



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
DIVISÃO DE ENSINO  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1º/2025

FÁBIO KEI YAMADA, Cap Eng

**Benefícios do uso do Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas  
(SGDC) para a rastreabilidade metrológica da escala de tempo atômica do IFI**

Rio de Janeiro  
2025

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
DIVISÃO DE ENSINO  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1º/2025

FÁBIO KEI YAMADA, Cap Eng

**Benefícios do uso do Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas  
(SGDC) para a rastreabilidade metrológica da escala de tempo atômica do IFI**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica como requisito parcial para aprovação no Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Liderança com Ênfase em Gestão no COMAER.

Linha de Pesquisa: Ciência, Tecnologia e Inovação

Orientadora: Patricia Fernanda Barros Pereira Dias, Cap Dent

Rio de Janeiro

2025

FÁBIO KEI YAMADA, Cap Eng

**Benefícios do uso do Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas  
(SGDC) para a rastreabilidade metrológica da escala de tempo atômica do IFI**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Escola  
de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica.

Aprovado por:

---

Presidente, Marcos Zeitone Koialainski Junior, Maj Av - EAOAR

---

Patricia Fernanda Barros Pereira Dias, Cap Dent - EAOAR

Rio de Janeiro

2025

## RESUMO

Desde o ano de 2024, o Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI) adotou o método de calibração remota com base no GPS (do inglês, *Global Positioning System*) para a sua escala de tempo atômica. Entretanto, a dependência do GPS representa uma vulnerabilidade estratégica, pois o sistema está sujeito a falhas, interferências, degradações intencionais e ataques como o *spoofing*, capazes de comprometer a rastreabilidade metrológica. Nesse cenário, este ensaio defende que o uso do Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC) para a rastreabilidade metrológica da escala de tempo atômica do IFI contribui para a manutenção da soberania nacional. O uso de um sistema satelital nacional mitiga os riscos decorrentes da dependência de sistemas estrangeiros, assegurando confiabilidade para o serviço da calibração do relógio atômico do IFI. Além disso, o SGDC viabiliza a implementação do método *Two Way Satellite Time and Frequency Transfer* (TWSTFT) o qual apresenta desempenho técnico superior ao método GPS, com menor incerteza, operação em quase tempo real e maior robustez contra *spoofing*. Logo, conclui-se que o uso do SGDC garante a disponibilidade da rastreabilidade metrológica e o método TWSTFT possibilita uma maior exatidão para o serviço de calibração da escala de tempo atômica do IFI contribuindo para o cumprimento da missão da Força Aérea Brasileira. Por fim, a cobertura continental do SGDC pode ser relevante para o suporte às infraestruturas críticas do país como sistemas de telecomunicações e de distribuição de energia, os quais são igualmente fundamentais para a manutenção da soberania do país.

**Palavras-chave:** escala de tempo atômica; *Global Positioning System*; Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas; *Two Way Satellite Time and Frequency Transfer*.

## 1 INTRODUÇÃO

No ano de 1975, a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) recomendou o Tempo Universal Coordenado (UTC, do inglês *Coordinated Universal Time*) como a única referência de escala de tempo para a base do tempo civil. Tal recomendação foi ratificada na CGPM do ano de 2018 (Panfilo; Arias, 2019). Em essência, o UTC é calculado a partir da medição e comparação de cerca de 91 escalas de tempo UTC localizadas em 68 países (BIPM, 2025), sendo o Brasil representado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), pelo Observatório Nacional e pela Universidade de São Paulo em São Carlos.

A realização do UTC só é possível graças a métodos que utilizam os GNSS (do inglês, *Global Navigation Satellite System*), como o sistema americano GPS (do inglês, *Global Positioning System*), que permitem medir e comparar as escalas de tempo em diferentes locais geográficos. Todos os GNSS, incluindo o GPS, possuem satélites com relógios atômicos embarcados, os quais permitem ser utilizados como escalas de tempo auxiliares para a comparação das escalas de tempo terrestres.

No ano de 2024, o Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI) implementou esse mesmo método para o serviço de calibração remota fornecido pelo INMETRO, permitindo a rastreabilidade metrológica das grandezas de tempo e frequência com confiabilidade e exatidão para as diversas atividades técnico-operacionais das unidades operadoras do Comando da Aeronáutica (COMAER). Desse modo, é fornecida uma referência de tempo rastreada pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), o que garante a qualidade metrológica para as áreas de controle de tráfego aéreo, manutenção aeronáutica e atividades espaciais suportadas pelo Sistema de Metrologia Aeroespacial (SISMETRA).

Entretanto, a dependência do GPS nesse processo representa uma vulnerabilidade estratégica para o país. Falhas, interferências, falsificações, indisponibilidades intempestivas e inserções de erros intencionais nos sinais podem comprometer a calibração do relógio atômico e, conseqüentemente, toda a cadeia de rastreabilidade metrológica suportada pelo SISMETRA.

Considerando esse cenário, uma solução seria a utilização do Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC), operado pelo Centro de Operações Espaciais (COPE), em parceria com a Telebrás, desde maio de 2017. O SGDC, além de outras atribuições civis e militares, permite a implementação de um método tecnicamente superior ao GPS conhecido como *Two Way Satellite Time and Frequency Transfer* (TWSTFT).

Nesse contexto, este ensaio acadêmico defende que o uso do SGDC para a rastreabilidade metrológica da escala de tempo atômica do IFI contribui para a manutenção da

soberania nacional. Argumenta-se que, ao utilizar um sistema nacional de alcance continental operado pelo COMAER, é assegurada a disponibilidade e a confiabilidade da rastreabilidade metrológica da escala de tempo atômica do SISMETRA, reduzindo a vulnerabilidade do uso do GPS. Além disso, o Brasil seria o primeiro país a implementar a tecnologia TWSTFT, cuja performance é tecnicamente superior ao GPS, consolidando-se como referência na área de metrologia de tempo e frequência na região da América Latina.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

O GPS é um dos sistemas mais conhecidos e utilizados para posicionamento e navegação do mundo. A sociedade incorporou essa tecnologia ao seu cotidiano de tal forma que é difícil para muitos imaginar a vida sem ela.

Além dos serviços de navegação, o GPS desempenha um papel fundamental ao fornecer o sincronismo (tempo) com exatidão na ordem de microssegundos necessário para o funcionamento de diversos sistemas de infraestrutura crítica do país, como redes de telecomunicações, sistemas de distribuição de energia, registros de carimbo do tempo e operações financeiras. Qualquer falha ou mau funcionamento do GPS pode gerar impactos severos e incalculáveis para o Brasil. Inclusive, os Estados Unidos já vêm adotando medidas para fortalecer a resiliência de sua infraestrutura crítica, buscando alternativas que assegurem sua disponibilidade mesmo diante de falhas ou interferências no GPS (United States, 2020).

Conforme estabelece a Política Nacional de Defesa (Brasil, 2024), no cenário internacional, não se pode descartar a possibilidade de tensões e crises no entorno estratégico do Brasil com potenciais reflexos para o país. Além disso, tendem a ser cada vez mais frequentes situações envolvendo acessos não autorizados, bloqueios no fluxo de informações de interesse nacional e interferências em sistemas de informação, gerenciamento e comunicações, com risco de comprometer ou paralisar atividades essenciais da infraestrutura crítica para o funcionamento do país. Nesse contexto, torna-se imprescindível reduzir as vulnerabilidades associadas ao serviço de calibração remota do relógio atômico do IFI, a fim de evitar que eventuais indisponibilidades prejudiquem ou inviabilizem operações militares, considerando a dificuldade de realizá-las sem a confiabilidade metrológica adequada.

Na mesma linha, a Estratégia Nacional de Defesa (Brasil, 2024) para o setor espacial destaca a importância de fortalecer as competências relacionadas ao desenvolvimento, fabricação e integração de plataformas espaciais (satélites) com o objetivo de atender às demandas de Defesa e de outros órgãos governamentais. Assim, torna-se igualmente relevante

a adoção da tecnologia TWSTFT, garantindo que o domínio tecnológico permaneça atualizado e consolidado no âmbito da comunidade científica brasileira.

Dessa forma, a utilização do SGDC para a rastreabilidade metrológica da escala atômica do IFI revela-se essencial tanto para reduzir as vulnerabilidades inerentes à dependência de sistemas satelitais estrangeiros, quanto para viabilizar a implementação da tecnologia TWSTFT, tecnicamente superior ao GPS.

## 2.1 VULNERABILIDADES DO USO DO GPS

O GPS foi inicialmente concebido como um projeto militar americano, sendo atualmente usado para fornecer serviços de posição, velocidade e tempo para qualquer pessoa, em qualquer lugar do planeta, mesmo sob condições climáticas adversas.

Até maio de 2000, conforme interesses exclusivos do Departamento de Defesa Americano, o GPS fornecia o serviço de localização com uma degradação intencional para a sociedade civil conhecida como Disponibilidade Seletiva (SA, do inglês *Selective Availability*). Essa técnica deteriorava as coordenadas dos satélites aumentando consideravelmente a incerteza de medição da localização do receptor terrestre (Segantine, 2005, p. 32). Apesar dessa degradação ter sido retirada, de modo a possibilitar o uso de forma mais precisa, não se pode ignorar que uma nova degradação intencional inserida inopinada e intempestivamente pode representar um aumento na incerteza de medição dos atrasos entre as escalas de tempo do GPS e, logo, das escalas de tempo do IFI e do INMETRO, podendo comprometer a correta calibração do padrão de referência de tempo do SISMETRA.

Por outro lado, o *spoofing* envolve a transmissão de sinais falsos que imitam os sinais legítimos dos satélites GPS. Os sinais falsos enganam o receptor, fazendo-o calcular uma posição, velocidade ou tempo incorretos (Rados; Brkic; Begusic, 2024). O *spoofing* é particularmente perigoso porque pode ser realizado de forma discreta, dificultando sua detecção. Em cenários militares, ataques de *spoofing* podem ser usados para desorientar veículos não tripulados, mísseis ou sistemas de comunicação, como ocorreu recentemente na guerra entre a Ucrânia e a Rússia, quando a Ucrânia redirecionou diversos *drones* russos, que sobrevoavam o seu espaço aéreo com intenções hostis para a região da Bielorrússia (Vakulina, 2024).

No caso de um ataque via *spoofing* nas regiões das cidades de São José dos Campos/SP ou no distrito de Xerém/RJ, há o risco das escalas de tempo atômicas do IFI ou do INMETRO serem calibradas com as medições do GPS contendo atrasos falsificados e, com isso, ser inserido um erro sistêmico imperceptível na disseminação da grandeza de tempo para as

unidades operadoras do COMAER. Conseqüentemente, todos os processos técnicos que dependem de alta precisão e exatidão de tempo e frequência rastreados ao IFI seriam severamente impactados.

Cabe ressaltar que práticas como o SA e o *spoofing* também representam um risco significativo aos sistemas de infraestrutura crítica do país que necessitam de sincronismo de alta exatidão. Como exemplo, a perda de sincronização causada por ataques de *spoofing* nas redes de telecomunicações comprometeria a qualidade, aumentando a quantidade de quedas de chamadas, bem como a redução na capacidade de usuários conectados (Rados; Brkic; Begusic, 2024).

Em ambos os cenários (SA ou *spoofing*) obviamente não haverá qualquer tipo de aviso prévio pelo operador estrangeiro ou atacante hostil e, tanto a equipe técnica do IFI quanto a do INMETRO ficariam impossibilitadas de tomar medidas corretivas ou de contingência imediatas. O tempo decorrido até a detecção do problema seria um fator relevante para a segurança de voo e, portanto, o uso de um sistema nacional como o SGDC certamente será capaz de mitigar as vulnerabilidades relativas a indisponibilidades, degradações e falsificações dos sinais do GPS necessários para garantir a calibração do padrão de referência de tempo do SISMETRA e a manutenção da soberania nacional.

## 2.2 PERFORMANCE TÉCNICA SUPERIOR AO GPS

O GPS foi um dos sistemas precursores no processo de comparação das escalas de tempo, sendo até os dias atuais amplamente utilizado pelos Institutos Nacionais de Metrologia no processo de realização do UTC (Defraigne; Petit, 2015). Com o surgimento de outros sistemas globais de navegação por satélite como o GALILEO da União Europeia, o GLONASS da Rússia e o Beidou da China, o método evoluiu possibilitando incorporar os sinais de múltiplas constelações, o que melhorou o processo de realização do UTC. Entretanto, o desenvolvimento de outros métodos de comparação, como o TWSTFT e por *links* por fibras ópticas, permitiu comparações independentes e melhorias na exatidão das medições.

Atualmente, o método TWSTFT é utilizado somente por alguns laboratórios na Europa, América do Norte e Ásia (Tavella; Petit, 2020) e possui incerteza de tempo em torno de um nanosegundo e estabilidade em frequência na ordem de  $10^{-15}$ . A técnica permite comparações em quase tempo real e é menos suscetível a anomalias atmosféricas que frequentemente afetam o GPS (Huang *et al.*, 2016).

Na prática, a operação do SGDC possibilitará ao Brasil ser o precursor do método TWSTFT na América Latina e trará melhorias técnicas expressivas para o processo de calibração do relógio atômico do IFI. A incerteza de medição, atualmente na ordem de 30 nanosegundos, será significativamente reduzida. Além disso, a comparação em quase tempo real será um grande avanço, eliminando o atraso mínimo de 16 minutos do processo atual.

Outrossim, o método TWSTFT é bidirecional, ou seja, os sinais são gerados e recebidos por estações terrestres previamente configuradas que utilizam antenas direcionais e transceptores não comerciais. Tais características podem dificultar ameaças como o *spoofing* durante a propagação do sinal na atmosfera (Lima; Tarelho, 2022). Em outras palavras, o uso de transceptores previamente configurados e antenas direcionais com ângulos de abertura restritos no IFI e no INMETRO diminuirá significativamente o risco dos *links (up e down)* conterem algum tipo de falsificação como o *spoofing*.

Somado a isso, a implementação do TWSTFT no processo de calibração do relógio atômico do IFI também ampliará as possibilidades de colaboração científica, pois, qualquer laboratório localizado dentro da cobertura continental do SGDC que possua a infraestrutura necessária poderá calibrar seu padrão atômico à escala UTC mantida pelo INMETRO. Com essa iniciativa, o Brasil se tornará o primeiro país da América Latina a implementar oficialmente a tecnologia TWSTFT, consolidando-se como referência regional em metrologia de tempo e frequência na região.

Assim, a confiabilidade metrológica proporcionada pelo uso do TWSTFT promoverá maior independência tecnológica e robustez para as aplicações críticas do COMAER que dependem de sincronização de alta exatidão, em especial as áreas de controle de tráfego aéreo, manutenção aeronáutica e atividades espaciais os quais são suportados pelo SISMETRA, garantindo a soberania nacional.

### 3 CONCLUSÃO

A dependência do COMAER em relação ao GPS para a calibração da escala de tempo atômica do IFI representa um risco estratégico significativo, podendo comprometer a rastreabilidade metrológica do SISMETRA ao SI. As vulnerabilidades associadas ao GPS, tais como degradação intencional dos sinais e ataques tipo *spoofing*, podem impactar severamente os processos técnicos críticos que o SISMETRA suporta, relacionados ao controle de tráfego aéreo, manutenção aeronáutica e as atividades espaciais.

Assim, a utilização de um sistema nacional, como o SGDC, configura-se como uma alternativa estratégica e eficaz para mitigar as vulnerabilidades associadas à dependência do GPS no contexto do serviço de calibração da escala atômica de tempo do SISMETRA, sob responsabilidade do IFI. Dessa forma, o processo de rastreabilidade metrológica da grandeza de tempo se torna significativamente mais robusto e resiliente.

Ademais, o SGDC possui cobertura continental e viabiliza a implementação da tecnologia TWSTFT, que proporciona ganhos expressivos em confiabilidade e exatidão nas medições, além de reduzir as incertezas e eliminar os atrasos característicos do método baseado no GPS. Outro diferencial da tecnologia TWSTFT é a transmissão e recepção dos sinais exclusivamente por antenas direcionais e estações previamente configuradas, o que contribui significativamente para a mitigação de ataques do tipo *spoofing*, comuns entre os usuários do GPS. Com isso, o Brasil pode se tornar o primeiro país da América Latina a implementar oficialmente a tecnologia TWSTFT, consolidando-se como referência regional em metrologia de tempo e frequência na região.

Sendo assim, reafirma-se que o uso do SGDC para a rastreabilidade metrológica da escala de tempo atômica do IFI contribui para a manutenção da soberania nacional pois garante a correta calibração do principal padrão do SISMETRA responsável por disseminar as grandezas físicas de tempo e frequência rastreadas ao SI para os diversos processos técnicos críticos do COMAER.

Por fim, é importante ressaltar que a cobertura continental proporcionada pelo SGDC potencializa o uso da tecnologia TWSTFT como alternativa ao método GPS para outros serviços que necessitam de sincronismo de alta exatidão, igualmente vulneráveis ao *spoofing* e a eventuais degradações intencionais, como o SA. Assim, a abrangência do serviço se mostra especialmente relevante para infraestruturas críticas, incluindo redes de telecomunicações, sistemas de distribuição de energia, serviços de carimbo do tempo e operações financeiras, entre outros que, bem como os processos técnicos do COMAER suportados pelo SISMETRA, são essenciais para a manutenção da soberania do país.

## REFERÊNCIAS

BIPM. **Time Department Data Base – Laboratories**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://webtai.bipm.org/database/showlab.html>. Acesso em: 13 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Política Nacional de Defesa e Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília, DF: Ministério da Defesa, [2024]. Disponível em:

[https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy\\_of\\_estado-e-defesa/pnd\\_end\\_congresso\\_.pdf](https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-defesa/pnd_end_congresso_.pdf). Acesso em: 13 abr. 2025.

DEFRAIGNE, P.; PETIT, G. CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS Time Transfer. **Metrologia**, [s. l.], v. 52, n. 6, p. 22, 19 Oct. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/52/6/G1>. Acesso em: 13 abr. 2025.

HUANG, Y.; FUJIEDA, M.; TAKIGUCHI, H.; TSENG, W.; TSAO, H. Stability improvement of an operational two-way satellite time and frequency transfer system. **Metrologia**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 881–890, 31 Mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/2/881>. Acesso em: 13 abr. 2025.

LIMA, M. V.; TARELHO, L. V. Characterization of PDOP for Locating a Geostationary Satellite using TWSTFT Links. In: **IEEE Latin-American Conference On Communications (LATINCOM)**, 2022, Rio de Janeiro. Anais [...]. Piscataway, NJ: IEEE, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10000557>. Acesso em: 13 abr. 2025.

PANFILO, G.; ARIAS, F. The Coordinated Universal Time (UTC). **Metrologia**, [s. l.], v. 56, n. 4, 18 Jun. 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ab1e68/meta>. Acesso em: 13 abr. 2025.

RADOŠ, K.; BRKIĆ, M.; BEGUŠIĆ, D. Recent advances on jamming and spoofing detection in GNSS. **Sensors**, [s. l.], v. 24, n. 13, art. 4210, 28 Jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s24134210>. Acesso em: 13 abr. 2025.

SEGANTINE, P. C. L. **GPS: Sistema de Posicionamento Global**. São Carlos: USP, 2005. p. 32. v. 1, ISBN 85-85205-62-8.

TAVELLA, P., PETIT, G. Precise times scales and navigation systems: mutual benefits of timekeeping and positioning. **Satellite Navigation**, [s. l.], v. 1, n. 10, 16 Mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43020-020-00012-0>. Acesso em: 13 abr. 2025.

UNITED STATES. **Executive Order 13905 of February 12, 2020: Strengthening national resilience through responsible use of positioning, navigation, and timing services**. Federal Register, Washington, DC, v. 85, n. 32, p. 9359–9361, 18 Feb. 2020. Disponível em: <https://www.federalregister.gov/documents/2020/02/18/2020-03337/executive-order-13905-strengthening-national-resilience-through-responsible-use-of-positioning>. Acesso em: 13 abr. 2025.

VAKULINA, S. **Lost and spoofed: How Ukraine redirects Russian drones to Belarus**. Euronews, [s. l.], 04 Dec. 2024. Disponível em: <https://www.euronews.com/my-europe/2024/12/04/lost-and-spoofed-how-ukraine-redirects-russian-drones-to-belarus>. Acesso em: 13 abr. 2025.