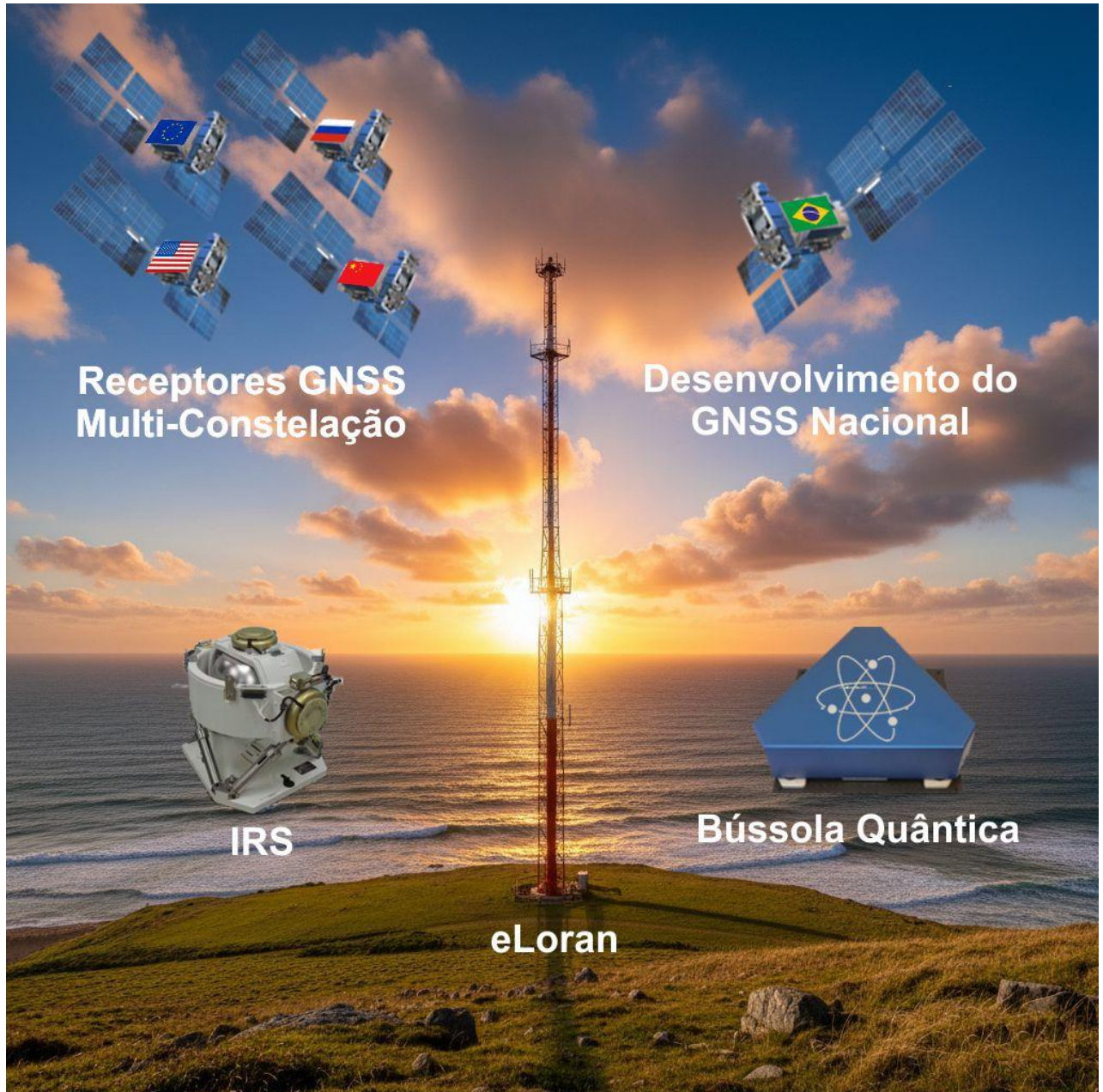


# SISTEMAS ALTERNATIVOS PROVEDORES DE POSIÇÃO, NAVEGAÇÃO E TEMPO (PNT)



**CARLOS NORBERTO STUMPF BENTO**  
Capitão de Mar e Guerra (RM1)

# SISTEMAS ALTERNATIVOS PROVEDORES DE POSIÇÃO, NAVEGAÇÃO E TEMPO (PNT)

*Em um mundo onde os céus podem nos trair, a própria  
Terra pode nos estabilizar.*

*Eliza Tilde Vaughn<sup>1</sup>*

## A VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE (GNSS)

Os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems* - (fig. 1)<sup>2</sup> estão cada vez mais inseridos nos mais diversos aspectos da vida humana e sua aceitação cresce a cada dia, transformando-os em uma utilidade pública em escala global. Esses sistemas, devido à sua alta precisão, estabilidade, cobertura global 24 horas por dia e imunidade às condições ambientais, aliadas à sua facilidade de uso, vêm rapidamente se fazendo onipresentes com o desenvolvimento de aplicações em telecomunicações, redes de dados, distribuição de energia, sistemas de back-up, sistemas financeiros e nos transportes terrestre, aéreo e aquaviário, provendo informações precisas de Posição, Navegação e Tempo (PNT). Os GNSS também estão presentes no campo militar, equipando veículos e armamentos diversos.

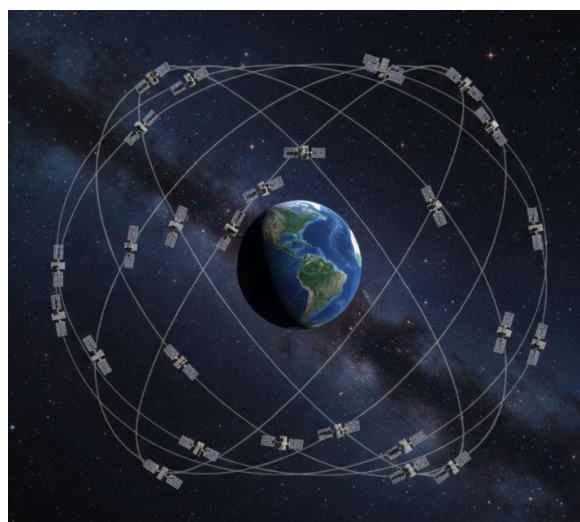


Figura 1 - Constelação de um GNSS

Apesar de suas vantagens, uma possível interrupção do sinal GNSS pode causar prejuízos globais incalculáveis.

Há cerca de 40 anos, os conceitos básicos desse tipo de sistema foram definidos por um pequeno grupo de oficiais estadunidenses, sendo inicialmente concebido como um sistema de navegação e direcionamento de armas altamente

---

<sup>1</sup> Autora do artigo “Um Sinal da Terra: Por Que a América Precisa Reviver o eLoran”.

<sup>2</sup> A maioria das ilustrações do presente trabalho foi elaborada ou alterada pelo autor com auxílio de aplicativos de Inteligência Artificial e dos editores gráficos Corel Draw e Photo Paint.

sigiloso denominado NAVSTAR – *Global Positioning System* (GPS). Os seus satélites foram posicionados em uma órbita elevada a cerca de 20.200 km de altitude e o seu segmento de controle em terra foi distribuído por estações de monitoramento e controle ao redor do globo<sup>3</sup>, que foram projetadas para resistir até a ataques militares. Tal robustez, porém, tornou-se questionável em face dos sinais dos satélites, transmitidos em alta frequência com uma potência menor que 100 watts, chegarem à superfície da Terra com uma energia muito baixa. A potência do sinal que chega ao receptor na Terra é da ordem de  $-125$  dBm a  $-130$  dBm, ou seja, trilhões de vezes mais fraco que a energia de uma lâmpada comum. Tão fraco que costuma ser comparado a algo ainda mais tênue do que a luz de uma vela vista da Lua com telescópios especiais. Isso significa que o sinal é mais fraco que o ruído de fundo eletrônico em muitos dispositivos, e só pode ser detectado graças a técnicas de correlação e processamento digital. Os sinais de um GNSS, portanto, estão sujeitos a sinais de interferência, que, caso sejam fortes o suficiente, podem sobrepor-se aos do GNSS ou sobrecarregar o receptor, tornando-o ineficaz.

Ironicamente, isso é um resultado direto do propósito original do sistema de fazer com que os sinais dos satélites fossem extraordinariamente difíceis de serem captados e utilizados por terceiros, empregando uma combinação de potência muito baixa do sinal transmitido e técnicas de ocultação do sinal. Ademais, essa baixa



Figura 2 - Interferências intencionais no sinal dos GNSS

<sup>3</sup> Hoje, o segmento de controle (ver figura 9) está tendendo a ser passado para os próprios satélites com pouca dependência de estações em terra.

potência era desejável para garantir uma longa duração da bateria, aumentando a vida orbital dos satélites. E essa concepção permanece inalterada até hoje.

Os demais GNSS como o GLONASS russo, o BeiDou chinês e o Galileo europeu, possuem características semelhantes, fazendo com que também estejam sujeitos, além de falhas técnicas, condições ambientais e interferências não intencionais, a interferências intencionais (fig. 2) em relação ao sinal dos satélites, onde se destacam:

**NEGAÇÃO** - Quando o operador do GNSS estabelece uma disponibilidade seletiva<sup>4</sup> ou negação regional do sinal.

**BLOQUEIO** (*Jamming*) - Impedimento da recepção do sinal em determinada área.

**FALSIFICAÇÃO** (*Spoofing*) - Envio de dados enganosos que podem alterar intencionalmente a posição de um avião, navio ou qualquer outro veículo sem que o condutor ou operador perceba. E nesse aspecto, ela é geralmente pior do que o bloqueio, pois em vez de ausência de informação, ela pode fornecer informações perigosamente enganosas.

No meio militar, é uma preocupação das forças aéreas, terrestres e navais os resultados obtidos em exercícios realizados nas costas leste e oeste dos EUA, onde foram utilizados bloqueadores de alta potência que causaram bloqueio do sinal GPS a uma distância de 350 milhas náuticas desde a superfície até uma altitude de 12 quilômetros.

Os fabricantes de tecnologias de recepção de sinais de satélites sempre focaram os seus esforços na melhoria da sensibilidade dos receptores, deixando a sua robustez e resiliência em segundo plano. As vulnerabilidades dos sinais dos GNSS só vieram a público em 2001, quando usuários civis do GPS foram alertados de que o sistema havia se mostrado vulnerável à interferência de transmissões de baixa frequência mais potentes. A partir de então, vários relatos de interferência intencional ou acidental aumentaram significativamente. O uso criminoso de aparelhos teve início com o bloqueio do sinal dos sistemas de rastreamento de caminhões que utilizam bloqueadores GPS portáteis de baixo custo, visando o roubo dos veículos e de sua carga, fazendo proliferar no mercado bloqueadores de sinal portáteis (fig. 3)

---

<sup>4</sup> A Disponibilidade Seletiva” (modo S/A - *Selective Availability*) do GPS, consistia em uma proposital degradação introduzida na qualidade dos dados transmitidos pelos satélites, sendo que somente os receptores militares dos EUA não eram afetados. Foi desabilitada no ano 2000.

bem como detectores desse tipo de equipamento<sup>5</sup>. Facções criminosas também já começam a dominar a tecnologia de drones e de interferência em seus sinais GNSS.

Nas operações militares, o GPS vem sofrendo bloqueio e falsificação de seus sinais, principalmente nas

proximidades dos territórios da Rússia, Ucrânia e da Coreia do Norte, nas áreas em conflito no Oriente Médio e na área em disputa no Mar do Sul da China.

A Rússia e a China estão integrando o GLONASS e o BEIDOU, sistemas que já oferecem maior quantidade de satélites disponíveis (em 130 dos 195 países cobertos) que o GPS e o GALILEO juntos, e maior resiliência. O próprio BEIDOU atual já oferece maior precisão que o GPS no Mar do Sul da China e seus satélites, por serem mais novos, já possuem um sinal de maior potência, menos vulnerável a interferências. A Coreia do Norte, que já interfere nos sinais GPS da Coreia do Sul, e o Irã, evidentemente, tendem a se tornar clientes desses GNSS.

Algumas medidas foram tomadas na modernização de novos satélites GPS colocados em órbita, mas todos beneficiando apenas receptores militares, deixando vulneráveis os outros 99% de seus usuários. O Japão, Coreia do Sul e Austrália, principais aliados militares dos EUA no Pacífico, estão tendo que conviver com as vulnerabilidades da dupla GPS e GALILEO (este de uso civil) em suas regiões, onde a dupla GLONASS e BEIDOU oferece maior cobertura, precisão e resiliência.

A vulnerabilidade dos GNSS fica ainda mais alarmante quando constatamos um aumento da ocorrência de interferências não intencionais ao redor do mundo e a capacidade dos EUA, Rússia e China de destruir satélites no espaço, como já fizeram com alguns de seus próprios satélites (fig. 4).



Figura 3 - Bloqueador de GPS portátil

---

<sup>5</sup> No Brasil, o uso ou a comercialização de bloqueadores de GPS é proibido pela ANATEL. Bloquear ou interferir em sinais de comunicação sem autorização é considerado uma prática ilegal, de acordo com a Resolução nº 506/2008, que regula o uso de equipamentos de radiocomunicação.

Em um ambiente tenso gerado pelas atuais crises geopolíticas na Ucrânia, em Israel, no Irã, no Iêmen, em Taiwan e entre as duas Coreias, onde se tem evidenciado a importância da guerra cibernética nos conflitos modernos, o



Figura 4 - Destruição de satélites GNSS no espaço

Ocidente aparenta viver em uma situação de tranquilidade e segurança ilusórias em relação à resiliência de seus sistemas vitais, principalmente os de fornecimento de energia elétrica, de troca de dados, e de informações transmitidas por satélites.

Em paralelo à possibilidade de ataques cibernéticos a sistemas em terra e ataques físicos a cabos submarinos, que conduzem cerca de 90% das informações da Internet, que já causam muita apreensão, a interferência nos sinais dos GNSS pode afetar todos os sistemas que dependem de Posição, Navegação e Tempo (PNT) e criar grandes desafios e riscos para a aviação, o transporte marítimo e outros serviços essenciais em todo o mundo.

Alguns eventos históricos também nos trazem muitas preocupações. Em 1859, uma tempestade solar – o Evento Carrington – incendiou linhas telegráficas e pintou auroras em baixas latitudes. Se tal tempestade nos atingisse hoje, poderia inutilizar satélites GNSS por meses. Em 1962, um teste nuclear de alta altitude chamado *Starfish Prime* ocorreu nos céus do Pacífico, onde seu pulso eletromagnético apagou as luzes no Havaí e inutilizou satélites que não foram construídos para resistir a tamanha energia. Alguns eventos desse tipo em nossa era de dependência dos satélites fariam desaparecer os GNSS. Em 2022, a Rússia lançou o Kosmos 2553. Analistas dos EUA o associaram a pesquisas que apoiam uma capacidade nuclear potencial



Figura 5 - Dependência mundial dos GNSS

antissatélite, não havendo, porém, evidências públicas de que ele carregasse uma arma. Porém, o episódio ressalta um futuro desestabilizador onde as grandes potências brincam com ferramentas capazes de cegar não apenas as forças inimigas, mas civilizações inteiras que dependem dos GNSS.

Outro aspecto é que, hoje, as pessoas, muito acostumadas à utilização do posicionamento e navegação por GNSS, dificilmente percebem o quão suas vidas cotidianas também são dependentes de medições de tempo precisas e confiáveis. Sistemas de infraestrutura crítica operando nos setores financeiro, de telecomunicações, energia, saúde e transporte não podem funcionar adequadamente sem sinais de tempo precisos, cuja falha pode ter consequências sérias, com implicações potenciais, incluindo perda econômica, segurança reduzida e perda de vidas humanas. No Ocidente, as principais fontes de sincronização de tempo desses sistemas são os sinais transmitidos por satélites GPS, o que compreensivelmente levou a preocupações sobre nossa dependência desse sistema, que continua se expandindo e não dispondo de serviço de PNT alternativo implementado, fazendo a sua confiabilidade diminuir em face do aumento das ameaças e interferências reais, que vem aumentando tanto em frequência quanto em duração. Sem o serviço de PNT prestado pelo GPS, grande parte da vida moderna seria gravemente afetada com o comprometimento de diversos sistemas críticos e de segurança, cortes de energia prolongados, nenhum sinal de celular, usuários sem WhatsApp, UBER, Google Maps, Waze, IFood etc. (fig. 6).



Figura 6 - Smartphone sem sinal GPS

Essas vulnerabilidades também preocupam o campo econômico, onde se trava uma verdadeira guerra comercial mundial pela disputa do segmento de PNT, inclusive no imenso mercado de telefonia móvel, onde causa apreensão a alocação de espaço no espectro da banda L em redes nacionais 5G de baixa potência, que é a mesma banda dos GNSS, podendo gerar interferências que, se nas comunicações podem não ser tão ruins, para a navegação terrestre, aérea e aquaviária certamente

serão. Nesse cenário, também é possível ocorrer ataques a infraestruturas críticas de vários países dependentes dos sinais dos GNSS, podendo gerar um complexo problema econômico e de segurança nacional em nível global.

Principais setores afetados pela interferência no sinal dos GNSS nas suas funções críticas de localização, navegação e sincronização:

Transporte e logística:

Caminhões, navios e trens utilizam o GNSS para rastreamento em tempo real, rotas otimizadas e controle de frotas, e empresas de entrega dependem do GNSS para garantir precisão nas estimativas de chegada e localização de pacotes.

Aviação:

Aeronaves comerciais e privadas utilizam o GNSS para a navegação aérea, pousos assistidos e rotas seguras, e o controle de tráfego aéreo depende dele para coordenar voos com precisão.

Agricultura de precisão: tratores e máquinas agrícolas utilizam o GNSS para plantio, pulverização e colheita com alta exatidão, e o monitoramento de terrenos e gestão de recursos naturais são feitos com base em dados georreferenciados.

Urbanismo e construção civil: Engenharia civil e topografia utilizam o GNSS para mapeamento de terrenos, obras e infraestrutura. A construção de estradas e pontes também exige posicionamento preciso para alinhamento e segurança.

Telecomunicações: Sistemas de redes móveis e internet utilizam o GNSS para sincronização de tempo entre torres e servidores, e operadoras de telefonia dependem dele para garantir estabilidade e cobertura de sinal.

Segurança pública e defesa: Polícia, bombeiros e ambulâncias utilizam o GNSS para localização rápida e resposta eficiente, e as Forças Armadas dependem dele para operações táticas, navegação e coordenação de tropas.

Operações Militares: Os sinais do GPS vêm sendo bloqueados em todo o planeta, mais especialmente perto de zonas de conflito. Nas últimas duas décadas, tais interferências têm sido conduzidas por militares visando defender locais sensíveis contra os ataques de drones e mísseis ou mascarar suas próprias atividades.

Os países bálticos acusam a Rússia de bloquear os seus espaços aéreos e o Oriente Médio tornou-se região focal de interferências. Pesquisadores da Universidade do Texas descobriram que uma das principais fontes de falsificação de sinais é uma base aérea israelense, que, em paralelo à sua tarefa de bloquear os

sinais para os foguetes do Irã e de grupos terroristas, acaba afetando os voos comerciais na região (fig.24).

O Galileo já possui a capacidade de autenticar seus sinais, garantindo que eles sejam reais, e o BeiDou possui o maior número de satélites. Enquanto esses GNSS e o GLONASS se modernizam, o GPS não tem um sistema de apoio civil e os EUA estão ficando para trás nessa nova competição no espaço, com os satélites GPS ficando desatualizados, muitos excedendo a vida útil projetada de 8 a 15 anos, e com um lento processo de substituição. Novas tecnologias estadunidenses estão em desenvolvimento, mas pode demorar anos até que sejam amplamente implementadas.

Na Ucrânia, muitas munições guiadas por satélite fabricadas nos EUA não resistiram à tecnologia de interferência russa, levando Kiev a parar de empregar certos tipos de armamentos fornecidos pelo ocidente depois que as suas taxas de eficácia despencaram.

Em 2018, o Congresso dos EUA promulgou uma legislação que exige que o Departamento de Transportes estabeleça um sistema de sincronização terrestre para auxiliar o GPS. No entanto, a responsabilidade altamente difusa pelo PNT civil dentro da administração e a ausência de uma ampla demanda pública por soluções resultaram em pouco progresso. Ao mesmo tempo, o principal adversário dos Estados Unidos, a China, estabeleceu uma arquitetura de PNT altamente eficaz e resiliente que inclui múltiplas constelações de satélites, transmissão terrestre com centenas de estações de temporização sincronizadas conectadas por 20.000 quilômetros de fibra óptica.

O problema já não é mais de disponibilidade, mas sim de confiança. Em 2015, a Cúpula de Liderança em PNT dos EUA retornou ao mesmo ponto crucial: a certeza de uma única fonte de informação entrou em colapso diante de ameaças baratas, engenhosas e fáceis de interferir no GPS e que se aprofundaram na automação e na sincronização. A gestão do PNT nos EUA está fragmentada e a solução não é declarar o GPS "quebrado", mas sim parar de exigir que uma única modalidade carregue sozinha a confiança nacional.

Um estudo de 2019 patrocinado pelo governo dos EUA examinou o impacto econômico da perda do GPS, concluindo que uma interrupção do sistema custaria à economia nacional US\$ 1 bilhão por dia. Embora, à primeira vista, esse valor pareça alto, representa uma redução de menos de 1,7% no Produto Interno Bruto (PIB) do

país. Em comparação, uma queda de energia elétrica em 2021 no Texas custou US\$ 28 bilhões por dia e 57 vidas ao longo de uma semana. Contudo, no caso do GPS, é difícil prever e estimar com precisão os danos causados por grandes perturbações sociais decorrentes, já que muitas consequências impactantes não podem ser quantificadas. No mundo ocidental, os sinais GNSS foram incorporados em praticamente todas as infraestruturas e na maioria das aplicações de TI. As dependências e interligações são tão numerosas, complexas e intrincadas que uma avaliação quantitativa completa dos impactos também é inviável.

Os usuários GNSS do setor marítimo aparentam ter uma falsa percepção de que o sinal estará sempre disponível. O Relatório sobre os Impactos da Interferência do GNSS na Segurança Marítima, elaborado pelo Grupo de Trabalho *Royal Institute of Navigation* do Reino Unido (RIN), analisou como a interferência nos sinais de navegação por satélite afeta aquele setor. O estudo reuniu dados de mais de 100 especialistas e 300 capitães, além de entrevistas com profissionais ligados às operações e à cadeia de suprimentos de embarcações que sofrem com esse problema. Em 2025, houve registros de colisões e encalhes atribuídos a essas falhas em áreas como o Mar Báltico, o Estreito de Ormuz e o Mar Vermelho. O relatório mostra que centenas de embarcações modernas são afetadas diariamente, expondo vulnerabilidades de cibersegurança e riscos sérios à navegação, ainda mais que receptores GNSS estão integrados aos sistemas críticos dos navios modernos, incluindo os sistemas de segurança.

Outro aspecto importante é que diversos países possuem legislação que criminaliza ou pune a interferência em sinais GNSS, incluindo Estados Unidos, União Europeia, Reino Unido, Rússia e China. No Brasil, a ANAC e a Anatel tratam o tema como questão de segurança operacional e de telecomunicações, mas ainda com caráter mais regulatório do que penal direto, o que motiva ainda mais a procura por fontes alternativas de PNT.

No Brasil, tensões diplomáticas recentes levantaram a possibilidade de negação do sinal GPS pelos EUA, onde ficou mais uma vez evidente que a dependência excessiva de um único sistema de PNT pode comprometer a segurança nacional e a continuidade de serviços essenciais.

## SISTEMAS ALTERNATIVOS DE PNT

A seguir serão descritas e analisadas algumas possíveis soluções alternativas e resilientes em relação aos atuais GNSS.

### 1 - SISTEMAS ESPACIAIS

#### 1.1 - Receptores GNSS Multi-constelação

Atualmente, já existe uma disponibilidade de utilização de vários GNSS, que já operam em conjunto por meio de receptores multi-constelação e que já disputam acirradamente o mercado mundial de usuários, principalmente na área de telefonia móvel (fig. 7).

Apesar da disponibilidade crescente de GNSS estrangeiros compatíveis ser um benefício para diversas atividades, uma preocupação é que as suas transmissões individuais adicionadas dentro da banda GNSS têm o efeito colateral indesejável de elevar o ruído ambiente que, aliado à crescente hiperatividade das condições ionosféricas, contribui ainda mais para a degradação dos sinais dos satélites.

Além disso, o uso de vários GNSS ao mesmo tempo, apesar de proteger um pouco os usuários caso um dos sistemas negue o seu sinal, tenha uma falha de equipamento ou sofra um ataque cibernético, nenhum deles está imune ao bloqueio e falsificação de seus sinais, oferecendo, portanto, resiliência e segurança adicional marginal.

Receptores híbridos que utilizam o sinal de estações em terra para aumentar a precisão do GNSS, como o GNSS Diferencial (DGNSS) na navegação marítima e estações totais RTK e robóticas em levantamentos topográficos, também estão sujeitos a tais ameaças.

Algumas medidas tecnológicas estão em desenvolvimento visando aumentar a resistência dos receptores GNSS a interferências, tais como:

1) Desenvolvimento de GNSS antibloqueio. Apesar de ser uma boa solução inicial, é impraticável a construção de um receptor com proteção total contra bloqueio



Figura 7 - Receptores GNSS Multi-constelação

do sinal, além de tal concepção poder contribuir para uma escalada de potência dos bloqueadores.

2) Aumento da potência do transmissor dos satélites. A nova geração de satélites GPS III já é capaz de direcionar maior potência sobre a superfície da Terra onde tenham sido detectados bloqueadores. Porém, o aumento da potência de transmissão dos satélites atualmente em órbita seria impraticável ou extremamente dispendioso.

3) Tecnologia Anti-falsificação: Disponível apenas para as Forças Armadas dos Estados Unidos da América (EUA), o “M-Code” é praticamente imune à falsificação devido à sua criptografia forte.

## **1.2 - GNSS Nacional**

Como vimos, o GPS foi lançado com a denominada “Disponibilidade Seletiva” (modo S/A - *Selective Availability*) do sistema, que consistia em uma proposital degradação introduzida na qualidade dos dados transmitidos pelos satélites, sendo que somente os receptores militares dos EUA não eram afetados. No ano 2000, o Departamento de Defesa dos EUA desabilitou completamente o modo S/A, o que permitiu um aumento muito significativo da precisão do sistema para uso civil, na ordem aproximada de 45 para 10 m. Em contrapartida, entrou em vigor o conceito de “Negação Regional” (*Regional Deniability*), que, na prática, consiste em uma eventual degradação voluntária do sinal GPS em determinadas regiões, de acordo com os interesses políticos ou militares dos EUA.

Em 1996, a China realizava exercícios militares próximos a Taiwan, disparando mísseis como demonstração de força. Na época, ela ainda dependia do GPS para guiar seus armamentos. Os EUA teriam negado o sinal GPS na região, o que fez a China perder o rastreamento de dois mísseis lançados contra alvos próximos à ilha de Taiwan, o que foi considerado um fracasso militar humilhante para a China, pois expôs sua vulnerabilidade tecnológica diante dos EUA. Tal episódio demonstrou como os GNSS também podem ser utilizados como instrumentos de poder militar e político. A partir dessa experiência, a China decidiu que nunca mais dependeria do GPS dos EUA, assim nascendo o GNSS chinês. Inicialmente denominado Compass, em 2012 já cobria toda a Ásia e o Pacífico. A partir de 2020, se tornou um GNSS rival direto do GPS. Com a mesma preocupação, a Rússia (GLONASS) e a União Europeia

(Galileo) desenvolveram seus próprios GNSS. A Índia e o Japão avançam com seus próprios Sistemas de Navegação Regional por Satélite denominados NavIC e Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), respectivamente, com vistas a se tornarem sistemas globais.

O Brasil utiliza o GPS desde a disponibilização global de seus sinais. Uma de suas principais aplicações ocorreu por ocasião do Levantamento da nossa Plataforma Continental (LEPLAC) no período de 1987 a 1996, onde ainda vigorava a disponibilidade seletiva do sinal, permitindo uma precisão de cerca de 100 metros para equipamentos não estadunidenses, mas que atendeu perfeitamente aos requisitos necessários para aquela empreitada.

Recentemente, as informações sobre a possibilidade de negação do sinal do GPS pelos EUA, em forma de sanção contra o Brasil, despertaram as mesmas preocupações sobre a excessiva dependência de um país em relação àquele sistema fornecedor de PNT.



Figura 8 – GNSS Nacional

Em julho de 2025, o governo brasileiro iniciou um estudo de viabilidade para desenvolver um sistema nacional de geolocalização por satélite. O projeto é liderado por um grupo técnico com representantes da Aeronáutica, Agência Espacial Brasileira (AEB) e ministérios. A iniciativa visa fortalecer a soberania tecnológica e reduzir vulnerabilidades relacionadas a falhas ou interferências no sinal do GPS.

Como projeto inicial, visando cobrir apenas o território brasileiro, não seria necessário replicar constelações dos GNSS com 24 ou mais satélites (fig. 1) e estações de monitoramento e controle distribuídas por todo o globo (fig. 9). Um sistema regional como o QZSS japonês ou NavIC indiano com 7 satélites, já garantiria cobertura nacional confiável. Inspirando-se no sistema indiano, o sistema nacional

poderia ser composto por 3 satélites em órbita geoestacionária (GEO) e 4 satélites em órbita geossíncrona inclinada (IGSO), garantindo uma precisão máxima de 2 metros.



Figura 9 - Estações de Controle e Monitoramento do GPS

O estabelecimento de cerca de 3 a 5 estações de controle e 12 a 24 de monitoramento já atenderia ao sistema, aproveitando, inclusive, a estrutura já montada para acompanhamento de satélites de coleta de dados e de recursos terrestres conduzido pelo nosso Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), onde se destacam as estações de São José dos Campos-SP, Cuiabá-MT e Alcântara - MA.

Nesse cenário, o fortalecimento do Programa Espacial Brasileiro se torna essencial para a viabilização de um sistema nacional. Como parte da Operação Spaceward 2025, um projeto que pretende inserir o país na rota dos lançamentos comerciais, concorrendo com gigantes como Estados Unidos, Europa e China, houve uma primeira tentativa de lançamento do foguete sul-coreano HANBIT-Nano do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) em 25 de dezembro de 2025. O foguete, porém, explodiu pouco após decolar do CLA, no Maranhão. A falha, identificada cerca de 30 a 50 segundos após o lançamento não tripulado, ocasionou a queda do veículo, que levava satélites e experimentos, sem causar vítimas. Apesar de malsucedida<sup>6</sup>, a tentativa já demonstra a importância estratégica para o nosso Programa Espacial, já que ele será capaz de transportar pequenos satélites, experimentos científicos e

<sup>6</sup> O Japão, apesar de ter realizado com sucesso cinco lançamentos de foguetes H3 do seu programa QZSS, já teve duas tentativas fracassadas. Uma em 2023, e outra, mais recentemente, em 22 de dezembro de 2025, três dias antes do lançamento do foguete Hanbit-NANO em Alcântara.

cargas úteis essenciais para pesquisas e aplicações como comunicação, observação terrestre e estudos tecnológicos (fig. 10).



Figura 10 - Lançamento do foguete HANBIT-Nano e sua explosão em Alcântara - MA

Apesar da importância de se dispor de um sistema nacional de PNT por satélites, com natural processo de evolução para um GNSS, ele estaria imune apenas a falhas e negação de sinais dos demais GNSS, ficando ainda sujeito ao bloqueio e falsificação de seus sinais.

### 1.3 - STARLINK

A Starlink é uma constelação de satélites em órbita baixa, criada para fornecer internet de alta velocidade com baixa latência, alcançando regiões remotas e usuários em movimento. Seus satélites orbitam a cerca de 550 km da Terra<sup>7</sup>, muito mais próximos do que os satélites GPS, o que garante sinais mais fortes e menos sujeitos a interferências (fig. 11).

Além da função principal de conectividade, os sinais da Starlink podem ser aproveitados como uma alternativa para serviços de Posicionamento, Navegação e Tempo (PNT), oferecendo potencial para complementar ou servir como camada



Figura 11 – Constelação Starlink

<sup>7</sup> Atualmente, a constelação Starlink conta com mais de 10.000 satélites em órbita baixa da Terra, meta atingida em outubro de 2025 e que continua crescendo com novos lançamentos regulares da SpaceX.

de backup ao GPS em situações críticas.

Pesquisas já demonstraram que é possível calcular posição e tempo a partir desses sinais com precisão de nível metro, em alguns casos superior ao GPS, embora essa capacidade ainda não seja oficial e dependa de regulamentações e padronização. Diferente do GPS, que é estatal, a Starlink pertence à SpaceX, o que levanta questões de soberania e segurança.

Como vantagem, os satélites em órbita baixa fornecem maior potência de sinal e relógios precisos para referência temporal; como desvantagem, seu rápido movimento exige algoritmos sofisticados para acompanhar a posição.

Assim, no curto prazo, a Starlink deve ser vista como uma solução complementar ao GPS, capaz de aumentar a resiliência contra falhas e ataques, mas ainda em fase de desenvolvimento.

## **2 - SISTEMAS AUTÔNOMOS**

### **2.1 - Sistema de Navegação Inercial (INS)**

Um sistema de navegação inercial (IRS) funciona medindo continuamente acelerações e rotações com sensores internos (acelerômetros e giroscópios), permitindo calcular posição, velocidade e orientação sem depender de sinais externos como os dos GNSS.

A partir de uma posição conhecida, os acelerômetros medem a aceleração linear em cada eixo e os giroscópios medem a velocidade angular (rotação). A aceleração é matematicamente integrada para obter a velocidade e a velocidade é integrada para obter a posição. Algoritmos como o Filtro de Kalman combinam os dados, ponderando a confiança em cada sensor e gerando uma estimativa otimizada.

O sistema não depende de rádio, satélite ou referências externas, calculando tudo internamente a partir das suas medições, fornecendo posição relativa contínua.

Suas principais aplicações são em aeronaves e mísseis, permitindo a navegação mesmo em ambientes com ausência ou interferência no sinal GNSS, onde esses vetores são guiados pelo INS até as imediações aproximadas de seus alvos, quando então são acionados os seus sensores radar, infravermelho, óticos etc., visando atingi-los com a máxima precisão e eficácia possível.

Navios e submarinos também utilizam a navegação inercial. No caso dos submarinos, que submersos nunca dispõem dos sinais dos GNSS, calibram o sistema com eventuais vindas discretas à superfície ou cruzando informações de cartas isobatimétricas, magnetométricas e gravimétricas, caso disponíveis na área de operação. Carros de combate e veículos militares também utilizam essa tecnologia para posicionamento e navegação em terrenos muito acidentados.

A principal limitação de um INS é a deriva, onde pequenos erros nas medições se acumulam ao longo do tempo, tornando o sistema menos preciso que um GNSS, sendo necessária, quando possível, a sua combinação com o sinal GNSS para correção dessa deriva. Além disso, os giroscópios e acelerômetros necessitam ser calibrados regularmente visando a redução de erros.

A Marinha do Brasil (MB) utiliza sistemas híbridos de navegação (INS + GPS) em navios e submarinos, empregando IMUs (Unidades de Medida Inercial) para navegação em ambientes sem sinal GPS. O Exército Brasileiro (EB), por meio do CTEEx (Centro Tecnológico do Exército), com apoio do IME (Instituto Militar de Engenharia), desenvolveu o SNIDR (Sistema de Navegação Inercial para Dinâmicas Rápidas) com aplicação em mísseis anticarro e sistemas táticos de curto alcance. A Força Aérea Brasileira (FAB) já utiliza INS avançados em suas aeronaves militares como o Gripen e o KC-390, integrados com o GPS e outros sensores, com sistemas embarcados já operando com giroscópios a laser ou fibra óptica, com alta precisão e baixa deriva.

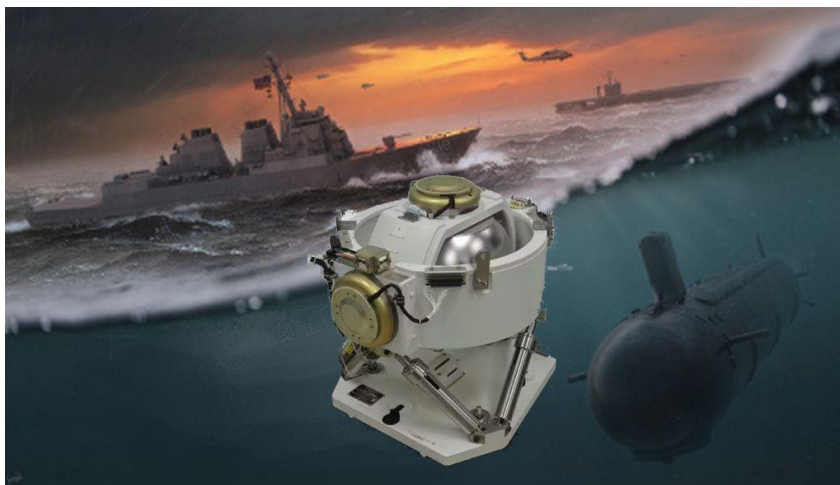


Figura 12 - Sistema de Navegação Inercial WSN-12 da Marinha dos EUA

Na década de 1980, a Sperry Marine desenvolveu a tecnologia de giroscópio a laser de anel do sistema de navegação inercial WSN-7 para gerar PNT confiável (A-PNT) em navios da Marinha dos EUA. O sistema de laser de anel substituiu os giroscópios de massa rotativa mais antigos, utilizados há muito tempo na navegação marítima. Em junho de 2022, aquela Marinha concedeu à Northrop Grumman um contrato de produção em larga escala para o sistema de mísseis balísticos WSN-12, que substitui o giroscópio a laser de anel por um de fibra óptica. Após testes bem-sucedidos a bordo, o WSN-12 vem sendo instalado a bordo de cruzadores, contratorpedeiros, navios-aeródromo e submarinos de ataque (fig. 12).

Os dados de navegação do WSN-12 também estão sendo integrados ao Sistema Eletrônico de Exibição de Cartas Náuticas e Informações (ECDIS) da Northrop Grumman, da Marinha dos EUA, visando a navegação oceânica e costeira. Tal concepção de ECDIS (ECDIS Navy) já opera independentemente do posicionamento GPS, navegando em tempo real em águas restritas por meio de linhas de posição visuais e radar, plotadas automaticamente na tela do ECDIS, sem a necessidade de anotadores e plotadores.

## **2.2 - PNT Quântico**

A maior promessa das tecnologias quânticas para o PNT é a criação de Sistemas de Navegação Inercial (INS) baseados em sensores quânticos.

Sensores quânticos exploram as propriedades da mecânica quântica, como a superposição e o entrelaçamento, para medir grandezas físicas com uma precisão extraordinária, reduzindo drasticamente a deriva característica dos INS atuais.

Acelerômetros e Giroscópios Quânticos (Interferômetros Atômicos) utilizam nuvens de átomos resfriados a laser a temperaturas próximas do zero absoluto. Ao manipular esses átomos com pulsos de laser, eles podem medir aceleração e rotação com uma sensibilidade milhares ou milhões de vezes maior do que os sensores clássicos. Um submarino, uma aeronave ou até mesmo um smartphone do futuro poderia navegar por dias, semanas ou meses sem qualquer sinal externo, acumulando um erro de apenas alguns metros, tornando-se o "Santo Graal" da navegação com um PNT extremamente preciso, autônomo e totalmente independente de sistemas externos.

A computação quântica também impulsionará a próxima geração de relógios atômicos. Relógios quânticos ópticos já demonstram uma precisão que perderia

apenas um segundo em bilhões de anos (a idade do universo). Isso não só melhora a componente "T" (Tempo) do PNT, mas também a precisão dos próprios GNSS, que dependem fundamentalmente de tempo preciso.

A segunda grande implicação da computação quântica é uma ameaça direta aos sistemas de PNT que usamos hoje, como o GPS, em que os seus sinais, especialmente os sinais militares criptografados (código P(Y) e código M), são protegidos por algoritmos de criptografia clássica. A computação quântica, por meio de algoritmos como o Algoritmo de Shor, é teoricamente capaz de quebrar muitos dos sistemas de criptografia de chave pública que usamos hoje em uma fração do tempo que um supercomputador clássico levaria. Um adversário com um computador quântico poderia, teoricamente, quebrar a criptografia dos sinais militares de GPS. Isso permitiria bloquear ou falsificar o sinal para um receptor militar. As consequências seriam catastróficas, permitindo enganar mísseis, aeronaves e tropas sobre sua localização real e a confiança em todo o sistema de PNT dos GNSS seria abalada, pois não seria mais possível garantir a autenticidade dos sinais.

A defesa contra essa ameaça também vem da física quântica, através da Distribuição de Chave Quântica (QKD), que utiliza os princípios da mecânica quântica para permitir que duas partes compartilhem uma chave de criptografia secreta com a garantia de que qualquer tentativa de espionagem seria imediatamente detectada. Futuros sistemas de satélite poderiam usar QKD para distribuir chaves criptográficas, criando uma segurança "pós-quântica".

Estamos muito próximos de ver sensores quânticos práticos fora dos laboratórios. A Boeing concluiu o primeiro teste de voo com navegação quântica, permitindo que um avião navegasse sem GPS por quatro horas usando sensores quânticos. A tecnologia, desenvolvida em parceria com a AOSense (fig. 13), utiliza interferometria atômica para maior precisão e confiabilidade, reduzindo



Figura 13 - INS Quântico da AOSense

erros de navegação e operando em ambientes sem GPS. Testes futuros em laboratório avaliarão o desempenho dos sensores sob diferentes condições ambientais.

Um sistema denominado HARLEQUIN foi testado a bordo do Galatea, um navio de manutenção de boias e faróis do Reino Unido, e demonstrou ser capaz de funcionar em condições reais, fora do ambiente laboratorial. Ele combina elementos convencionais de sistemas de navegação com um acelerômetro quântico de átomos frios. No coração dessa tecnologia quântica está uma fonte de átomos frios gMOT (armadilha magneto-óptica de grade), desenvolvida ao longo de mais de uma década por meio da colaboração entre a Universidade de *Strathclyde* e o CPI TMD

A transição para uso comercial em larga escala desses tipos de sistemas de PNT alternativos ainda depende de superar desafios de miniaturização, custo, robustez e confiabilidade. Além disso, muitos sensores exigem condições extremas, como temperaturas próximas ao zero absoluto, o que continua a limitar aplicações fora de ambientes controlados.

### 2.3 - Sensor de velocidade a laser (LVS)

Em maio de 2025, na Avalon Australian International Airshow, foram apresentados resultados comprovados de um LVS (*Laser Velocity Sensor* - Sensor de Velocidade a Laser), um novo avanço na navegação resiliente, desenvolvido e comercializado pela Advanced Navigation.

O LVS representa uma nova classe de tecnologia de navegação. Ele utiliza lasers infravermelhos para medir diretamente a velocidade 3D de um veículo em relação ao solo, com precisão sem precedentes (fig.14).

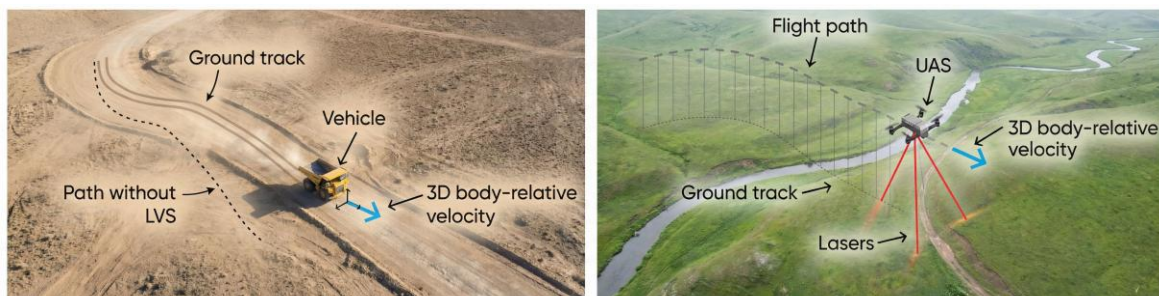


Figura 14 - Princípio de funcionamento do LVS

Para testar suas capacidades, a equipe integrou um LVS de pré-produção com um giroscópio de fibra óptica BoreasD90 INS para testes em condições de

negação ou bloqueio do sinal GPS. Em testes terrestres, foi obtido um erro médio por distância percorrida de apenas 0,053%. Em um voo em aeronave de asa fixa, percorrendo 545 km com um INS de nível tático, o erro final foi de 0,045%.

O sistema não deve ser confundido com o AVL (*Automatic Vehicle Location*), sistema que a Marinha do Brasil implantou para monitorar embarcações em águas interiores, que não possuem AIS, e que também se utiliza do posicionamento por GPS.

### 3 - SISTEMAS EM TERRA

#### 3.1 – NAVSOP

O NAVSOP (Navegação via Sinais de Oportunidade - *Navigation via Signals of Opportunity*) é um sistema desenvolvido pela BAE Systems que utiliza sinais de oportunidade como transmissões comuns presentes no ambiente



Figura 15 - Sistema NAVSOP

para calcular Posição, Navegação e Tempo (PNT). O sistema aproveita centenas de fontes de sinal já disponíveis, como redes Wi-Fi, estações de rádio e TV, torres de telefonia móvel e outros sinais de comunicação civil e militar (fig. 15), fornecendo PNT da seguinte forma:

Posição: determina a localização geográfica do usuário comparando padrões de sinais recebidos.

Navegação: usa a posição atual e dados de mapas/rotas para orientar o deslocamento.

Tempo: sincroniza relógios e sistemas críticos com base em sinais de referência, garantindo precisão temporal.

Como utiliza múltiplas fontes com sinais mais fortes do que os de um GNSS, o sistema é mais resiliente a interferências. O NAVSOP pode, inclusive, operar em

ambientes desafiadores onde o sinal GNSS costuma falhar, como em áreas urbanas densas, subterrâneas ou no interior de edificações, sendo útil também em cenários militares e civis específicos, complementando ou substituindo o GNSS. Evidentemente, o NAVSOP é um fornecedor alternativo de PNT que, apesar de não depender de satélites, depende da diversidade de sinais disponíveis no ambiente e limitado ao alcance dos sinais locais disponíveis. Sua precisão é variável de acordo com a densidade e qualidade dos sinais.

### **3.2 - R-Mode**

O R-Mode é uma tecnologia de navegação alternativa aos GNSS que utiliza sinais de rádio já existentes para fornecer PNT como os seguintes exemplos:

- AIS (*Automatic Identification System* - Sistema de Identificação Automática),
- VDES (*VHF Data Exchange System* - Sistema de Troca de Dados via VHF), e
- Sinais de telecomunicações terrestres, como torres de rádio, de radiofaróis e de estações de referência DGNS que transmitem o sinal de correção diferencial.

Para o Posicionamento e Navegação, ele efetua a medida de tempo de chegada dos sinais de rádio para calcular a posição, semelhante ao GNSS, mas em escala regional. Para o tempo e sincronização, ele fornece referência temporal para sistemas críticos como telecomunicações, energia, bancos etc., podendo servir de substituto ou backup de sincronização temporal dos GNSS. Como não depende de satélites, é menos vulnerável a interferências em seus sinais.

O R-Mode também é menos preciso que um GNSS e eficiente apenas em áreas costeiras e urbanas, sendo especialmente útil em portos, cidades densas e regiões críticas, sendo muito limitado em áreas rurais desprovidas de torres de transmissão.

Já existem receptores R-Mode em fase experimental e protótipos para navegação marítima, como os desenvolvidos pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR), integrando algoritmos de posicionamento em receptores R-Mode. Esses receptores ainda não estão amplamente disponíveis comercialmente, mas testes práticos já demonstraram sua viabilidade como alternativa ou complemento ao GNSS, como no mar Báltico, onde eles alcançaram precisão horizontal de até 12 metros (95% de confiança) quando operando dentro da área coberta por três transmissores R-Mode.

O projeto R-Mode Baltic 2 foi a continuação do R-Mode Baltic e consistiu em expandir e validar o primeiro campo de testes mundial para navegação marítima e terrestre alternativa ao GNSS, envolvendo Alemanha, Suécia, Polônia e Noruega. Seu propósito foi incrementar a segurança marítima no Mar Báltico, região com alto tráfego e muitos acidentes (colisões com o fundo e abalroamentos), desenvolver um sistema terrestre de backup ao GNSS (GPS/Galileo), resistente a falhas e interferências, criar e testar receptores protótipo capazes de integrar sinais R-Mode com os GNSS e estabelecer padrões internacionais para futura adoção global.



Figura 16 - Projeto R-Mode Baltic 2

Esse experimento possibilitou a criação do primeiro campo de testes mundial para navegação terrestre marítima baseada em R-Mode com a instalação de estações costeiras R-Mode em MF e VHF ao redor do sul do Mar Báltico (fig. 16). Podemos perceber que, pela disposição das estações, uma geometria que permite uma excelente triangulação entre elas. Nos testes, foi obtida uma precisão horizontal de até 12 metros (95% de confiança) em áreas cobertas por três transmissores, prova de que o sistema pode ser integrado como backup robusto ao GNSS.

Provavelmente, a mesma geometria entre as estações poderia ser implementada em trechos como os estreitos de Ormuz, Singapura e Gibraltar e nos acessos ao porto de Bergen na Suécia e São Petersburgo na Rússia.

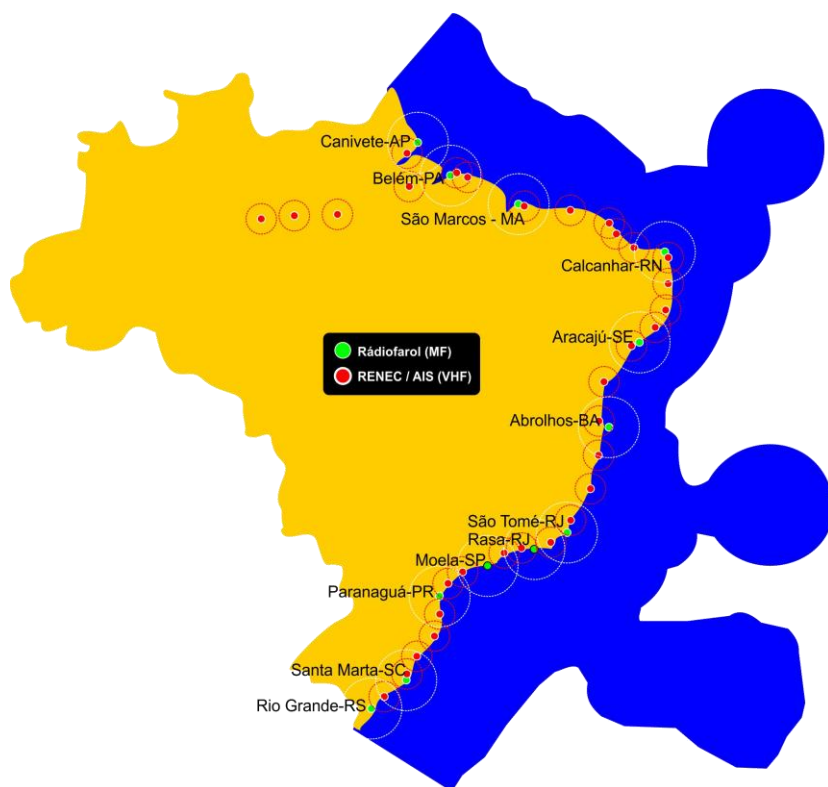


Figura 17 - Rede R-Mode nacional

No Brasil, contudo, como podemos observar no exemplo da figura 17, mesmo aproveitando a infra-estrutura costeira de radiocomunicação, a disposição de estações MF instaladas nos radiofaróis ao longo da nossa costa, não obteria uma geometria favorável no cruzamento entre essas estações e estações VHF da Rede Nacional de Estações

Costeiras (RENEC) transmissoras de Informações de Segurança Marítima (MSI - *Maritime Safety Informations*). Tornar estações receptoras de sinal AIS operadas pela Marinha, também distribuídas ao longo da costa, como parte do SIsGAAz (Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul) em estações transmissoras não solucionaria tal problema. E mesmo que se pudesse utilizar esses sinais, seria necessário adaptar torres e sistemas para a sua implementação, sendo requerida inclusive uma coordenação nacional com investimento em infraestrutura e regulamentação para se tornar viável, com a participação da Marinha, ANATEL e operadoras de telecom.

Apesar disso, a sua implementação em portos estratégicos como Rio de Janeiro-RJ, Paranaguá-PR e Itaqui-MA, por exemplo, seria uma solução interessante caso vingasse uma comercialização internacional de receptores R-Mode, permitindo aos navios terem acesso a dados de posicionamento contínuos, garantindo segurança da navegação, e guindastes, tratores e caminhões, dentro do porto, mantendo a sincronização e localização, operando sem restrições e evitando paralisações.

### 3.3 – NextNavTerraPoint

O NextNav TerraPoiNT é um sistema terrestre de PNT que funciona como alternativa e complemento ao GPS. Ele utiliza uma rede própria de transmissores em terra para fornecer localização precisa, segura e resistente a falhas, especialmente em ambientes urbanos e internos onde o GNSS costuma falhar (prédios, metrô, túneis, e áreas densamente urbanizadas). Os sinais do TerraPoiNT são criptografados e mais difíceis de se interferir. Bombeiros e policiais poderiam ser localizados



Figura 18 - NextNav TerraPoint

dentro de prédios ou áreas densas, onde o GNSS não funciona bem. Garantiria a operação de veículos autônomos e sistemas de logística em ambiente urbano e de embarcações nas águas de determinados portos, além da sincronização de sistemas vitais em caso de interferência no sinal GNSS.

Em testes da União Europeia e do Departamento de Transporte dos EUA, o TerraPoiNT foi considerado uma das soluções mais maduras e eficazes para oferecer PNT alternativo. A integração da tecnologia TerraPoiNT com os sinais 4G LTE e 5G da telefonia celular demonstrou as capacidades de uma fonte PNT alternativa, escalável e resiliente. Evidentemente, o sistema não substitui totalmente um GNSS, mas funciona como uma camada adicional de segurança e confiabilidade.

No Brasil, uma possível implementação do sistema em grandes centros urbanos exigiria um alto investimento inicial em antenas e manutenção, além da necessidade de regulamentação e formação de parcerias com órgãos como ANATEL e Ministério das Comunicações. O sistema pode ser útil ao setor aquaviário apenas em águas navegáveis próximas a centros urbanos onde o sistema esteja implementado.

### 3.4 – Enhanced Loran (eLoran)

O eLoran (*Enhanced Long-Range Navigation*) é uma versão modernizada do antigo sistema Loran-C, que emprega sinais de rádio de baixa frequência (cerca de 100 kHz), transmitidos por estações terrestres para determinar a posição, velocidade e tempo de um receptor. Como esses sinais são milhões de vezes mais fortes que os de um GNSS, estão imunes a interferências, inclusive ambientais, e podem viajar grandes distâncias e penetrar em áreas urbanas e subterrâneas. As antenas das estações chegam a atingir uma altura de 200 metros.

Receptores eLoran captam esses sinais e calculam a posição com base na diferença de tempo de chegada de múltiplos sinais, semelhante ao princípio dos GNSS. A partir de sinais transmitidos por estações em terra com coordenadas fixas conhecidas, o sistema usa dados de correção diferencial em tempo real para melhorar a sua precisão, podendo atingir uma precisão de até 8 metros. Como em um GNSS é necessária a recepção do sinal de pelo menos 3 satélites para se obter uma posição bidimensional, no eLoran também é preciso, para tal, o cruzamento do sinal de pelo menos 3 estações eLoran. Para posições em 3D, somente dispendo de 4 ou mais estações. O sinal do eLoran também inclui um canal de dados que, além das correções, pode transmitir outras informações, como avisos de integridade do sistema.

Vantagens do eLoran em relação a um GNSS:

- a) O sistema não está sujeito a fontes de erro causadas pela ionosfera e atmosfera.
- b) O sistema é operado por nacionais e é imune a interferências em seus sinais.
- c) Devido à sua baixa frequência, seus sinais penetram ambientes urbanos como túneis, áreas urbanas densas ou sob interferência eletromagnética, inclusive no interior de compartimentos metálicos como contêineres.
- d) As próprias estações em terra efetuam a correção diferencial, melhorando a sua precisão.
- e) Fornece serviços de PNT em terra, mar e ar, desde a superfície até altitudes elevadas.
- f) Pode ser usado em conjunto com os GNSS, aumentando a robustez da navegação.

- g) Em regiões aonde chegam sinais de menos de 3 de suas estações, estes podem fazer parte de sistemas como o R-Mode ou NAVSOP.

Quadro comparativo entre o GPS e o eLoran:

<b>Característica</b>	<b>GPS</b>	<b>eLoran</b>
Fonte do sinal	Satélites em órbita	Estações em terra
Frequência	Alta (1.2 a 1.5 GHz)	Baixa (cerca de 100 kHz)
Alcance	Global	Até 1.000 km por estação
Precisão	3 a 5 m (civil)   <1 m (militar)	8 a 20 m (com correções)
Resistência a interferências	Baixa (sinais frágeis)	Alta (sinais mais fortes)
Dependência de visada	Necessita de céu aberto	Não necessita de Linha de visada direta
Infraestrutura	Espacial e terrestre (complexa e cara)	Terrestre (mais fácil de manter)
Tempo de sincronização	Alta precisão (com sinal de satélite)	Alta precisão (com rubídio ou césio)

O nível de precisão do eLoran é adequado para a navegação terrestre e aquaviária, e mais do que suficiente para navegação aérea em rotas e aproximações não precisas, sendo comparável ou melhor do que as tolerâncias dos procedimentos VOR e NDB. Embora o eLoran não possa corresponder à precisão submétrica necessária para aproximações e pousos de precisão, ele garante que as aeronaves possam navegar com segurança, desviar e descer para mínimos níveis estabelecidos quando o GNSS não estiver disponível.

Com o advento dos GNSS, GPS e Galileo, foram desativados os sistemas Loran no Canadá (2010) e na Europa (2015). Com a proliferação de interferências nos sinais dos GNSS, o Reino Unido, França e Coreia do Sul já estão instalando o eLoran em seus territórios, e a Rússia, China, Arábia Saudita e Irã desenvolvem sistemas semelhantes. O sistema e-Loran sequer foi implantado no território dos EUA como sistema PNT alternativo.

Apesar de os EUA já terem desenvolvido equipamentos para interferir nos sinais dos GNSS GLONASS e BeiDou, os sistemas eLoran estão atualmente operacionais na Rússia, que possui um sistema semelhante (Chayka – fig. 19) e na China, que está construindo uma infraestrutura terrestre para expandir sua cobertura, com estações associadas a 12.000 milhas de cabos de fibra ótica, que transmitem sinais cobrindo todo o país e fornecendo serviço de PNT sem satélites. Isso lhes dá vantagem estratégica e capacidade de ameaçar o GPS sem grandes

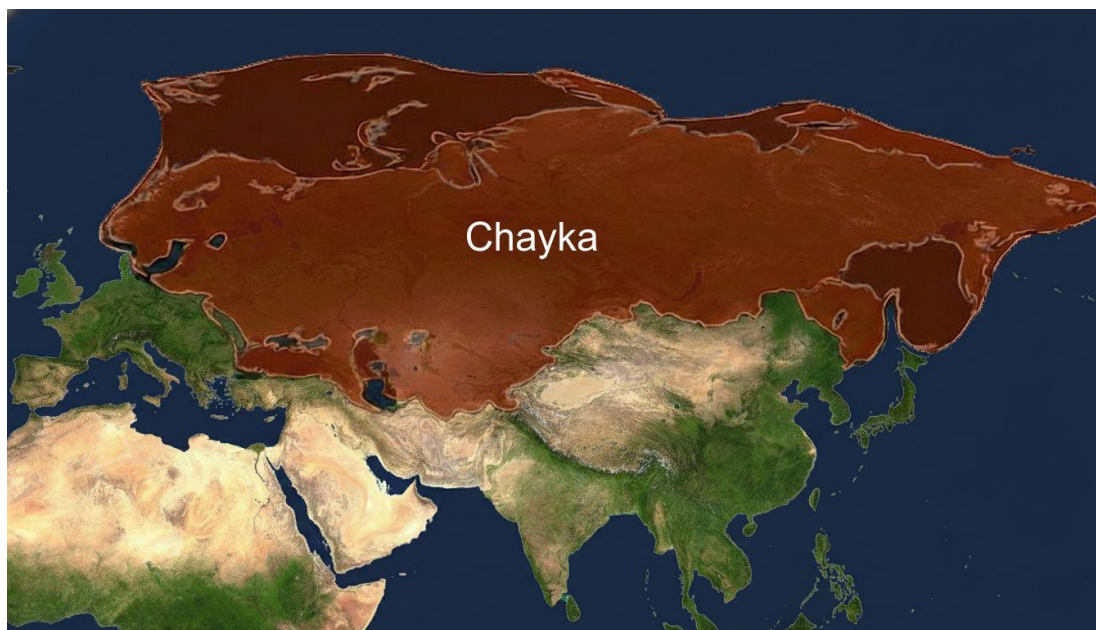


Figura 19 - Cobertura estimada do sistema Chayka da Rússia

riscos. Os EUA, apesar de reconhecerem essa vulnerabilidade desde 2004 e de terem leis que exigem um sistema de backup, ainda não o implementaram. Estudos recomendam há décadas a adoção de uma rede terrestre barata e acessível, que protegeria contra ataques, falhas ou eventos solares. Sem essa medida, o GPS continua sendo um ponto crítico e frágil da sua infraestrutura nacional.

O Reino Unido, que participou do projeto do Galileo e hoje, com sua saída da União Europeia (BREXIT), está fora daquele programa, vem, em paralelo a um programa de desenvolvimento de um Sistema de PNT por satélites nacional, conduzindo também uma série de estudos e demonstrações sobre o seu sistema de PNT alternativo eLoran, baseado em estações em terra, que considera estratégico para proteger suas infraestruturas críticas.

Como podemos observar na figura 20, o sistema é baseado em 5 estações eLoran com alcance de 1.000 km, distribuídas de forma a obter um cruzamento de pelo menos 3 estações para uma precisão razoável e, acima desse número, um incremento significativo na precisão. Tal precisão aumenta caso o receptor se encontre

dentro do quadrilátero pontilhado, onde a geometria entre as estações é mais favorável. Como podemos perceber, o sistema atende a toda a Grã-Bretanha, cobrindo o Canal da Mancha e atingindo parte da maioria dos países do norte da Europa, que poderiam estabelecer parcerias a fim de incrementar o sistema na União Europeia, como a França, que já tomou iniciativas nesse sentido.

A Coreia do Sul, usuária do GPS, está pronta para aprimorar sua navegação e confiabilidade de serviço com o seu sistema eLoran totalmente operacional e estabelecido.

Pela figura 21, podemos perceber a mesma concepção em termos de cobertura e precisão do eLoran do Reino Unido, com a instalação de 5 estações eLoran conferindo precisão máxima em todo o seu território.

A Coreia do Sul espera que tal sistema garanta a navegação terrestre, aérea e marítima segura mesmo durante interferências de bloqueio e falsificação dos seus sinais de GPS em larga escala por parte da Coreia do Norte, como as que o país experimentou recentemente.

Além da segurança proporcionada por esse sistema alternativo, evidentemente ambos os países visam também aprimorar a confiabilidade dos serviços dos seus setores público e privado, incluindo transmissão, telecomunicações e finanças.

No caso de implementação de um sistema de PNT eLoran no Brasil, a sua concepção, exibida na figura 22, poderia consistir em 18 estações distribuídas ao longo da costa e nas margens do rio Amazonas, muitas delas aproveitando

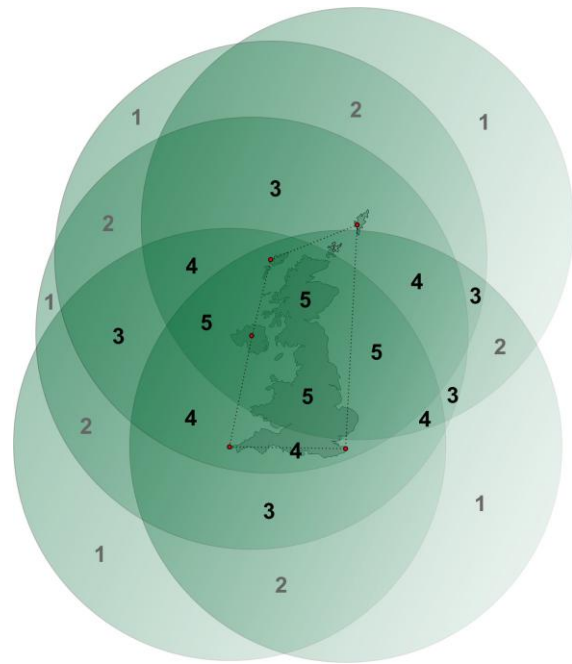


Figura 20 - eLoran do Reino Unido

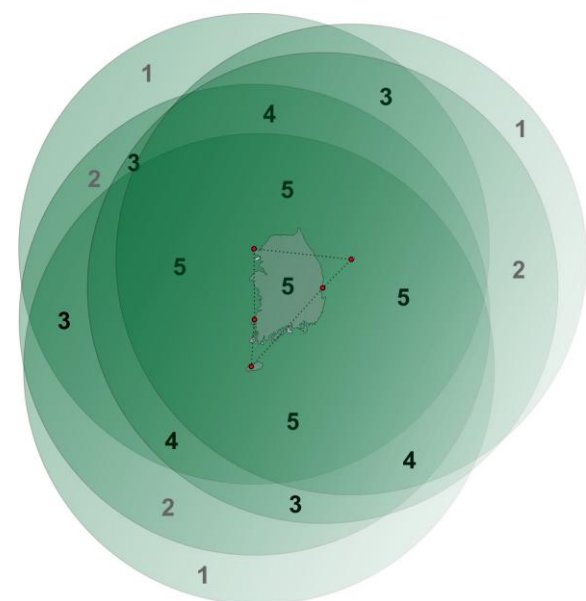


Figura 21 - eLoran da Coreia do Sul

alguma estrutura dos radiofaróis já existentes, que já transmitem os sinais de radiogoniometria e de correção diferencial para o GPS.

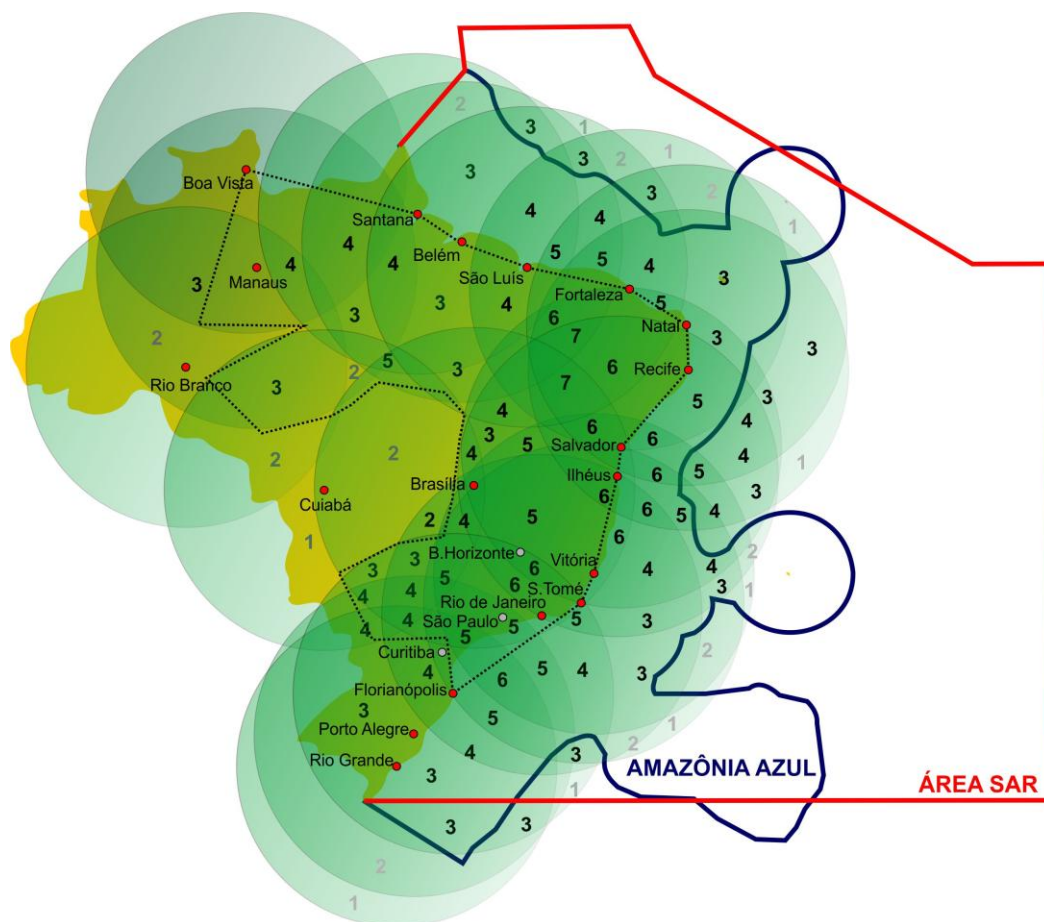


Figura 22 - Concepção de um sistema PNT eLoran para o Brasil

Tal concepção permitiria:

1 - Cobrir grande parte do território nacional, com maior precisão na área delimitada pelo polígono pontilhado, onde se encontram centros de grande importância estratégica como:

- a) A grande Metrópole Nacional São Paulo, com influência em todo o território nacional,
- b) As Metrópoles Nacionais Rio de Janeiro e Brasília, que articulam fluxos econômicos, culturais e políticos em escala nacional, e
- c) As Metrópoles Regionais Belo Horizonte, Porto Alegre, Curitiba, Salvador, Recife, Fortaleza, Belém e Manaus, que exercem liderança

sobre suas regiões, conectando cidades menores e dinamizando economias locais.

2 - Cobrir com o mínimo de 3 estações a maior parte das Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB - Amazônia Azul), com a totalidade do Mar Territorial (MT) e da Zona Contígua (ZC), quase toda a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) e grande parte da Plataforma Continental (PC), inclusive a PC estendida.



Figura 23 - Simulação de estações eLoran instaladas na Ilha Rasa - RJ e no Cabo de Santa Marta - SC

3 - Permitir a navegação costeira e oceânica por meio de apenas uma ou duas estações, podendo cruzá-las com linhas de posição batimétricas ou astronômicas, substituindo as estações radiogoniométricas, que fornecem direção relativa de um transmissor, por estações eLoran que fornecem posição absoluta.

4 - Em regiões no alcance de mais de 3 estações é proporcionada uma maior precisão, além de resiliência em caso de ausência de sinal de uma delas.

5 - Atualmente o SisGAAz (Sistema de Gerenciamento da Amazonia Azul) depende da posição GPS transmitida por navios e embarcações via AIS ou satélite para monitorar o tráfego aquaviário em AJB e conduzir adequadamente a vigilância e patrulha marítimas por navios, aeronaves ou drones. A introdução da posição eLoran no AIS ou no moderno VDES garantiria uma maior eficiência na condução de tais atividades pela Marinha do Brasil.

No transporte aquaviário, tais aplicações são muitas vezes interdependentes e associadas à serviços relacionados à salvaguarda da vida humana, tais como o GMDSS (*Global Maritime Distress and Safety System* - Sistema Global de Socorro e Segurança Marítima), a sincronização de sinais náuticos, os Serviços de Tráfego de Embarcações etc.

No caso do GMDSS, o sistema é dependente da posição GNSS do navio sinistrado, transmitida por VHF, HF e MF ou via satélite, inclusive as EPIRB (*Emergency Position-Indicating Rádio Beacon* - Radiofarol Indicador de Posição de Emergência) que se desprendem do navio sinistrado e passam a transmitir a posição GNSS para satélites COSPAS-SARSAT. Apenas o dispositivo flutuante SART (*Search and Rescue Transponder* - Transponder de Busca e Salvamento) independe de um GNSS, mas só é útil nas proximidades da área do sinistro, dentro do seu alcance radar, o que torna a introdução da posição eLoran no sistema também muito bem-vinda.

Como no Brasil as estações da RENECS transmitem apenas MSI (Informações de Segurança Marítima) em VHF e HF, não existindo operadores em terra para receber e disseminar alerta DSC<sup>8</sup> transmitidos por equipamentos VHF, MF e HF por meio do simples acionamento de um botão DISTRESS, todos os navios SOLAS<sup>9</sup> que operam em nossas AJB, mesmo dentro do alcance daquelas frequências, são obrigados a possuírem um equipamento INMARSAT para tal finalidade. Estações eLoran ao longo da costa, guarnecidas com tanto pessoal qualificado, poderiam suprir tal deficiência do Brasil em relação ao GMDSS.

Os custos estimados de construção e instalação por estação de um projeto eLoran com essa envergadura no Brasil, baseados em ordens de grandeza de projetos internacionais de eLoran/Loran-C ajustados à realidade brasileira, seriam, aproximadamente, os seguintes:

- Terreno e licenciamento: 2 a 8 milhões de Reais;
- Infraestrutura civil: 10 a 25 milhões de Reais;
- Antena e sistema de radiação: 20 a 45 milhões de Reais;
- Transmissores de alta potência e RF: 25 a 60 milhões de Reais;
- Sistema de tempo e sincronização: 5 a 12 milhões de Reais;
- Energia e climatização: 8 a 20 milhões de Reais;

---

<sup>8</sup> DSC (*Digital Selective Calling*) - A Chamada Seletiva Digital nos rádios em VHF, MF e HF é um subsistema que permite a uma embarcação equipada com equipamentos DSC receber as chamadas endereçadas a ela sem que alguém tenha que ficar permanentemente atento junto ao equipamento.

<sup>9</sup> Um navio SOLAS é qualquer embarcação que segue as normas da Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS), criada em 1914 após o naufrágio do Titanic.

- Telecom e controle: 3 a 8 milhões de Reais;
- Importação, impostos e integração: 10 a 25 milhões de Reais.

Custo total: 83 a 178 milhões de Reais.

Como uma estação eLoran é altamente automatizada, mas requer supervisão humana constante, também devem ser levantados os custos de se manter uma equipe multidisciplinar que inclua engenheiros de sistemas e telecomunicações, técnicos de manutenção, especialistas em sistemas de navegação e sincronização, operadores de monitoramento e controle, além de uma equipe de segurança e infraestrutura.

#### 4 - ESTUDOS DE CASO

Dois casos chamam a atenção no Oriente Médio. Primeiro o do Irã, que, a partir de 2025, tem intensificado a utilização de sistemas avançados de guerra eletrônica, incluindo interferência nos sinais do GPS, como tática militar no Golfo Pérsico e no Estreito de Ormuz. Essa atividade tendo aumentado significativamente a tensão na região em 2026, com os ataques recentes dos Estados Unidos e Israel ao Irã. Geralmente, essas interferências são empregadas em zonas de guerra visando

afetar sistemas de navegação de drones e mísseis. Como Teerã lançou centenas de mísseis balísticos e mais de mil drones contra países do Golfo, em resposta aos ataques, isso demonstra que o arsenal iraniano foi capaz de operar em cenários de guerra eletrônica intensa, onde o sinal GPS é interferido,

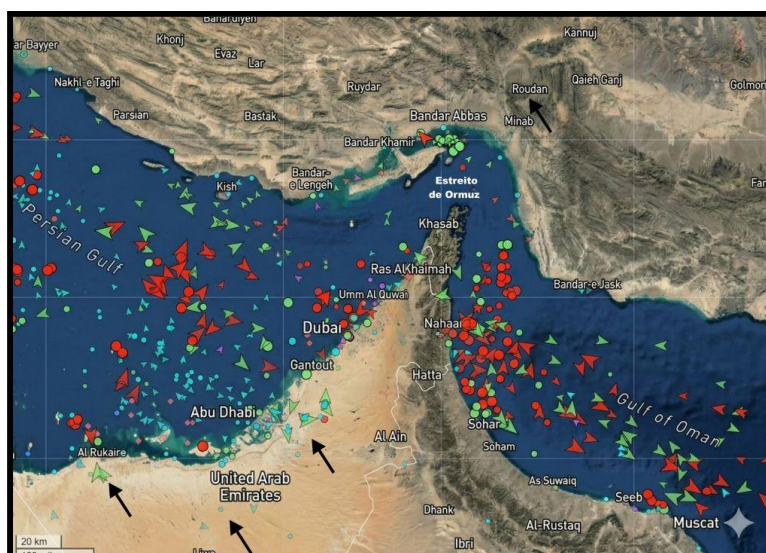


Figura 24 – Interferências do sinal GPS no Estreito de Ormuz em 03MAR26 (IA Gemini + marinetrffic.com)

conseguindo guiar seus vetores por meio de sistemas inerciais e sensores autônomos, além de guiagem terminal por imagem, independente de satélites.

O bloqueio e a falsificação de sinais pelo Irã têm gerado alertas de segurança marítima e aérea na região, onde alguns navios tiveram a sua posição GPS localizada erroneamente em aeroportos, em uma usina nuclear e em terra, aparecendo em áreas do Irã, Omã e Emirados Árabes Unidos (fig. 24). O estreito de Ormuz foi praticamente fechado em 03 de março, causando um engarrafamento de mais mil embarcações, com os navios em deslocamento sendo obrigados a realizar a navegação e o acompanhamento de embarcações pelo radar, já que a navegação por satélite e o AIS (Sistema de Identificação Automática) dependem do sinal do GPS. O risco de encalhe de petroleiros<sup>10</sup>, com conseqüente derramamento de petróleo, e o abalroamento entre os navios que trafegam na região causou muita preocupação. No dia 10 as interferências já tinham diminuído substancialmente. Contudo, diante das ameaças de ataque iranianas de ataque ao tráfego marítimo no estreito de Ormuz, vários navios ficaram parados nos golfos Pérsico e de Omã, com muitos deles desligando seus equipamentos AIS visando dificultar a sua identificação.

Em paralelo, a situação na guerra na Ucrânia, iniciada em fevereiro de 2022, é mais complexa. Naquele conflito os GNSS ocidentais, especialmente o GPS, vem sendo fortemente afetados pela guerra eletrônica russa, que utilizou bloqueio e falsificação dos sinais do GPS, interferindo em armas guiadas por satélite como os

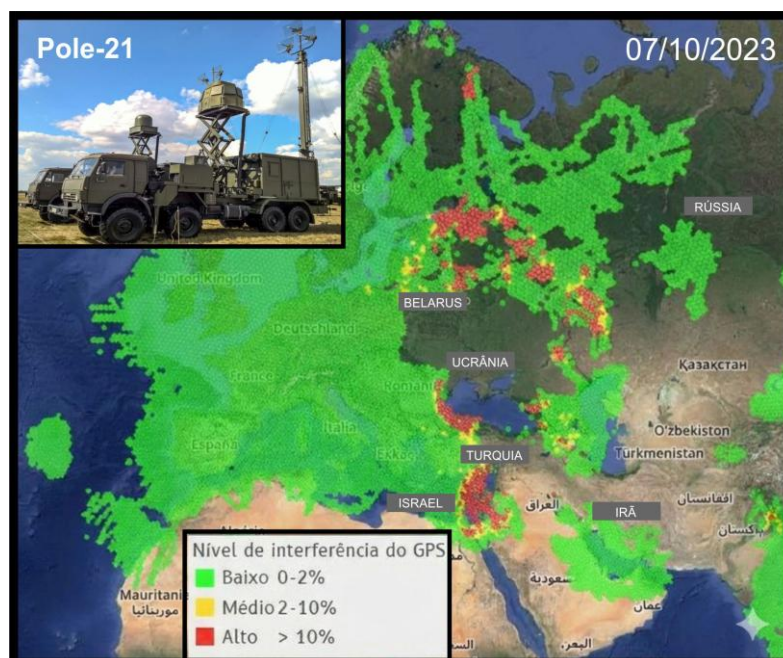


Figura 25 - Interferências nos sinais do GPS no entorno do conflito na Ucrânia, durante os ataques do Hamas contra Israel em 07/10/23. (mapa adaptado de <https://gpsjam.org/>)

<sup>10</sup> No mapa da figura 24, os navios petroleiros estão exibidos na cor vermelha.

projéteis Excalibur, GMLRS e bombas JDAM-ER, que apesar de serem mais resilientes não são imunes à interferência. O emprego de bloqueadores eletrônicos, como o sistema Pole-21 (detalhe da fig. 25) também estão sendo usados para desativar sistemas de mira e navegação baseados em GPS, impedindo que drones e mísseis ucranianos atinjam os seus objetivos.

Como alternativa, a Ucrânia passou a investir em tecnologias de navegação inercial, óticas e de rádio, Inteligência Artificial (IA) e destruição de sistemas de guerra eletrônica, além de intensificar ataques a equipamentos como o Pole-21 e até a antenas de centros de controle do GLONASS, por meio de drones. Além disso, suas tropas foram treinadas para operar em ambientes com GPS degradado, usando mapas, reconhecimento visual e coordenação manual. A Rússia, da mesma forma, adota medidas semelhantes.

Ambos os lados têm obtido avanços tecnológicos significativos por meio do uso intensivo de drones, de IA, de sistemas de vigilância e análise de dados em tempo real e até de aplicativos civis adaptados para uso militar como o Tinder, utilizados para identificar alvos, prever movimentos inimigos e otimizar estratégias. Contudo, ainda é desconhecido o emprego do “eLoran” Chayka (fig. 19) pela Rússia como PNT alternativo em face das interferências nos sinais de seu GNSS GLONASS.

Recentemente a Starlink, apesar de ainda não fornecer PNT, bloqueou o seu serviço de Internet para a Rússia, criando uma espécie de disponibilidade seletiva, onde só receptores ucranianos cadastrados desfrutarão do serviço, o que limitou drasticamente o controle remoto de drones russos que vinham utilizando o sistema.

Evidentemente, um estudo de caso completo abordando a resiliência efetiva dos sistemas de PNT empregados naquele conflito só poderá ser conduzido após o término ou um período maior de duração da invasão da Rússia da Ucrânia, incluindo a Guerra Híbrida<sup>11</sup> travada entre a Rússia e alguns países membros da OTAN.

## **5 - CONCLUSÃO**

A soberania e a segurança nacional dependem cada vez mais da capacidade de manter serviços PNT confiáveis, o que justifica o estabelecimento de uma legislação mais rígida e o investimento em tecnologias e infraestruturas alternativas e na fusão inteligente de dados de sensores.

---

<sup>11</sup> Guerra Híbrida é uma estratégia de conflito moderno que combina métodos militares convencionais e não convencionais (cibernéticos, políticos, econômicos e informacionais) para atingir objetivos sem um confronto armado direto e declarado.

Nesse sentido, em face de tudo que foi apresentado e analisado, podemos concluir que a resiliência em PNT não reside em uma única tecnologia substituta, conhecida como “Czar do PNT” por especialistas, mas sim na diversidade e integração de múltiplas fontes, incluindo os GNSS, onde a simples posse de um PNT alternativo gera dissuasão diante de alguma intenção hostil que vise negar ou interferir nos sinais dos GNSS.

Em termos de sistemas espaciais, os receptores multi-constelação já se encontram em uso crescente, sendo úteis, principalmente, no caso de falhas ou negação de sinal por parte de um dos GNSS de que se utiliza. O GNSS Nacional deve ser incentivado, acompanhando o processo natural de desenvolvimento de satélites e lançamento de foguetes pelo país com a promoção do seu centro de lançamento privilegiado de Alcântara - MA em cooperação com

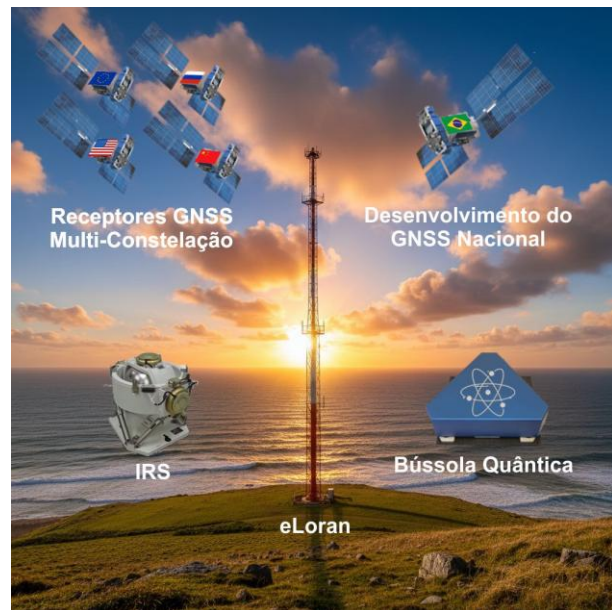


Figura 26 - Alternativas de PNT

outros países. Como tal aspiração deverá consumir um elevado nível de recursos e investimentos, o processo provavelmente deverá ter como objetivo primário a concepção de um Sistema de Navegação Regional por Satélite, como fizeram a China, a Índia e o Japão, onde parcerias com esses países se mostram muito interessantes.

A Starlink ainda necessita comprovar a sua capacidade de prover serviço de PNT e, por não ser estatal, seus serviços certamente envolverão questões de soberania e segurança.

Os sistemas autônomos, como o consagrado inercial, o quântico e o LVS, esses dois últimos ainda em desenvolvimento, garantem a continuidade da navegação em curtos períodos de interrupção total em veículos e armamentos que os transportem, sendo que o LVS não atende às necessidades da navegação aquaviária e os sensores quânticos, somente funcionais em ambientes controlados, dependem ainda de alguns anos para torná-los práticos e acessíveis. E todos esses sistemas ainda necessitam de um avanço em seus processos de miniaturização visando

ampliar o seu espectro de utilização, principalmente a bordo de pequenos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e Drones diversos.

Sistemas terrestres como o R-Mode e o NavNext TerraPoiNT oferecem uma robustez superior contra interferências, mas são limitados em alcance e dependentes de sinais diversos controlados por diversos atores. O R-Mode, ainda em fase de protótipo limitada ao Báltico, é muito dependente de uma geometria favorável que não ocorre no Brasil, e a sua utilização é muito voltada para o segmento marítimo, ao passo que o NavNext TerraPoint se destina apenas ao atendimento de centros urbanos.

Como podemos constatar em uma rápida análise das potencialidades do eLoran, alternativa de PNT que obteve mais espaço no presente trabalho, é o único sistema que atende completamente, por si só, as necessidades da Navegação Marítima, Aérea e Terrestre dos meios empregados em Operações Militares na maior parte do território e das águas jurisdicionais brasileiras (fig. 27), sendo um sistema cuja força não está na complexidade, mas sim na resiliência,

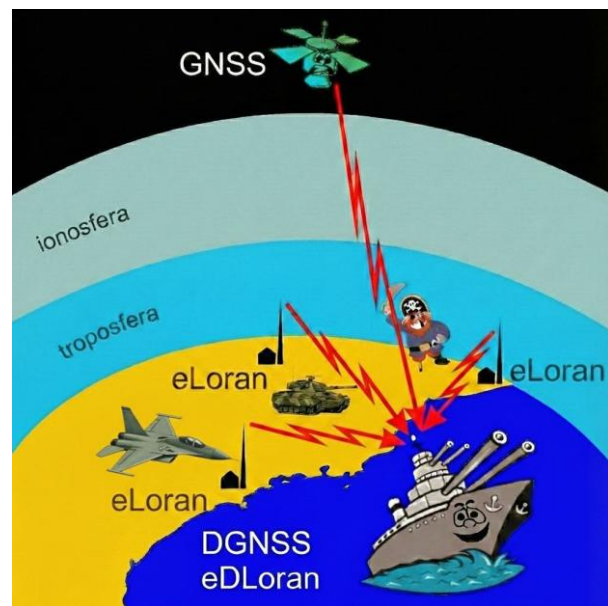


Figura 27 - eLoran resiliente nas Operações Militares

perdendo apenas em precisão e alcance para os sistemas de PNT regionais e globais baseados em satélites. Sua implantação poderia ser iniciada com cinco estações cobrindo a região sudeste, realizando operações e aperfeiçoamento do sistema, somente expandindo a cobertura quando a sua eficiência tivesse sido alcançada, inclusive com o incentivo de uma política de instalação de estações eLoran em nossos países vizinhos. Seu emprego, em conjunto com os demais sistemas de PNT abordados, certamente contribuirá significativamente para a resiliência do PNT nacional.

O Brasil, com necessidade de cobertura nacional semelhante em dimensões com os EUA, deverá também estar atento ao desenvolvimento do eLoran naquele país, sem desconsiderar uma aproximação com países como o Reino Unido e a Coreia do Sul, dos quais já possui parceria no campo da tecnologia aeroespacial.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA MARÍTIMA DE NOTÍCIAS. *Navegação em rios e lagos terá novas exigências de segurança a partir de 2026*. 2025. Disponível em: <https://www.agencia.marinha.mil.br/seguranca-da-navegacao/navegacao-em-rios-e-lagos-tera-novas-exigencias-de-seguranca-partir-de-2026>

BAE SYSTEMS. *Navegação por meio de sinais de oportunidade (NAVSOP)*. 2025. Disponível em: <https://www.baesystems.com/en/product/navigation-via-signals-of-opportunity-navsop>

BARONE, Bruna. *Ucrânia tem uma nova aliada na guerra contra a Rússia: a inteligência artificial*. 2024. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2024/12/20/ciencia-e-espaco/ucrania-tem-uma-nova-aliada-na-guerra-contra-a-russia-a-inteligencia-artificial/>

BENTO, Carlos Norberto S. *Navegação Integrada*. 4ª. Ed. 2026. Disponível em: <https://www.e-nav.net>

BENTO, Carlos Norberto S. *Vulnerabilidades da Navegação por Satélites*. 2014. Disponível em: <https://redebim.marinha.mil.br/vinculos/000005/000005e3.pdf>

BENTO, Carlos Norberto S. *Vulnerabilidade dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite*. Disponível em: [https://cembra.org.br/informativos/Infocembra\\_16/](https://cembra.org.br/informativos/Infocembra_16/)

CARDOSO, Thiago. *Como a Tecnologia, Especialmente as IAs, Estão Impactando e Mudando as Táticas das Guerras Modernas: O Caso da Guerra na Ucrânia*. 2024. Disponível em: <https://www.dio.me/articles/como-a-tecnologia-especialmente-as-ias-estao-impactando-e-mudando-as-taticas-das-guerras-modernas-o-caso-da-guerra-na-ucrania>

CARR, Jay. *O que é um sistema de navegação inercial? Como funciona?* 2014. Disponível em: [https://estamoscuriosos.me/questions/32174/o-que-e-um-sistema-de-navegacao-inercial-como-funciona#google\\_vignette](https://estamoscuriosos.me/questions/32174/o-que-e-um-sistema-de-navegacao-inercial-como-funciona#google_vignette)

CENTRO TECNOLÓGICO DO EXÉRCITO. *Sistema de Navegação Inercial para Dinâmicas Rápidas (SNIDR)*. Disponível em: <https://www.ctex.eb.mil.br/projetos-em-andamento/sistema-de-navegacao-inercial-para-dinamicas-rapidas-snidr>

COSTA, Rafael. *GPS em risco: Brasil pode ficar às cegas? Entenda impactos e alternativas*. 2025. Disponível em: <https://www.techtodo.com.br/noticias/2025/07/gps-em-risco-brasil-pode-ficar-as-cegas-entenda-impactos-e-alternativas-edinfoeletro.ghtml>

DLR - INSTITUTE OF COMMUNICATIONS. *Modo R Báltico e Modo R Báltico 2*. Disponível em: <https://www.dlr.de/en/kn/research-transfer/projects/maritime-security/r-mode-baltic-and-r-mode-baltic-2>

ESTADÃO. *E se o GPS fosse desligado no Brasil? Conheça sistemas alternativos de geolocalização*. 2025. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/web-stories/link/cultura-digital/e-se-o-gps-fose-desligado-no-brasil-conheca-sistemas-alternativos-de-geolocalizacao-nprei/>

G1. *Após explosão em Alcântara, empresa dona de foguete projeta novo lançamento em 2026.* 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2025/12/23/apos-explosao-em-alcantara-empresa-dona-de-foguete-projeta-novo-lancamento-em-2026.ghtml>

GAZETA DE SÃO PAULO. *Adeus GPS: após ameaça de Trump, como funciona o sistema que pode substituir nossos mapas?* 2026. Disponível em: <https://www.gazetasp.com.br/gazeta-mais/curiosidades/trump-gps-beidou/1159678/>

HRINKO, Ivan. *Imune a interferências: os satélites Starlink podem substituir o GPS.* 2025. Disponível em: <https://universemagazine.com/en/immune-to-jamming-starlink-satellites-could-replace-gps/>

HYTERA BRASIL. *Rede de Comunicação via Rádio: como funciona e por que ela é essencial para operações críticas.* 2025. Disponível em: <https://www.hytera.com/br/connect/blog/rede-de-comunicacao-via-radio-como-funciona-e-por-que-ela-e-essencial-para-operacoes-criticas>

INSIDEGNSS. *Relatório do JRC sobre A-PNT reconhece que o TerraPoINT da NextNav supera os padrões da indústria.* Disponível em: <https://insidegnss.com/jrc-report-looking-at-a-pnt-recognizes-nextnavs-terrapoint-as-exceeding-industry-standards/>

INSIDEGNSS. *SpaceX detalha as capacidades de PNT (Posicionamento, Navegação e Temporização) existentes e potenciais da Starlink em resposta a uma consulta da FCC.* 2025. Disponível em: <https://insidegnss.com/spacex-details-starlinks-existing-and-potential-pnt-capabilities-in-response-to-fcc-inquiry/>

ION – INSTITUTE OF NAVIGATION. *Demonstração do Sistema de Posicionamento em Modo R.* Disponível em: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=17728>

MDPI. *Testes de desempenho de temporização e análise de regularidade do sistema eLoran.* 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/15/6580>

MILITARY+AEROSPACE ELECTRONICS. *A Northrop Grumman fornecerá o sistema de navegação inercial com giroscópio a laser de anel AN/WSN-7 para eletrônicos de bordo de navios.* 2023. Disponível em: <https://www.militaryaerospace.com/sensors/article/14302516/northrop-grumman-corp-inertial-navigation-shipboard-electronics-ring-laser-gyro>

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. *Brasil avança na corrida das tecnologias quânticas.* 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/01/brasil-avanca-na-corrida-das-tecnologias-quanticas>

MIXVALE. *Governo estuda criar GPS brasileiro para reduzir dependência externa.* 2025. Disponível em: <https://www.mixvale.com.br/2025/07/23/governo-estuda-criar-gps-brasileiro-para-reduzir-dependencia-externa/>

MÜLLER, Léo. *Anatel dos EUA" quer alternativa ao GPS; Starlink de Elon Musk pode ser solução.* 2025. Disponível em: <https://canaltech.com.br/telecom/anatel-dos-eua-quer-alternativa-ao-gps-starlink-de-elon-musk-pode-ser-solucao/>

MUNDOGEO.COM. *GNSS/Robótica: Solução Híbrida na Topografia*. 2023. Disponível em: <https://mundogeo.com/2023/10/09/gnss-robotica-solucao-hibrida-na-topografia/>

NAVSUP NAVAL SUPPLY SYSTEMS COMMAND. *Suporte a Sistemas de Armas NAVSUP (NAVSUP WSS)*. 2026. Disponível em: [www.navsup.navy.mil/NAVSUP-Enterprise/NAVSUP-Weapon-Systems-Support](http://www.navsup.navy.mil/NAVSUP-Enterprise/NAVSUP-Weapon-Systems-Support)

NEXTNAV.COM. *Soluções de PNT 3D precisas, seguras e resilientes*. Disponível em: <https://nextnav.com/terrapoint/>

OBSERVATÓRIO POLÍTICO DOS ESTADOS UNIDOS. *Inovações tecnológicas e Inteligência Artificial na Guerra da Ucrânia*. 2025. Disponível em: <https://www.opecu.org.br/2025/02/09/inovacoes-tecnologicas-e-inteligencia-artificial-na-guerra-da-ucrania/>

PINHEIRO, Alane Costa et al. *Guerra Híbrida e Ciberconflitos: Uma Análise das Ferramentas Cibernéticas nos Casos da Síria e Conflito Rússia-Ucrânia*. 2024. Disponível em: [https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/ensino\\_e\\_pesquisa/defesa\\_academia/cadn/artigos/XIII\\_cadn/guerra\\_hibrida\\_e\\_ciberconflitos\\_u\\_ma\\_analise\\_das\\_ferramentas\\_ciberneticas\\_nos\\_casos\\_da\\_siria\\_e\\_conflito\\_russiaucrania.pdf](https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/ensino_e_pesquisa/defesa_academia/cadn/artigos/XIII_cadn/guerra_hibrida_e_ciberconflitos_u_ma_analise_das_ferramentas_ciberneticas_nos_casos_da_siria_e_conflito_russiaucrania.pdf)

RESILIENT NAVIGATION AND TIME FOUNDATION. *Ameaças, riscos e desastres de PNT – Dentro do GNSS+*. Disponível em: <https://rntfnd.org/2025/12/08/pnt-threats-risks-and-disaster-inside-gnss/>

\_\_\_\_\_. *Cúpula Dourada e PNT – Dentro do GNSS*. Disponível em: <https://rntfnd.org/2025/12/10/golden-dome-and-pnt-inside-gnss/>

\_\_\_\_\_. *Relatório da Cúpula PNT 2025: Enfrentando os Desafios Urgentes do PNT – Por Dentro do GNSS+*. 2015, Disponível em: <https://rntfnd.org/2025/12/07/pnt-summit-report-2025-tackling-urgent-pnt-challenges-inside-gnss/>

ROYAL INSTITUTE OF NAVIGATION. *Relatório sobre os impactos da interferência do GNSS na segurança marítima*. 2025. Disponível em: [https://rin.org.uk/page/RIN\\_Maritime\\_Report?&hhsearchterms=%22gnss+and+interference%22#download-form](https://rin.org.uk/page/RIN_Maritime_Report?&hhsearchterms=%22gnss+and+interference%22#download-form)

SAFRAN, NAVEGAÇÃO E CRONOMETRAGEM. *eLoran como referência de temporização de sincronização segura*. 2020. Disponível em: [https://safran-navigation-timing.com/wp-content/uploads/2021/07/eLoran-as-a-SecureSync-Timing-Reference\\_12-10-19-1.pdf](https://safran-navigation-timing.com/wp-content/uploads/2021/07/eLoran-as-a-SecureSync-Timing-Reference_12-10-19-1.pdf)

SCHWERZ, Jorge Luiz. *Batalha Tecnológica na UCRÂNIA: a Guerra Eletrônica Russa Contra o GPS*. 2023. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/aviacao/guerra-eletronica-ew/batalha-tecnologica-na-ucrania-a-guerra-eletronica-russa-contra-o-gps/>

SEBASTIAN, Clare. *Primeiro foram os drones, agora são as interferências nos sinais de GPS: como a Ucrânia e a Rússia estão a mudar a guerra*. 2023. Disponível em: <https://cnnportugal.iol.pt/guerra/ucrania/primeiro-foram-os-drones-agora-sao-as-interferencias-nos-sinais-de-gps-como-a-ucrania-e-a-russia-estao-a-mudar-a-guerra/20231129/656719c5d34e65afa2f81663>

SILVA, Alberto, et al. *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS*. 2019. Disponível em: [https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/47\\_Silva\\_et\\_al\\_2019\\_RBMC.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/47_Silva_et_al_2019_RBMC.pdf)

TAOGLAS. *Atenção aos detalhes: aproveitando a tecnologia RTK (cinemática em tempo real) para maximizar a precisão do GNSS*. Disponível em: <https://www.taoglas.com/blogs/attention-to-detail-leveraging-real-time-kinematic-rtk-technology-to-maximize-gnss-precision/>

TECNOLOGIA E DEFESA. *Microlançador Brasileiro realiza com sucesso testes em voo de Sistema de Navegação Inercial*. 2025. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/microlancador-brasileiro-realiza-com-sucesso-testes-em-voo-de-sistema-de-navegacao-inercial/>

TELES, Bruno. *Após falha humilhante em 1996, China cria o BeiDou para nunca mais depender do GPS dos EUA*. 2025. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/apos-falha-humilhante-em-1996-china-cria-o-beidou-para-nunca-mais-depender-do-gps-dos-eua-btl96/>

TILAWAT, Midhat. *Estatísticas de IA Quântica 2026: China Detém 60% das Patentes, o Ocidente Pode Alcançar?* 2025. Disponível em: <https://www.allaboutai.com/pt-br/recursos/estatisticas-de-ia/ia-quantica/>

UNIVERSIDADE DE STRATHCLYDE, GLASGOW. *Sistema de navegação quântica testado com sucesso no mar*. 2025. Disponível em: <https://www.strath.ac.uk/whystrathclyde/news/2025/quantumnavigationsystemsSuccessfullytestedatsea/>

URSANAV. 2025. *O que é eLoran?* Disponível em: <https://www.ursanav.com/what-is-eloran/>. Consulta em 22/01/2026.

VAUGHN, Eliza Tilde. *Um Sinal da Terra: Por Que a América Precisa Reviver o eLoran*, 2025. Disponível em: [https://www.reddit.com/r/aviation/comments/1ntvim9/a\\_signal\\_from\\_the\\_earth\\_why\\_america\\_must\\_revive/](https://www.reddit.com/r/aviation/comments/1ntvim9/a_signal_from_the_earth_why_america_must_revive/)

WALSH, Edward J. *Chegando agora: Navegação baseada em fibra óptica*. 2023. Disponível em: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2023/december/now-arriving-fiber-optic-based-navigation>