad (2)$$

Integrando as medidas de aceleração, conforme representado pelas Equações (1) e (2), pode-se obter estimativas das variações em velocidade e posição (Leite, 2019).

3.3.3. Unidades de Medida Inercial (*IMU*)

As Unidades de Medida Inercial (*IMU*) constituem um componente fundamental na área de medição inercial e desempenham um papel essencial em uma variedade de aplicações, incluindo sistemas militares de posicionamento. Para compreender a importância das *IMU*, é crucial explorar os conceitos básicos dessas unidades e os componentes que as compõem, tais como acelerômetros e giroscópios (Bezerra, 2022).

Os acelerômetros são dispositivos projetados para medir a aceleração de um objeto em relação a uma estrutura inercial. A mudança na posição que uma massa interna cria uma força ou tensão que é medida e convertida em leitura de aceleração. A importância dos acelerômetros na medição inercial reside na capacidade de determinar a aceleração linear em três eixos ortogonais (x, y e z). Suas características incluem sensibilidade, resolução, frequência de amostragem e faixa dinâmica (Valente, 2020; Viana, 2023).

Os acelerômetros permitem a *IMU* rastrear as mudanças na velocidade e posição de um objeto em relação a um sistema de coordenadas inercial no tempo, o que é fundamental para a navegação, orientação e estabilização de veículos e sistemas militares. Por exemplo, em um veículo militar, os acelerômetros podem detectar alterações na velocidade e direção, permitindo que o sistema de controle faça ajustes para manter o veículo em curso e evitar obstáculos (Casarin, 2019).

Os giroscópios, por sua vez, são dispositivos projetados para medir a taxa de rotação ou a velocidade angular de um objeto. Eles são particularmente importantes para a medição da orientação de um objeto em relação a um sistema de coordenadas inercial. Possuem sensibilidade angular, erro de *bias*⁶, tempo de resposta e faixa de medição como características principais (Campos, 2021). Os giroscópios são usados para determinar a inclinação, a orientação e a rotação de veículos e sistemas militares (Engers, 2021).

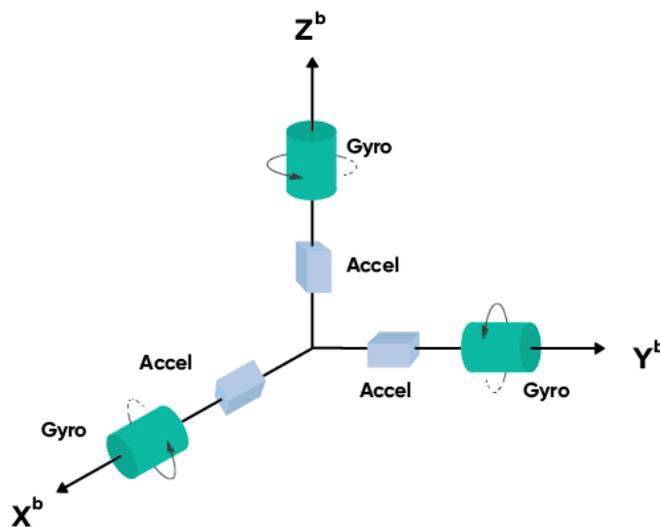
Quando emparelhados com acelerômetros, os giroscópios permitem que a *IMU* calcule a orientação espacial completa de um objeto em tempo real (Figura 5). Isso é vital para a estabilização de plataformas, como câmeras, sistemas de armas e

⁶ “Erro de Bias: O bias de um giroscópio é a média de sua leitura de saída quando não está girando, expresso em (°/s) (Mori, 2013)”.

veículos aéreos não tripulados (drones), garantindo que eles permaneçam estáveis e precisos mesmo em condições adversas (Campos, 2021).

Ambos os sensores são cruciais nas *IMU*, permitindo determinar a posição e orientação em relação a um sistema inercial. Essa funcionalidade é vital em aplicações como navegação, estabilização de plataformas e sistemas militares de posicionamento, onde a precisão e sensibilidade desses sensores influenciam diretamente o desempenho dos sistemas (Campos, 2021).

Figura 5: Acelerômetros e giroscópios, posicionados ortogonalmente nos três eixos de movimento



Fonte: Advanced Navigation⁷.

3.3.4. Tecnologias e desenvolvimentos recentes em *IMU*

Nos últimos anos, as Unidades de Medida Inercial (*IMU*) passaram por avanços significativos, impulsionando sua relevância e utilidade em aplicações militares. Um desses avanços notáveis inclui o uso de sensores Microeletromecânicos (*MEMS*) avançados, que oferecem alta sensibilidade e precisão nas medições de aceleração e velocidade angular. Essa precisão é vital para operações militares, permitindo uma navegação mais precisa em terrenos complexos e em situações de combate (Valente, 2020).

⁷ <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-navigation-systems-SNI-an-introduction/>

Uma tendência notável é a integração de múltiplos sensores em sistemas de fusão de sensores. Essa abordagem combina dados de *IMU* com informações do *GNSS*, magnetômetros e outros sensores, aprimorando ainda mais a precisão e a confiabilidade da navegação, mesmo em ambientes onde o sinal *GPS* pode ser comprometido ou indisponível (Silva, 2019).

As *IMU* autocalibráveis são outro avanço importante, capazes de recalibrar-se automaticamente, reduzindo erros de medição ao longo do tempo. Isso é especialmente benéfico em ambientes de combate, onde a calibração frequente pode não ser viável. Para aplicações em drones e dispositivos portáteis, *IMU* de baixo consumo de energia se tornaram essenciais. Esses dispositivos possibilitam operações mais longas com baterias menores, tornando-os ideais para missões de vigilância e reconhecimento (Viana, 2023).

As *IMU* são resistentes a condições ambientais hostis, como vibrações intensas, choque e temperaturas extremas, mantendo sua precisão e funcionalidade em condições adversas. Isso as tornam cruciais em operações militares. Além disso, o desenvolvimento de algoritmos avançados e técnicas de filtragem tem ajudado a reduzir ruídos e erros de deriva em leituras de *IMU*, tornando-as mais precisas e estáveis durante longos períodos de uso (Campos, 2022).

A integração de *IMU* com sistemas de comando e controle em tempo real é outra tendência importante. Isso permite que as informações de posicionamento e orientação sejam atualizadas em tempo real, fornecendo aos comandantes militares dados cruciais para a tomada de decisões estratégicas. A segurança dos dados é crítica em operações militares. *IMU* modernas incorporam medidas de segurança para proteger a integridade dos dados e evitar qualquer forma de comprometimento (Casarin, 2019).

O desenvolvimento de *IMU* de tamanho reduzido é especialmente relevante para microdrones usados em vigilância e reconhecimento, tornando esses veículos mais ágeis e discretos. Em operações de resgate e salvamento, *IMU* incorporadas em drones de busca e salvamento auxiliam na localização de vítimas em áreas de difícil acesso, aumentando as chances de sobrevivência em situações críticas (Bezerra, 2022).

Essas inovações não apenas melhoram a eficácia das operações militares, mas também promovem um entendimento mais aprofundado das *IMU* e seu potencial em uma variedade de cenários, desde missões de combate até operações de resgate

e exploração espacial. A evolução constante dessas tecnologias promete aplicações ainda mais avançadas, contribuindo para o sucesso das forças armadas e da segurança nacional (Viana, 2023).

3.3.5. Aplicações de *IMU* em Sistemas Militares

As aplicações de medidas inerciais, incluindo Unidades de Medida Inercial (*IMU*), em sistemas militares são diversificadas e desempenham um papel crucial em várias áreas estratégicas. A seguir, destacam-se algumas das principais aplicações dessas medidas inerciais em sistemas militares:

- **Navegação e Orientação de Veículos Militares:** As *IMU* são amplamente empregadas em tanques, veículos de transporte, veículos blindados e outros veículos militares para fornecer informações precisas de posicionamento, velocidade e orientação. Isso permite que as forças militares naveguem com precisão em terrenos variados, realizem manobras táticas e atinjam objetivos estratégicos com eficiência (Silva, 2019).
- **Orientação de Mísseis e Munições Inteligentes:** Mísseis guiados, munições inteligentes e sistemas de artilharia dependem das *IMU* para calcular sua trajetória e manter a precisão durante todo o voo ou movimento. Essa aplicação é crucial para o sucesso de operações militares, minimizando danos colaterais e maximizando a eficácia (Santana, 2019).

O Exército Brasileiro tem testado, em parceria com a empresa *Safran Eletronics & Defense Brasil*, um Sistema Inercial de Pontaria no Morteiro Pesado 120 mm M2A1 R, composto de giroscópios de última geração, ele se comunica com o Sistema Gênesis de Direção e Controle de Tiro aumentando a precisão do armamento e correção do disparo (Ministério da Defesa, 2023).

- **Navegação Aérea e Aeronaves Militares:** A aviação militar utiliza *IMU* em aeronaves, incluindo caças, bombardeiros e helicópteros, para determinar a posição e a orientação da aeronave, permitindo operações precisas de combate e manobras evasivas. Além disso, drones militares também fazem

uso desses sensores para missões de vigilância e reconhecimento (Viana, 2023).

- Estabilização de Plataformas: Navios e aeronaves, *IMU* são essenciais para estabilizar plataformas que carregam sensores, câmeras ou sistemas de armas. Isso garante que esses sistemas permaneçam estáveis, mesmo em movimento, proporcionando uma plataforma estável para observação ou ataque (Campos, 2022).
- Operações Subaquáticas e Marítimas: Em submarinos, navios militares e veículos subaquáticos não tripulados, as *IMU* são usadas para navegação subaquática, mapeamento de leitos oceânicos e operações de guerra submarina (Silva, 2019). Cabe ressaltar que, para os submarinos, os dispositivos deverão ter maior precisão (menor erro) de posicionamento, uma vez que, quando estão submersos, não há sinal de GNSS disponível para referenciar sua posição.
- Operações Terrestres e Urbanas: As *IMU* portáteis são usadas por soldados em campo para auxiliar na navegação, aumentar a consciência situacional e fornecer informações de orientação em ambientes urbanos complexos. Mavor *et al.* (2020) apresenta uma pesquisa de validação de um traje *IMU*, para captar os movimentos de soldados em atividades militares.
- Defesa Antiaérea e Mísseis Balísticos: Sistemas de defesa antiaérea, como mísseis superfície-ar, usam *IMU* para rastrear e interceptar alvos aéreos, incluindo mísseis balísticos inimigos (Viana, 2023)
- Exploração e Monitoramento Espacial: Satélites militares e veículos espaciais utilizam *IMU* para controlar sua atitude e orientação, bem como para coletar dados críticos em missões espaciais de defesa e reconhecimento (Valente, 2020).

Essas aplicações destacam a importância das medidas inerciais, como as *IMU*, nas operações militares modernas. Elas são fundamentais para a precisão, eficácia e segurança em uma ampla gama de cenários e desempenham um papel estratégico na defesa e segurança nacional.

4 ANÁLISE QUALITATIVA

Existem inúmeras vantagens de utilizar o *GNSS* para navegação, porém também há algumas desvantagens, como a sensibilidade a interrupções nos sinais emitidos pelos satélites, em áreas próximas a construções elevadas, áreas com vegetação densa e lugares subterrâneos e ambiente submarino. Além disso, o sinal pode sofrer interferências propositalis ou ser negado a qualquer momento pelo Departamento de Defesa dos EUA, demandando equipamentos suplementares para aumentar a precisão. Outra limitação consiste na necessidade de ter, no mínimo, três satélites visíveis acima do horizonte (Harbuck *et al.*, 2006, tradução própria).

Os receptores *GNSS* atuais têm uma precisão que varia entre 5-15 m, com taxas de atualização restritas a cerca de 10 Hz. Utilizando equipamento adicional e uma estação base com localização definida, é possível aprimorar a precisão para 1-3 cm ao empregar métodos como *GPS* diferencial e *GPS* cinemático em tempo real. Os sistemas de controle padrão de veículos necessitam medições com uma largura de banda significativamente superior à oferecida pelo *GNSS* (Goel *et al.*, 2021, tradução própria).

Um sistema de navegação inercial (SNI) estima a posição e a orientação de um corpo rígido apenas com a utilização de acelerômetros e giroscópios, através da integração de relações cinemáticas. (Goel *et al.*, 2021, tradução própria). Entretanto os SNI não determinam a posição com total precisão devido a falhas nos componentes, como giroscópios e acelerômetros, e imprecisões no modelo gravitacional que o SNI utiliza. Com o passar do tempo, essa imprecisão na posição tende a crescer, resultado de um aumento linear do erro com uma única integração e aumento quadrático com uma dupla integração dos dados iniciais, revelando a necessidade de atualizar periodicamente o sistema de navegação para minimizar os erros do sistema inercial, aproximando-os de zero (Goel *et al.*, 2021; Schmidt, 2009, tradução própria).

O alinhamento durante o movimento é crucial para missões e em caso de erros ou falhas no SNI. Diferentemente do alinhamento estático, o alinhamento em movimento envolve variáveis dinâmicas, como vetor gravidade e rotação da Terra, que mudam conforme o veículo se desloca, exigindo consideração de todas essas dinâmicas (Gonçalves, 2017).

Figura 6: Diagrama de blocos do processo de realinhamento.



Fonte: Gonçalves, 2017

A exigência de precisão por parte dos sensores caminha alinhada com custos. Sistemas que possuem alto desempenho e com baixo nível de deriva tem custo extremamente elevado (da ordem de centenas de milhares de dólares) e têm sua utilização predominantemente em aplicações militares e na aviação comercial (Mori, 2013).

Sistemas de navegação inercial militares poderiam usar modelos menos precisos com acesso contínuo ao *GPS* para realizar esse realinhamento em movimento. Embora sistemas menos precisos sejam mais baratos, a navegação e bloqueio do *GPS* em ambientes militares leva à busca por sensores inerciais mais acessíveis e precisos (Schmidt, 2009). Portanto, *GPS* e SNI são sistemas que devem operar juntos.

Dominar essa tecnologia significa que muito investimento de pesquisa e desenvolvimento deve ser implementado, tanto pelo Ministério da Defesa quanto pela Indústria Nacional, pois como pode-se observar, alcançar um nível de competência onde o Sistema de Navegação Inercial não precise da correção de um *GPS* aumentaria o nível de autonomia e soberania do país.

Pesquisas focadas em tecnologia inercial, principalmente em técnicas de alinhamento em movimento, é de suma importância. Um retrato de que o país está atrasado é a escassez de literatura especializada em navegação inercial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio desta pesquisa, ficou evidente que o Sistema *e-Loran*, o *GPS* e a Navegação Inercial desempenham um papel inegavelmente crucial no âmbito militar. A revisão bibliográfica realizada permitiu uma compreensão mais aprofundada dos referidos sistemas destacando seu histórico, princípio de operação, componentes essenciais, aplicações e interoperabilidade. Além disso, explorou-se um conjunto diversificado de aplicações em sistemas militares, desde a navegação de veículos até a orientação de mísseis e a estabilização de plataformas, destacando a relevância desses dispositivos em operações táticas e estratégicas.

A análise das tendências e desenvolvimentos recentes nas *IMU* revelou um cenário de constante evolução tecnológica, com sensores *MEMS* avançados, sistemas de fusão de sensores, *IMU* autocalibráveis, dispositivos de baixo consumo de energia e muitos outros avanços. Essas inovações estão moldando o futuro das *IMU*, tornando-as mais eficazes e adaptáveis às demandas em constante mudança das operações militares.

Por fim, cabe destacar a importância crítica das *IMU* em sistemas militares de posicionamento, enfatizando sua relevância estratégica para a defesa e a segurança nacional. À medida que as ameaças e os desafios evoluem, a constante inovação nessa área é fundamental para garantir que as forças armadas estejam preparadas para enfrentar os cenários mais complexos.

5.1. Sugestões para Futuros Trabalhos

É possível concluir que é apropriado a incentivar estudos sobre as tecnologias que abranjam os sensores inerciais, visto que é um assunto somente introduzido para os Oficiais formados pela Escola Naval no Curso de Aperfeiçoamento Avançado.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ítalo D´artagnan. **Metodologia do trabalho científico**. Recife: UFPE, 2021. 51 p. (Coleção Geografia).

BEZERRA, Rodrigo Rodrigues. **Odometria baseada em unidade de medida inercial para andador robótico inteligente**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2022

CAMPOS, Benedito Aloísio Nunes. **Metodologia para análise e mitigação de erros em sistemas de medição inercial utilizando redes neurais artificiais e movimento guiado para calibração de robôs**. UNBM 2021.

CAMPOS, Vítor Calasense de et al. **Avaliação de uma abordagem para aquisição de dados em voo aplicada a uma aeronave radiocontrolada**. UFU, 2022.

CASARIN, Rene Luis. **Desenvolvimento e validação de sensor inercial para análise biomecânica**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2019

DURÃO, Carlos Renato Caputo. **Utilização de Unidades de Medidas Inerciais baseadas em sistemas microeletromecânicos em navegadores integrados**. 2009. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

EL-RABBANY, Ahmed. **Introduction to GPS: The Global Positioning System**. [S. l.]: Artech House, 2002. 176 p. ISBN 1-58053-183-1.

ENGERS, Vitor Diego Dias et al. **Modelagem de ruídos de giroscópios MEMS comerciais para aplicações em navegação inercial**. UFSC, 2021.

GOEL, A. *et al.* An Introduction to Inertial Navigation from the Perspective of State Estimation [Focus on Education]. **IEEE Control Systems**, [S.L.], v. 41, n. 5, p. 104-128, out. 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mcs.2021.3092855>.

GONÇALVES, Ana Cristina Vieira. **Algoritmo de alinhamento em movimento de um Sistema De Navegação Inercial do Tipo Strapdown**. 2017. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Defesa) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.

GREWAL, Mohinder S.; ANDREWS, Angus P.; BARTONE, Chris. G. **Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration**. New York: John Wiley & Sons, 2013. 561 p.

GREWAL, Mohinder S.; WEILL, Lawrence R.; ANDREWS, Angus P. **Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001. 392 p. ISBN 0-471-20071-9.

HARRIS, Simon. **Inertial Guidance: A Brief History and Overview**. Advanced Navigation, 26 jun. 2023. Disponível em: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-guidance-a-brief-history-and-overview/>. Acesso em: 6 out. 2023.

LEITE, Leonardo Kameyama de Castro. **Sistema de navegação inercial baseado na integração de uma IMU de classe tática com um receptor GPS**. Orientador: Dr. Helio Koiti Kuga. 2019. 90 p. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) - INPE, São José dos Campos, 2019.

MACHADO, Vitor Hugo Romão; JÚNIO, Kaio Gonçalves; FARIA, Gabriel dos Santos F. de. Sistema de Navegação Inercial Baseado em IMU. **XVI CEEL**, Universidade Federal de Uberlândia, p. 1-5, 5 a 9 nov. 2018 2178-8308.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 312 p.

MARQUES FILHO, Edmundo Alberto. **Sistema de navegação inercial GPS/SNI de baixo custo com compensação de erros por redes neurais artificiais. Tese de Doutorado**. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2011

MARLAND, P. H. The NATO Ships Inertial Navigation System (SINS). **J. Nav. Eng.**, [s. l.], n. 3, ed. 33, p. 688-700, 1992.

MAVOR, Matthew P.; ROSS, Gwyneth B.; CLOUTHIER, Allison L.; KARAKOLIS, Thomas; GRAHAM, Ryan B. Validation of an IMU Suit for Military-Based Tasks. **MDPI Sensors**, [S. l.], ano 15, v. 20, p. 1-14, 31 jul. 2020.

MIGUENS, Altineu Pires. **Navegação: A Ciência e a Arte**: Navegação costeira, estimada e em águas restritas. 1. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2019. 520 p. v. 1.

MINISTÉRIO DA DEFESA. Exército Brasileiro. **ARSENAL DE GUERRA TESTA SISTEMA DE PONTARIA PARA MORTEIRO PESADO**. Rio de Janeiro: Arsenal de Guerra, 18 maio 2023. Disponível em: https://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiario-do-exercito/-/asset_publisher/U3X7kX8FkEXD/content/id/16590416. Acesso em: 18 set. 2023.

MORI, Anderson Morais. **O uso de sistema inercial para apoiar a navegação autônoma**. 2013. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTANA, Gabriel Goes Aragão. **Uma metodologia de integração e filtragem de dados inerciais para sistemas lineares**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPE, 2019.

SCHMIDT, George T. INS/GPS Technology Trends. **NATO RTO Reports**, Massachusetts Institute of Technology, n. 116, p. 1-18, 2009.

SILVA, Igor dos Santos. **Desenvolvimento de um veículo aquático não tripulado empregado como plataforma de testes de sistemas de navegação**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. UFSC.

VALENTE, Lucas. **Utilização de microcontroladores AVR e sensores no controle de drones**. MACKENZIE, 2020.

VIANA, Renan Manzoni *et al.* **Sistema de calibração de imagens digitais adquiridas de câmeras não métricas acopladas em drones**. UNIPAMPA, 2023.

FALCK, A.; WAeyTENS, K. (2015). **GPS Spoofing and Detection**. In Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation (pp. 1243-1255). ION.

GUTT, S.; LO, S. M. (2019). **Robust navigation with enhanced Loran-C**. In Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019) (pp. 3032-3040). ION.

HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; LICHTENEGGER, Herbert; COLLSNI, James. **Global Positioning System Theory and Practice**. 5. ed. [S. l.]: Springer, 2001. 382 p. ISBN 978-3-211-83534-0.

KAPLAN, Elliott D.; HEGARTY, Christopher J. **Understanding GPS: Principles and Applications**. 2nd. ed. [S. l.]: ARTECH HOUSE, 2006. 707 p. ISBN 1-58053-894-0.

LO, S. M.; UGUEN, B. (2015). **Enhanced Loran**. In **Advanced Satellite Communications** (pp. 271-285). InTech.

RIZOS, C.; FISHER, P. (2008). **GPS for Geodesy**. Springer.

TEUNISSEN, Peter J. G.; MONTENBRUCK, Oliver. **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. [S. l.]: Springer, 2017.