

# ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA DE TEMPO E FREQUÊNCIA NO INMETRO

Guilherme de Andrade Garcia <sup>1</sup>, Selma Junqueira <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ditel-Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, gagarcia@inmetro.gov.br

<sup>2</sup> MCT-Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil, selma@on.br

**Resumo:** O Inmetro está estabelecendo um enlace de visada comum GPS com o ON para assegurar a rastreabilidade local em tempo e frequência aos vários laboratórios que compõem o campus de Xerém. O enlace utilizará receptores GPS geodésicos multi-frequência e multi-canal para satisfazer aos requisitos metroológicos, participando da Rede Nacional de Estações de Referência de Tempo proposta em [1].

**Palavras chave:** transferência de tempo e frequência, receptores GPS geodésicos, escalas de tempo, metrologia científica.

## 1. INTRODUÇÃO

A Diretoria de Metrologia Científica - Inmetro está implantando um sistema para garantir rastreabilidade remota em tempo e frequência, em relação ao padrão de referência nacional, para os vários laboratórios que compõem o campus Inmetro-Xerém. O Laboratório de Frequência e Comunicações Ópticas, parte da Divisão de Telecomunicações, possui um padrão atômico comercial de Césio e precisa garantir a rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Tempo e Frequência (LPTF-Divisão Serviço da Hora DSHO-ON) e, em consequência, ao BIPM.

Este projeto visa implantar localmente a grandeza fundamental tempo/frequência (através da realização de sua unidade, o segundo/hertz) no campus Inmetro-Xerém, fornecendo rastreabilidade aos laboratórios que utilizam esta grandeza. Tal objetivo também atende à missão institucional do Inmetro:

III - manter e conservar os padrões das unidades de medida, assim como implantar e manter a cadeia de rastreabilidade dos padrões das unidades de medida no País, de forma a torná-las harmônicas, internamente, e compatíveis, no plano internacional, visando, em nível primário, à sua aceitação universal e, em nível secundário, à sua utilização como suporte ao setor produtivo, com vistas à qualidade de bens e serviços;

Devido aos constantes avanços científicos e tecnológicos e às atribuições legais do Inmetro, observa-se que os procedimentos tradicionais (deslocamento do padrão atômico de tempo e frequência do Inmetro ao Laboratório Nacional de Referência) para obtenção da rastreabilidade em tempo e frequência não mais atendem às necessidades de alguns laboratórios, tais como a padronização do metro utilizando

pentos de laser de femtosegundos e a padronização do Volt utilizando o efeito Josephson. Também para a Divisão de Telecomunicações é importante na implantação e caracterização de redes de dados de alta velocidade e das redes digitais de telecomunicação.

## 2. OBJETIVO

Constatou-se a necessidade de manter localmente um padrão de frequência de alta estabilidade e exatidão no Inmetro, para fornecer a seus laboratórios um sinal RF padrão de 10 MHz, necessário para sincronizar os equipamentos ao padrão de frequência primário, como mostrado na figura 1.

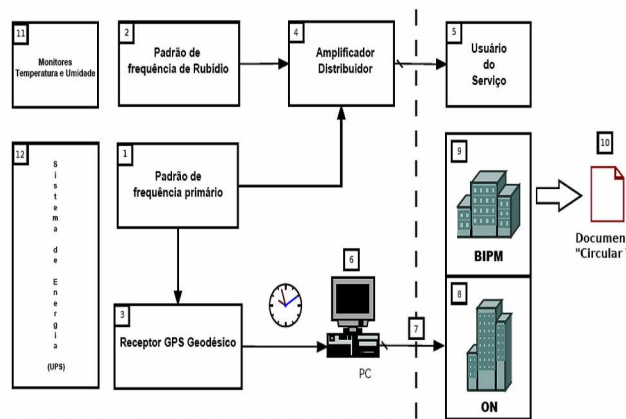


Figura 1 – Sistema proposto para garantia da rastreabilidade e distribuição de sinal de frequência padrão aos laboratórios usuários do campus do Inmetro em Xerém-RJ.

Atualmente existem métodos de comparação remota de padrões de frequência utilizando receptores GPS, prática recomendada pelo BIPM [3,5]. Também não é mais recomendável o transporte físico dos padrões ao laboratório de referência para a realização de calibrações, devido ao alto risco de acidentes e danos, e ao tempo de indisponibilidade do equipamento. Uma possibilidade alternativa a este procedimento é a participação no projeto Rede Nacional de Estações de Tempo e Frequência, proposta pela segunda autora deste trabalho [1], que oferece diversas vantagens quanto à garantia de rastreabilidade: comparação remota, monitoramento quase contínuo, procedimentos estabelecidos, grande automatização da coleta de dados, transferência de arquivos pela Internet e processamento remoto de dados. Estas características assumem grande importância para nossa

instituição devido à atual escassez de mão de obra especializada ocorrendo no Inmetro e no país.

A grande vantagem do método de visada comum usando receptores GPS geodésicos, especialmente para estações próximas entre si, como Xerem e o ON, é a minimização dos erros inerentes aos relógios, presentes a bordo dos satélites, e aqueles introduzidos por modelos para correção das interferências atmosféricas no sinal. Estes erros são cancelados entre si, pois são comuns às observações, e as medidas de tempo entre os relógios em terra podem ser realizadas com uma grande precisão. Através da inter-comparação dos relógios calculam-se as diferenças de tempo entre eles. Um algoritmo combina e pondera estatisticamente essas medidas, medindo a diferença de tempo com a estabilidade, exatidão e confiabilidade necessárias para garantir a rastreabilidade primária aos laboratórios, melhorando o nível de reconhecimento nacional e internacional para os padrões metroológicos brasileiros.

Outro fator a ser considerado é a diminuição do tempo de indisponibilidade de equipamentos e sistemas, que ocorria em função da calibração externa na DSHO-ON.

Além disso, este projeto complementa a infraestrutura básica de um laboratório nacional de metrologia, equiparando o Inmetro à mesma condição de diversos outros laboratórios nacionais (ON, INPE, IPT, etc.).

### 3. PROCEDIMENTO

#### 3.1. A Rede Nacional de Estações de Referência de Tempo (RENERT)

A Rede Nacional de Estações de Referência de Tempo utiliza receptores geodésicos, como os receptores multicanal e multi-frequência produzidos pela empresa Septentrio Satellite Navigation (Bélgica).

O laboratório INXE (sigla para Inmetro-Xerem), faz parte da Rede Nacional de Estações de Referência de Tempo utilizando um receptor GPS geodésico multicanal/dupla frequência modelo PolaRx3eTR-PRO [2], produzido pela empresa Septentrio Satellite Navigation. Este receptor consegue rastrear até 132 satélites dos sistemas GPS, Glonass, SBAS (*Space Based Augmentation System*) e Galileo (quando operacional), fazendo a leitura simultânea dos códigos C/A (*Coarse Acquisition*), P1 e P2, e das fases L1 e L2 de ambas as frequências portadoras. Foi adquirida uma antena do tipo choke-ring (código AERAT2775\_43 SPKE) para atenuar o problema de *multi-path*. Dessa forma será possível comparar o desempenho entre diversos relógios localizados nas duas instituições através dos dados de observação dos códigos P1 e P2 e das medidas de fase das portadoras L1 e L2.

O receptor PolaRx3eTR-PRO foi manufaturado para aplicações na área de transferência de tempo, ou seja, ele possui uma entrada para uma frequência de referência externa, 10 MHz, de modo que durante a sua operação o oscilador interno do receptor permaneça travado na frequência de referência externa [2,3]. O PolaRx3eTR-PRO

também possui uma entrada de 1pps externo, garantindo a continuidade do relógio interno do receptor. O que evita a interrupção da sua leitura devido as interrupções no rastreamento, tornando-o adequado para a transferência de tempo. Dessa forma, o sinal de 10 MHz fornece ao receptor uma referência de frequência precisa e o sinal de tempo de 1pps fornece uma referência de tempo precisa [2]. Para efetuar as leituras entre o tempoGPS e o tempo local, a entrada de 1pps deve ser usada em combinação com a referência de entrada de 10 MHz, e é importante que elas sejam provenientes da mesma fonte.

O relógio interno é sincronizado com o sinal de 1pps fornecido externamente. Após a sincronização inicial, a entrada de 1pps é ignorada pelo receptor, que passa a rastrear o tempo pela integração de sua frequência de referência ao sinal de 10 MHz fornecido externamente e proveniente da mesma fonte (do mesmo padrão atômico ou gerador de sinal). Conseqüentemente, o relógio interno do receptor é travado ao relógio externo. Se a fonte externa de 1pps e o sinal de frequência de 10 MHz forem gerados a partir do relógio que realiza T(INXE) obtemos uma medida contínua da diferença entre o tempo local T(INXE) e o tempoGPS.

O sinal de 10 MHz que alimenta o receptor é proveniente da saída de um padrão primário de tempo comercial de  $^{133}\text{Cs}$  (Agilent - modelo 5071A). A estabilidade nominal desse padrão, especificada pelo fabricante, é de  $5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ . Esse padrão, nomeado T146, fornece a referência de frequência para a realização local de T(INXE). O sinal de 1pps fornecido ao receptor é proveniente do mesmo padrão que fornece o sinal de referência de frequência.

O receptor é acessado remotamente por uma conexão TCP/IP. Para comunicar com o PolaRx3eTR-PRO usamos uma interface visual do software RxControl, com o qual é possível monitorar as atividades do receptor. É por meio desse programa que estabelecemos todos os parâmetros e configuramos a operação do receptor, como, por exemplo, o intervalo de aquisição dos dados temporais, o tipo de arquivo a ser gerado: SBF, RINEX, CGGTTS, entre outros.

A antena utilizada é do tipo choke-ring, código AERAT2775\_43 SPKE, produzida pela empresa AeroAntenna. Ela é capaz de receber o sinal do satélite nas duas frequências portadoras para o posicionamento preciso. O sinal medido pela antena é enviado para o receptor por meio de um cabo coaxial de baixa perda com 25m de comprimento. O atraso temporal do sinal, devido ao cabo, captado pela antena até o receptor foi medido como sendo 124,1 ns. Esse atraso foi determinado pela DSHO através do procedimento padrão para efetuar esse tipo de estimativa.

Na computação da diferença temporal entre o sinal de 1 pps de referência do laboratório e o sinal do GPS temos que levar em consideração o atraso devido ao armazenamento da medida pelo hardware do receptor. Como a defasagem temporal, entre o sinal de entrada de 1pps e o relógio interno ao receptor, não é fornecida pelo fabricante, para ter acesso ao seu atraso interno devemos usar a saída de 1 pps do receptor. Neste caso, o atraso devido ao tempo de armazenamento pelo hardware do receptor é de 188,8 ns. Esses valores são importantes uma vez que a computação da

diferença temporal entre as bases de tempo T146 – tempoGPS é obtida através dos dados corrigidos para os atrasos do hardware do receptor, antenas e cabos.

Os dados observados são salvos usando o formato RINEX (Receiver Independent Exchange) descrito em <ftp://igschb/data/format/rinex.txt>. Os 3 arquivos RINEX do tipo ASCII são (ftp://igschb.jpl.nasa.gov/igschb/data/format/rinex210.txt):

- Arquivos de dados de Observação
- Arquivos de dados de Navegação
- Arquivos de dados de Navegação dos Satélites Geoestacionários

### 3.2. Calibração dos equipamentos

O receptor e as antenas foram calibrados no ON, medindo os atrasos do receptor para os códigos P1 e P2. O procedimento utilizado é descrito na referência [7,10]. O tratamento estatístico dos dados (figura 2) forneceu o atraso em P1 e o desvio padrão das medidas, indicados abaixo:

$$\text{Atraso P1} = 84,4 \text{ ns} \quad \text{Desvio Padrão (P1)} = 0,6 \text{ ns}$$

Uma inspeção cuidadosa da figura 2 e da figura 4 mostra que existe uma estrutura subjacente aos dados, sugerindo uma variação periódica diária ou com temperatura. Além disso notamos uma deriva ao longo do conjunto de dados, que pode indicar algum outro tipo de problema como envelhecimento.

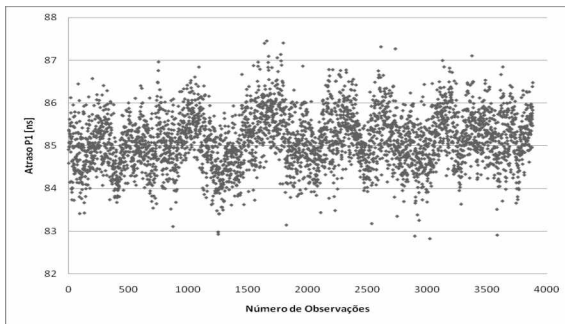


Figura 2 – Dados do atraso do receptor INXE no código P1.

O histograma dos dados mostrados na figura 2 pode ser visto na figura 3. Observamos que o conjunto de dados é bem aproximado por uma gaussiana (linha sólida) indicando que, apesar dos problemas notados visualmente na figura 2, o valor médio obtido é válido estatisticamente.

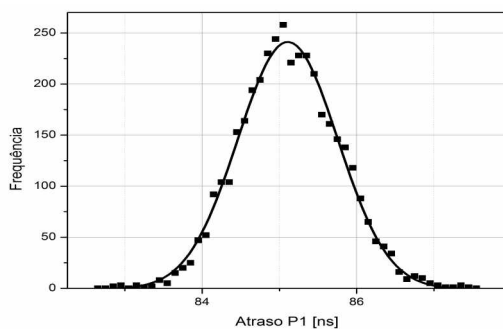


Figura 3 – Histograma com distribuição estatística das medidas de atraso em P1.

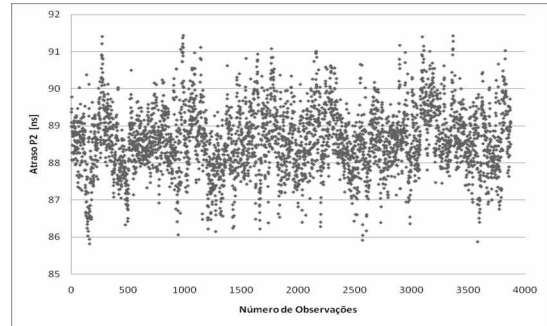


Figura 4 – Dados do atraso do receptor INXE no código P2.

A calibração do atraso do receptor no código P2 ocorreu de modo similar ao já discutido para o código P1 e os dados podem ser vistos na figura 4. Também notamos visualmente a presença de uma subestrutura nos dados mas de maneira menos pronunciada, com predominância agora de picos de curta duração e espaçamento aleatório. O tratamento estatístico dos dados forneceu os valores abaixo:

$$\text{Atraso P2} = 88,6 \text{ ns} \quad \text{Desvio Padrão (P2)} = 0,9 \text{ ns}$$

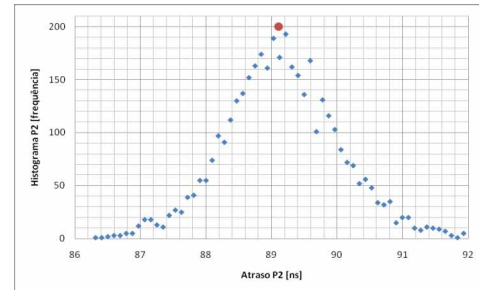


Figura 5 – Histograma com distribuição estatística das medidas de atraso em P2.

O exame do histograma (figura 5) dos dados da figura 4 mostra também que são bem aproximados por uma gaussiana, valendo as considerações anteriores.

### 3.2. Medida das coordenadas de base

Um passo inicial importante ao estabelecer uma estação de transferência de tempo é calcular as coordenadas geodésicas da antena com a maior precisão possível. Os arquivos Rinex de observação de 60 dias consecutivos foram processados usando o software NRCan-PPP, fornecendo

$$\begin{aligned} \text{Latitude} &= -22^{\circ}35'12,46137\text{s} & \text{DP} &= 0,00011\text{s} \\ \text{Longitude} &= 43^{\circ}17'01,43260\text{s} & \text{DP} &= 0,00017\text{s} \\ \text{Altitude} &= 25,707\text{m} & \text{DP} &= 0,008 \text{ m} \end{aligned}$$

Os dados acima para latitude (sul), longitude (oeste) e altitude (ITRF – IGS08) foram, então, adotados como as coordenadas definitivas do mastro onde está a antena geodésica.

### 3.2. Problemas com Multi-percurso (Multipath)

Um problema sério foi detectado na configuração atual do mastro e da antena. Examinando o gráfico planimétrico das

figuras 6 e 7, onde estão mostradas as posições de latitude e longitude coletadas a cada 30 segundos ao longo de um dia, notamos a grande dispersão dos dados e os lóbulos característicos de interferência multicaminho. Esta interferência surge de reflexões em estruturas planas próximas, de concreto ou metálicas, chegando ao receptor com amplitude grande e defasadas do sinal recebido diretamente. O receptor possui um algoritmo RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) que minimiza ou rejeita os sinais que sofrem interferência, mas esta é uma tarefa muito difícil e nem sempre bem sucedida.

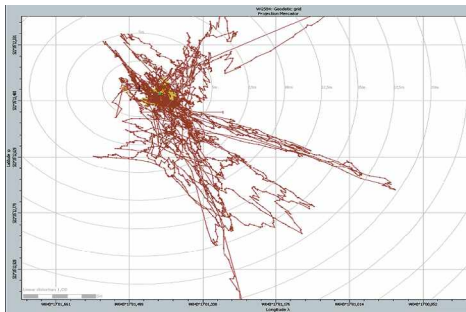


Figura 6 –Gráfico planimétrico para o dia MJD 55721.

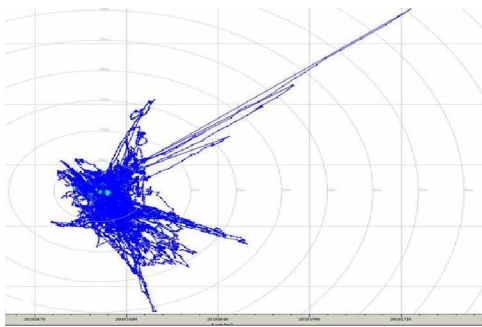


Figura 7 – Gráfico planimétrico para o dia MJD 55714.

Em nosso caso, esta interferência se mostra muito severa, às vezes fornecendo posições que diferem da posição de base por mais de 40 metros em várias direções. Este dado pode ser posto em perspectiva através de outro gráfico fornecido pelo fabricante do instrumento, visto na figura 8, que mostra que todas as observações planimétricas concentram-se dentro de um círculo de 0,75 m de raio. A razão destes dois números é maior que um fator de 50, mostrando que esta é uma característica do sistema que deve ser melhorada urgentemente.

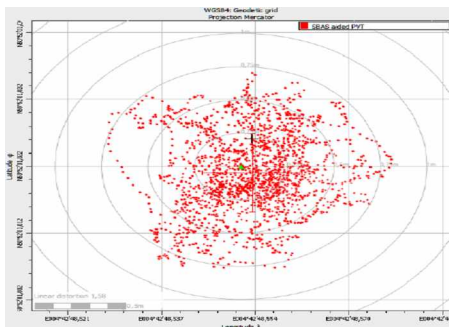


Figura 8 – Gráfico planimétrico fornecido pelo manual [2] do fabricante Septentrio para o receptor PolaRx3eTR.

Uma característica surpreendente desta situação, no entanto, é que os dados processados pelo algoritmo NRCan-PPP ([http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp\\_dir\\_e.php](http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_dir_e.php)) apresentam uma boa qualidade. Os dados de latitude, longitude e altitude mostrados na seção 3.2 mostram que os desvios estão dentro dos valores aceitáveis para dados processados pelo algoritmo PPP como divulgado pelo site do IBGE [9].

Outra possibilidade complementar que existe para explicar estes resultados anômalos é a influência grande de distúrbios ionosféricos na América do Sul. Existe uma grande atividade da ionosfera sobre o Brasil provocada pela presença da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, que faz com que a região equatorial de alta atividade da ionosfera se desloque e passe exatamente sobre o Brasil. Esta possibilidade está sendo investigada mas ainda demanda um estudo mais aprofundado, de preferência em conjunto com a Divisão de Geodesia do IBGE.

### 3.2. Cálculos de Visada Comum

Para analisar os resultados do deslocamento de tempo entre o relógio do laboratório e o tempo GPS, é importante seguir os procedimentos estabelecidos pelo CCTF (Consultative Committee for Time and Frequency) [3,5], ou seja, usuários de tempo devem utilizar os arquivos baseados na técnica de visada comum no formato padrão CGGTTS (CCTF Group on GNSS Time Transfer Standards) [3]. Esses arquivos, para os receptores geodésicos, são gerados a partir dos arquivos RINEX de observação e de navegação obtidos pelo receptor, com observações feitas a cada 30 segundos, usando uma ferramenta desenvolvida pelo Observatório Real da Bélgica [4] – denominada método P3. Tais arquivos têm a vantagem adicional de ler as observações do código P com um nível de ruído bem menor do que sobre o código C/A. Esse procedimento utiliza as informações das órbitas rápidas IGS.

Os dados foram coletados pelo receptor localizado no Inmetro e enviados para o ON, onde foram processados e extraídos os dados de visada em modo comum. Uma porção destes dados pode ser vista na figura 9, correspondendo ao data MJD 55701.

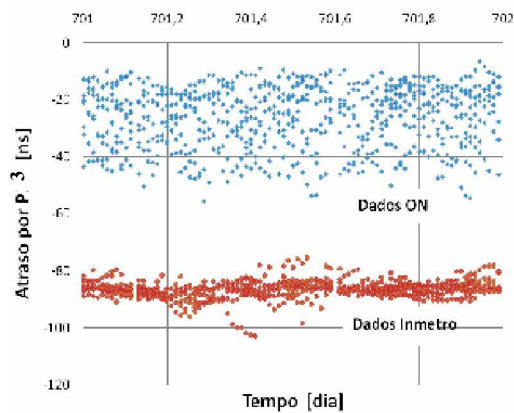


Figura 9 –.Comparação entre dados coletados pelo método P3 no ON (série superior) e no Inmetro (série inferior) para o dia MJD 55701.

Na figura 9 podemos ver claramente que existe uma grande diferença no nível de ruído apresentado pelos receptores instalados nos dois diferentes locais. O receptor ON apresenta um nível de ruído da ordem de 10 ns\_RMS, ao passo que o receptor Inmetro apresenta um nível bem menor, da ordem de 3 ns\_RMS, mas com uma série bem nítida de 'outliers'. Ainda mais intrigante é o fato do receptor INXE apresentar este nível menor de ruído, mesmo mostrando um nível de interferência multicaminho bem maior que aquele no local de instalação da antena do receptor ON. Como os receptores não são idênticos, são da mesma marca mas não do mesmo modelo, supomos que os algoritmos RAIM de mitigação de multicaminho produzam correções diferentes, resultando em um nível não equivalente de ruído de fase. Este efeito está ainda sendo investigando, tendo em vista que, no momento, o ON testa um receptor do mesmo modelo daquele empregado pelo Inmetro, que substituirá o atualmente em uso. Suspeita-se, no entanto que possa existir algum outro mecanismo de ruído que está influenciando negativamente os resultados do ON. Possivelmente, interferência elétrica no cabo que transporta o sinal de 1 pps da fonte até o receptor.

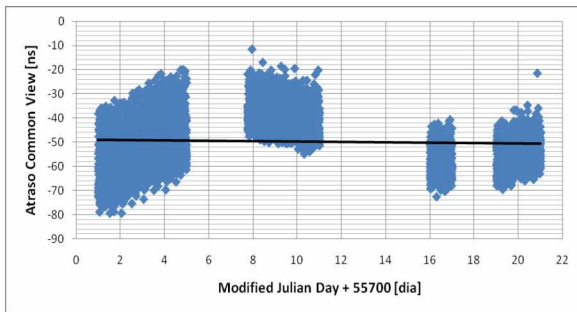


Figura 10 – Conjunto dos dados de visada comum para todos os satélites, coletados pelo método P3 entre ON e Inmetro, para o intervalo MJD 55700 a MJD 55722. Os dados apresentam, para cada época, a diferença entre os relógios de cada satélite.

Os dados consolidados de visada comum são mostrados na figura 10. Vemos que existe uma grande série de dias onde não foi possível a coleta simultânea de dados de visada comum, possivelmente devido aos problemas já relatados. Neste gráfico também estão superpostas as diferenças entre todos os satélites simultaneamente, em cada época. Estes resultados são ainda muito preliminares pois, a coleta e comparação de dados tiveram início a menos de 30 dias.

No gráfico da figura 11 podemos ver a média, entre todos os satélites, das diferenças entre o UTC(ONRJ) e o relógio T146-INXE, localizado no Inmetro. Vemos que a maior parte da dispersão dos dados está relacionada com a qualidade dos dados do ON, pois a literatura [4,8] relata desvios menores que 1 ns\_RMS e estamos obtendo desvios da ordem de 10 ns\_RMS. Claramente existe espaço nesta situação para muitas melhorias experimentais.

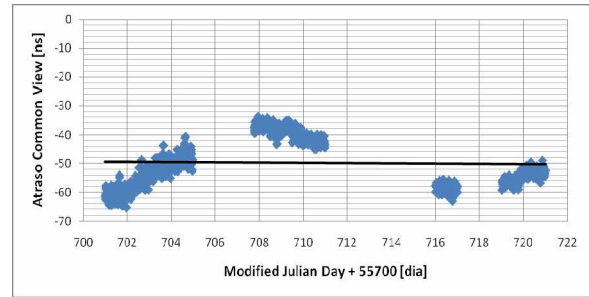


Figura 11 – Média entre todos os satélites dos dados de visada comum coletados pelo método PPP entre ON e Inmetro para o intervalo MJD 55700 a MJD 55722.

Adicionalmente, podemos ver na figura 12 o resultado para o comportamento do relógio T146-INXE em relação ao tempoGPS, obtido somente pelo processamento com o algoritmo P3 para o período completo de coleta de dados de 65 dias. Vemos que a variação é bem maior que a obtida com o método de visada comum (com o qual comparamos o T(INXE) com UTC(ONRJ)), indicando claramente a vantagem em termos de exatidão que este último método apresenta.



Figura12 – Dados “All in View”, adquirido com o software NRCAn-PPP, cortesia IBGE.

Na figura 13 podemos ver o cálculo da estabilidade empregando desvio de Allan do sinal de Visada Comum, para um trecho contínuo dos dados da figura 1,0 indo do MJD 55701 a MJD 55705. A estabilidade extrapolada para  $\tau = 1$  segundo é  $\sigma(y) = 8 \times 10^{-10}$  com  $\tau^{-1/2}$ . A resolução dos problemas relatados acima permitirá a extensão do cálculo do desvio de Allan por períodos maiores.

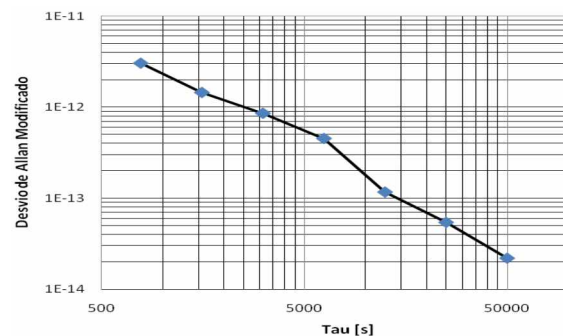


Figura 13 – Medida da estabilidade do sinal de 1pps do relógio T146 com relação ao sinal UTC(ONRJ).

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentamos os resultados de testes preliminares obtidos com receptores GPS geodésicos da empresa belga Septentrio, por meio de um enlace de visada comum entre o DSHO-ON e o Inmetro-Xerem. Os dados foram analisados utilizando os métodos P3 e PPP (*Precise Point Positioning*). O método P3 faz uso de uma combinação linear simples entre as observações dos códigos P1 e P2, como recomendado pelo CCTF (Consultative Committee for Time and Frequency) [5]. O método PPP permite um aperfeiçoamento dos resultados com o emprego não apenas dos códigos (P1 e P2), mas também das fases (L1 e L2). Na atual etapa do projeto o método PPP foi utilizado apenas para determinação precisa das coordenadas das antenas utilizadas para alimentar os receptores instalados em ambas as instituições. Complementarmente apresentamos o cálculo das correções dos diversos efeitos que introduzem atraso na medida da diferença de tempo local, T(INXE) e o tempoGPS. Estes efeitos resultam do armazenamento da medida pelo próprio receptor e antena e o atraso devido aos cabos.

Notamos também que existe possibilidade de melhorar ainda mais este sistema, pois a análise dos resultados mostra que ainda existem problemas na instalação das antenas e efeitos severos de multicaminho (*multipath*), que permitiriam reduzir a dispersão dos resultados de 10 ns\_RMS para níveis menores que 3 ns\_RMS. Para tal, períodos maiores de coletas e comparação de dados serão imprescindíveis.

A finalidade principal deste trabalho foi atingida, que é a demonstração do estabelecimento de um enlace por visada comum empregando receptores GPS geodésicos. Isto permitiu o início dos trabalhos para estabelecer a rastreabilidade da escala de tempo local T(INXE) ao UTC(ONRJ), beneficiando os laboratórios da Diretoria de Metrologia Científica-DIMCI do Inmetro no campus de Xerem.

#### REFERÊNCIAS

- [1] *Rede Nacional de Estações de Referência de Tempo*, Aida Bebeachibuli, Selma Junqueira, VIII Semetro, 2009.
- [2] PolaRx3eTR-PRO Version 1.1.0 User Manual.
- [3] *CGGTTS guidelines for manufacturers of GNSS receiver used for timing*. <http://tycho.usno.navy.mil/CGGTTS-Guidelines.pdf>
- [4] *Time transfer to TAI using geodetic receivers*, P. Defraigne, G. Petit, *Metrologia*, v.40, p. 184-188, 2003.
- [5] *Report of the 17th meeting to the International Committee for Weights and Measures*. [S.l.], 2006.
- [6] *Time stability and electrical delay comparison of dual-frequency GPS receivers*, A. Proia, G. Cibiel, and L. Yaigre, 41st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, pp 293-302.
- [7] *Determination of the differential time corrections for GPS time equipment located at the OP, PTB, NPL and VSL*, W. Lewandowski and L. Tisserand, Report BIPM-2008/01.
- [8] *Advances in time and frequency transfer from dual-frequency GPS pseudorange and carrier-phase observations*, F. Lahaye, P. Collins, *Proceedings 40th Precise Time and Time Interval (PTTI)*, pp 415-432.
- [9] *Resultados obtidos aplicando mapas de ionosfera para posicionamento absoluto e relativo na América do Sul*, S. Costa et al, XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- [10] *Estimation of the values and uncertainties of the BIPM Z12-T receiver and antenna delays, for use in differential calibration exercises*, G. Petit, BIPM document GP/TM.116, 2002.