



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO XV

Grupo de Estudo de Sistemas de Informação e Telecomunicação Para Sistemas Elétricos - GTL

**SINCRONIZAÇÃO TEMPORAL DE EQUIPAMENTOS USANDO REDE ETHERNET –
ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE**

**Sérgio Luiz Zimath (*) Marcelo Dalmas Carlos A. Dutra
REASON TECNOLOGIA S.A.**

**Arlan Luiz Bettiol
A VERO DOMINO**

RESUMO

O artigo faz uma descrição sucinta dos protocolos IRIG-B e NTP, ressaltando suas vantagens e desvantagens, e apresenta o protocolo IEEE1588 Precision Time Protocol (PTP), explicando sua filosofia de funcionamento, vantagens e perspectivas do seu uso no setor elétrico brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE

IEC61850, NTP, IEEE1588, PTP, IRIG

1.0 - INTRODUÇÃO

A importância do sincronismo temporal para a correta operação dos equipamentos elétricos instalados em usinas e subestações acentuou-se nos últimos anos. Atualmente, sua utilização é imprescindível em aplicações como medição de sincrofasores e localização de faltas por ondas viajantes, pois possibilita a precisa sincronização de dados que são disponibilizados por distintos equipamentos.

Um dos primeiros protocolos de sincronização utilizado nos sistemas elétricos foi o IRIG-B (Inter-Range Instrumentation Group). Pelo fato deste protocolo necessitar de uma rede independente para distribuição do sinal e ser muito susceptível às interferências eletromagnéticas, houve necessidade do desenvolvimento de novos protocolos de sincronização que pudessem contornar as dificuldades técnicas existentes.

Com a adoção de redes de comunicação Ethernet em larga escala nas subestações, ocasionada principalmente pela implantação da norma IEC 61850, ficou evidente que a maneira mais simples para distribuição do sinal de tempo naquelas instalações seria baseada em soluções utilizando-se a infraestrutura de comunicação já disponível. No entanto, os protocolos disponíveis neste tipo de rede (em especial, TIME, DATE, NTP e SNTP) não atendem plenamente os requisitos de precisão temporal impostos pelos equipamentos de supervisão e controle das subestações. Adicionalmente, a adoção do protocolo de sincronização SNTP como padrão da norma IEC 61850 provocou diversos problemas operacionais nas subestações, pois este protocolo é incapaz de compensar todos os atrasos de tempo existentes nas redes com as arquiteturas usadas nestas instalações (como anel, duplo anel, mesh, etc.), sendo que o tráfego de dados com prioridades distintas é significativamente afetado (nas redes IEC 61850, as mensagens GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events), por sua filosofia de concepção, possuem prioridades diferentes).

2.0 - SOLUÇÕES ATUAIS DE SINCRONISMO TEMPORAL

A grande variedade de soluções existentes para a sincronização de equipamentos em instalações elétricas gera confusão aos técnicos das empresas do setor elétrico devido à falta de uma padronização, especialmente para equipamentos mais antigos. Estes equipamentos incluem soluções como:

- Cabos seriais RS232 ou RS485 com transmissão de frames proprietários;
- Pulsos como PPS ou PPM em distintos níveis elétricos;
- Sincronização com protocolo IRIG-B, tanto óptico quanto elétrico, modulado ou não;
- Sincronização por NTP/SNTP; e
- Sincronização usando o protocolo PTP.

Este artigo não abordará as soluções de sincronização por RS232, RS485 ou pulsos, dado que são soluções antigas e não mais existentes nos equipamentos modernos. No entanto, mais detalhes sobre estas soluções de sincronismo podem ser vistos em [1]. Desta forma, pode-se contar atualmente com três diferentes soluções para se transmitir, de forma precisa, a estampa de tempo de um relógio para um equipamento elétrico: IRIG-B, SNTP e PTP.

2.1 IRIG-B

IRIG-B é a versão mais difundida do formato de transmissão de tempo desenvolvido pelo Inter-Range Instrumentation Group (IRIG), grupo responsável pela elaboração de normas para o Range Commanders Council (RCC) das forças armadas dos Estados Unidos. A primeira versão deste padrão foi divulgada em 1960 e a versão mais recente, IRIG Standard 2004, foi publicada em setembro de 2004.

O IRIG-B é composto por repetidos frames de 100 bits, contendo informações de dia, hora, minuto e segundos codificados em BCD (Binary Coded Decimal) e opcionalmente os campos CF (Control Functions) e SBS (Straight Binary Seconds of Day), transmitidos por sinais elétricos ou ópticos, conforme mostra a Figura 1.

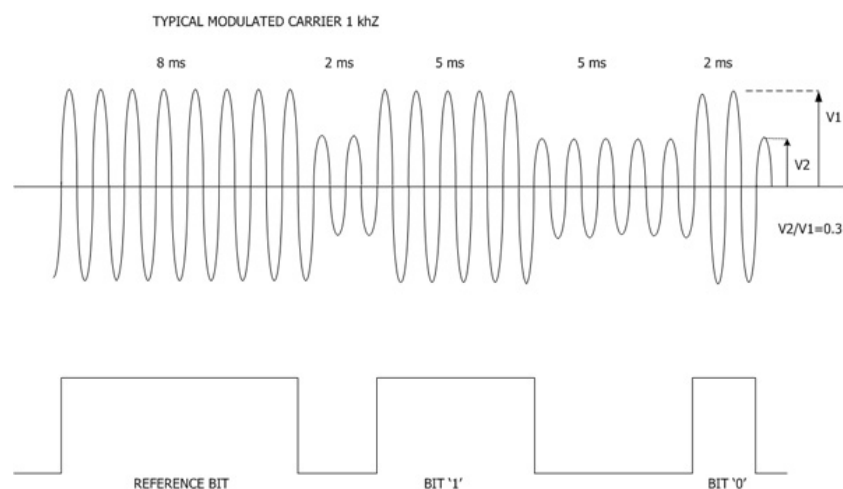


FIGURA 1 – Forma do sinal elétrico transmitido

A norma IRIG define seis formatos designados pelas letras A, B, D, E, G, H, conforme o frame rate, 10 fps, 1 fps, 1 fph, 6 fpm, 100 fps, 1 fpm, respectivamente. Pode haver ainda combinações de tipo de modulação de frequência (pulso, amplitude modulada sobre uma senoidal, Manchester), frequência da portadora e a presença de campos opcionais. Apesar da normatização destas características, há uma ausência na definição de outras características importantes como níveis elétricos, impedâncias e formatos de conectores. Com o advento das unidades de medição fasorial (PMU – Phasor Measurement Units), o conteúdo do frame foi atualizado pela norma IEEE 1344 adicionando informação de ano, fuso horário, horário de verão e qualidade do tempo transmitido, ficando o frame dependendo de duas normas.

Portanto a utilização de sincronização IRIG-B supre a necessidade de precisão na ordem de centenas de microssegundos, mas é necessário bastante detalhamento no projeto para que esta precisão seja atendida. Além das características citadas acima, devem ser observadas questões de arquitetura como a topologia em que vários equipamentos são ligados a um relógio, utilização de distribuidores e transceivers, isolamento elétrica e outros.

Somado ao custo do projeto, deve-se ainda considerar o custo da adição de mais uma rede exclusiva para sincronização, além da rede já utilizada para comunicação de dados.

2.2 NTP e SNTP

O protocolo NTP (Network Time Protocol), desenvolvido pelo professor David L. Mills da Universidade de Delaware desde 1980, é utilizado para sincronizar os relógios entre distintos computadores em uma rede de comunicação. O NTP apresenta as seguintes características:

- a. Como transmite o tempo através de uma rede Ethernet, tem funções de medição do tempo de envio e recebimento das mensagens para possibilitar a compensação do atraso causado pelo cabo ou fibra, switches, conversores óptico-elétrico e demais equipamentos de rede.
- b. Possui um algoritmo que ajusta o tempo do relógio a ser sincronizado de forma monotônica, ou seja, sem “pulos” no tempo para evitar descontinuidades. Assim, ele não copia simplesmente o tempo recebido na mensagem NTP para o relógio, mas adianta ou atrasa o mesmo até que a diferença de tempo seja baixa, o que explica a demora dos tempos dos diferentes relógios para se igualarem.
- c. Medição do drift do relógio a ser sincronizado e uso desta informação para manter o tempo quando da perda da sincronização com a fonte de tempo.

É possível se observar que muitos dos cuidados e complexidades do NTP são oriundos da necessidade de se manter a estabilidade do relógio em situações onde há perda da fonte de tempo, pois o conceito de funcionamento baseia-se na sincronização do relógio de um computador ao outro e não no envio de informações de tempo de forma precisa.

Infelizmente, a primeira versão da norma IEC 61850 adotou o NTP como forma de sincronização de IEDs, acabando por causar uma grande confusão de entendimento quanto à sua forma de sincronização. Ao sugerir o uso do NTP, procurou-se apenas utilizar a mesma estrutura de comunicação existente para a comunicação entre IEDs, sem analisar as necessidades de aplicações que estavam surgindo e que não foram abordadas pela primeira versão da IEC 61850, como, por exemplo, a tecnologia de medição fasorial. Ressalta-se que o capítulo 9-2 da referida norma, que trata da transmissão de valores amostrados pela rede (Merging Unit), aborda a sincronização com um sinal de PPS, reconhecendo que o NTP não atende a necessidade de tempo preciso necessário para esta aplicação.

Assim, iniciou-se o uso do NTP para sincronização de IEDs em subestações com o objetivo de sincronizá-los dentro de uma precisão requerida pelos procedimentos de rede do ONS de até 1 ms. Ensaios em laboratório mostraram que é possível se atingir este nível de precisão com as seguintes condições:

- Uso de um relógio de boa qualidade, visto que existem relógios NTP no mercado que, apesar de responderem mensagens NTP, não possuem precisão na sua resposta. Em outras palavras, o formado da mensagem NTP enviada pelo relógio obedece a norma, porém a precisão do tempo transmitido não possui precisão de milissegundo, ficando usualmente na ordem de 10 milissegundos;
- Uso de rede pouco carregada, ou seja, switches com pouco tráfego, principalmente de mensagens GOOSE, dado que estas mensagens possuem preferência em relação às outras que circulam pela rede. No caso em que uma mensagem GOOSE chegar depois de uma NTP, a mensagem GOOSE é transmitida antes, pulando a NTP, e causando atrasos da ordem de até milissegundos; e
- Implementação correta do cliente NTP dentro de IEDs, pois se verificaram vários casos de IEDs com capacidade de interpretar mensagens NTP, porém que não conseguiam copiar corretamente a mensagem para seu relógio interno, causando erros também da ordem de milissegundos.

Somadas todas estas fontes de erros, é bastante comum encontrar instalações que apresentam diferenças de tempo entre registros de distintos equipamentos da ordem de vários milissegundos, mesmo estando todos os equipamentos sinalizando que estão sincronizados.

Ressalta-se que a maior parte dos atuais IEDs implementa não o NTP, mas o SNTP, onde o S significa SIMPLE, ou seja, uma implementação simplificada que não implementa alguns algoritmos e que não armazena o estado durante longos períodos de tempo, em detrimento de uma maior precisão temporal. Como resultado, observa-se grandes dificuldades na análise de eventos e nas decisões sobre arquiteturas de sincronização baseadas em considerações incorretas. Adicionalmente, dado o requisito de redundância em uma rede de comunicação visando garantir o funcionamento do sistema mesmo em caso de uma falha em um ponto da rede de comunicação, se adotaram arquiteturas de sincronização não suportadas corretamente pelos IEDs. Por exemplo, é comum a instalação de relógios NTP com duas portas NTP em uma rede, no entanto, são poucos os IEDs que possuem em sua parametrização a possibilidade de configuração de dois endereços distintos de relógios. Assim, existem instalações em que um relógio com duas portas Ethernet são configuradas para um mesmo IP, de forma que, se

houver a perda da conexão em uma das portas, a mensagem será respondida automaticamente pela outra. No entanto, isto não é uma solução nativa do NTP e pode causar erros quando uma mensagem é respondida por mais de uma porta simultaneamente.

A experiência adquirida com o uso de NTP em subestações mostra as seguintes necessidades por parte da indústria do setor elétrico:

- a. A necessidade de sincronização de IEDs em subestações é inegável e necessária, não somente pelo requisito dos procedimentos de rede, mas também porque é efetivamente necessário para se operar o sistema, necessitando ser confiável e monitorada para, em caso de falha, ser corrigida rapidamente;
- b. O uso do mesmo cabeamento de comunicação IEC 61850 é visto como uma redução de custo muito grande, não somente pela não necessidade de se criar uma rede de sincronismo, mas também pela redução do custo de engenharia envolvido com a análise de burden de entrada, capacidade de saída dos relógios, distintos protocolos e configurações específicas em relógios e clientes;
- c. Necessidade de uma maior confiabilidade da sincronização nos IEDs, seja através da monitoração do estado dos relógios quanto da possibilidade de redundância; e
- d. Necessidade de uma maior precisão para sincronização de novas aplicações como PMUs, Merging Units e localizadores de defeitos por ondas viajantes.

Assim, percebe-se claramente que as necessidades acima não são atendidas nem pelo NTP (principalmente devido à sua baixa precisão) e nem pelo IRIG-B (devido à necessidade de uma rede adicional de sincronismo). Mas estas questões podem ser plenamente atendidas por uma tecnologia existente desde 2002, de uso comprovado em diversas indústrias (principalmente de telecomunicações) e já disponível no mercado: o protocolo PTP.

2.3 IEEE 1588 Precision Time Protocol - PTP

O protocolo PTP surgiu da necessidade da indústria de automação em obter dados sincronizados com uma elevada precisão, tendo sua primeira versão sido publicada pela IEEE em 2002. Em 2008 foi publicada a versão 2 da norma com o objetivo de abranger necessidades de outras aplicações, particularmente telecomunicações, através de um protocolo padronizado.

O principal diferencial do PTP em relação ao NTP é que aquele prevê o suporte por hardware para estampas de tempo que são transmitidas, sendo, desta forma, imune aos atrasos de processamento nos relógios, switches e IEDs clientes, permitindo atingir precisão abaixo de nanossegundos, desde que as implementações em todos os elementos da cadeia estejam trabalhando com este nível de precisão.

2.3.1 Pontos de Imprecisões na Implementação do Protocolo NTP

A Figura 2 mostra os pontos que acrescentam atrasos não determinísticos no caso do NTP e do PTP sem suporte em hardware, os quais não podem ser compensados de forma a zerar o atraso.

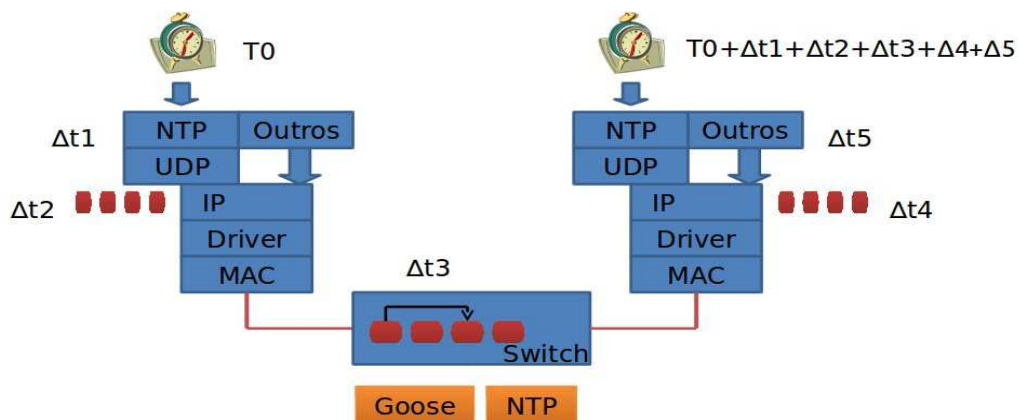


FIGURA 2 – Diagrama dos pontos de atraso não determinísticos

Os atrasos Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 , Δt_4 e Δt_5 possuem período variável, conforme as explicações abaixo:

- Δt_1 e Δt_5 : estes atrasos são causados pela disponibilização de tempo de processamento da CPU para o

processo do NTP/PTP, que concorre com outros processos que têm maior prioridade na CPU, como, por exemplo, as rotinas de proteção em um relé de proteção;

- Δt_2 e Δt_4 : as mensagens a serem enviadas entram na fila de envio do protocolo TCP/IP, onde podem existir mensagens para serem enviadas antes, que retardam o envio da mensagem do NTP, e também pela disponibilização de tempo de processamento da CPU, visto que usualmente rotinas de comunicação são executadas com prioridade mais baixa; e

- Δt_3 : a maior causa de atrasos, no entanto, é devida ao tempo de armazenamento e envio de mensagens pelo switch, uma vez que as mensagens GOOSE têm prioridade e podem passar à frente de outros tipos de mensagem, ocasionando atrasos consideráveis caso haja uma sequência de mensagens GOOSE circulando pela rede Ethernet.

2.3.2 Funcionamento do Protocolo PTP

O protocolo PTP é baseado em uma arquitetura cliente servidor em que mensagens são trocadas para determinar o offset e o atraso relativo ao tráfego na rede entre os relógios dos clientes em relação ao servidor.

Para sincronizar o relógio do cliente em relação ao do servidor é necessário ajustar a frequência dos relógios e compensar o offset entre eles. Para ajustar a frequência, são enviadas continuamente mensagens de Sync, conforme mostrado na Figura 3. Se o relógio mestre não possuir suporte para enviar a estampa de tempo t_1 na própria mensagem Sync, é enviada então uma segunda mensagem Follow_up contendo a estampa de tempo t_1 . O cliente recebe a mensagem Sync e guarda a estampa de tempo t_2 do momento da chegada. A frequência do relógio do cliente é ajustada de forma que o intervalo entre o envio das sucessivas mensagens Sync sejam iguais ao intervalo entre suas recepções, ou seja:

$$t_1^{k+1} - t_1^k = t_2^{k+1} - t_2^k$$

Para o ajuste do offset entre os relógios dos clientes e o relógio do servidor, é necessário se medir o tempo de atraso do tráfego de mensagens na rede (round trip time). Para tanto, o cliente envia mensagens de Delay_Req para o servidor, guardando o momento de envio t_3 , e o servidor responde com a mensagem Delay_resp, contendo a estampa de tempo t_4 do momento da recepção da mensagem Delay_Req pelo servidor. Considerando que os tempos de envio e resposta são simétricos, então se pode calcular o atraso e o offset como:

$$\text{Delay} = [(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)] / 2$$

$$\text{Offset} = [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)] / 2$$

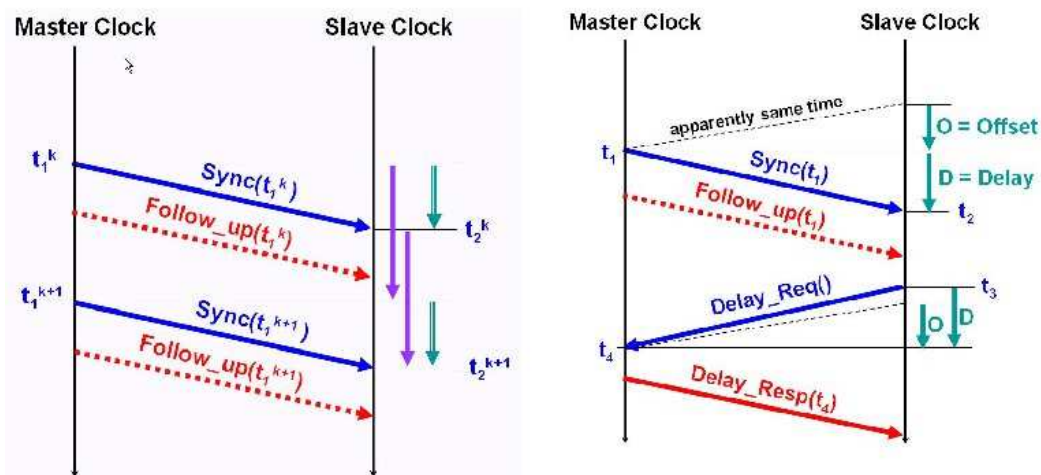


FIGURA 3 – Diagrama de tempo das mensagens do protocolo PTP

Para que o protocolo PTP alcance precisão abaixo de microssegundos, é necessários que todos os elementos de rede (relógio, switches e clientes) possuam suporte ao protocolo PTP em hardware. Esse suporte consiste na captura e geração de estampas de tempo diretamente na interface de rede. Figura 4 mostra o funcionamento do protocolo PTP quando assistido por hardware:

- Quando o relógio envia o pacote com a estampa de tempo T_0 , essa só é adicionada ao pacote no momento em que a interface de rede o envia, evitando assim os atrasos ocorridos pela espera de processo mais prioritários e das camadas de protocolos de comunicação;

- No switch, é cronometrada a variação do tempo de chegada até o tempo de saída (Δt_0), sendo essa compensada ou informada no pacote que sai do switch; e
- Por último, no cliente, o hardware guarda o momento em que o pacote chega à interface de rede, disponibilizando-o para quando o processo PTP necessitar.

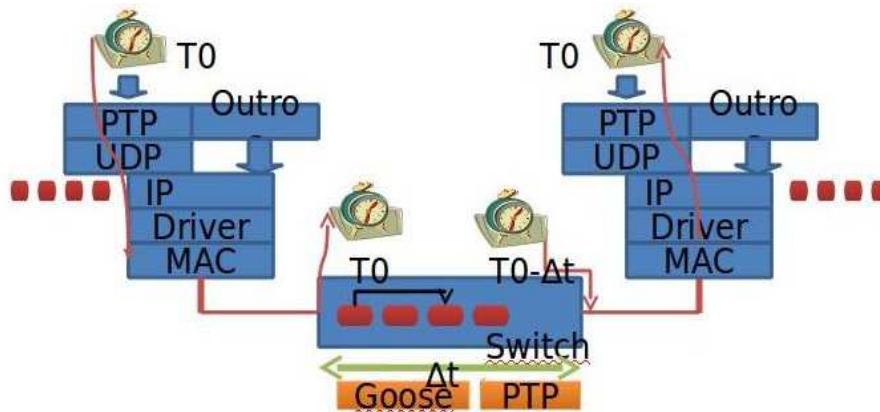


FIGURA 4 – Diagrama de auxílio de hardware do protocolo PTP

2.3.3 Características Adicionais do Protocolo PTP

A publicação da versão 2 da IEC 61850 definiu dois novos tipos de relógio além do Ordinary Clock e Boundary Clock: o End-To-End Transparent Clock e o Peer-To-Peer Transparent Clock. Isto possibilita a disponibilização de novas topologias de rede. Além dos novos tipos de relógio, a versão apresenta a opção para endereçamento Unicast, além do Multicast já definido na versão 1, novos mapeamentos para outros tipos de protocolo, novos formatos de mensagens, capacidade de monitoramento dos clientes PTP via rede, entre outras características.

Com o respectivo aumento do conjunto de opções de configuração, tipo de relógios e demais características, propôs-se a utilização de profiles para cada tipo de aplicação visando minimizar as questões relacionadas à interoperabilidade. Já existem trabalhos para o desenvolvimento do profile para a utilização da norma IEEE 1588 para sistemas elétricos de potência.

2.3.4 Resultados de Testes de Desempenho Realizados

Vários testes realizados indicaram que a precisão alcançada pelo protocolo PTP atende as atuais e futuras especificações técnicas, com interoperabilidade entre diferentes fabricantes e produtos, incluindo relógios, clientes e switches, conforme mostrado na Figura 5. Os resultados mostraram que a precisão, em todos os casos analisados, ficou menor que um microssegundo, atendendo com folga todas as possíveis aplicações.

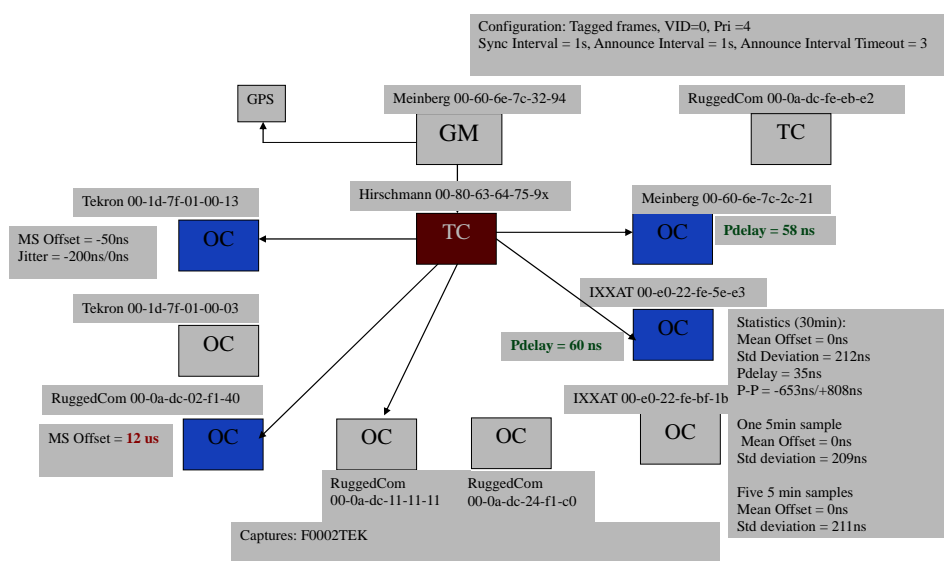


FIGURA 5 - Resultados obtidos no plug-test realizado em 11/01/2010

3.0 - CONCLUSÃO

Apesar de ainda ser pouco conhecido no setor elétrico brasileiro, o protocolo PTP já está em uso em aplicações no setor elétrico internacional, como descrito em [5], apresentando grandes vantagens técnicas e econômicas. Ele tem sido requerido por integradores para novas instalações elétricas devido à redução de custos de engenharia, integração, cabeamento e complexidade.

A definição da IEEE1588 como protocolo de sincronização de tempo na norma IEC 61850 versão 2, assim como a resolução das necessidades de usuários, também contribuirá para o aumento de sua gradativa adoção. Desta forma, diversos fabricantes de IEDs estão migrando seus equipamentos para esta tecnologia.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Abordagem prática para redes de sincronismo temporal baseadas no sistema GPS, VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle, Rio de Janeiro, 2005.
- (2) IEEE 1588-2008 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
- (3) Time synchronization with IEEE1588, Pac World, Summer 2009.
- (4) First IEEE PSRC WG H7 sub C7 1588 Plug-Fest, Pac World, March 2010.
- (5) Experience with IEEE1588 time synchronization for substation process bus, Pac World, December 2010.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Sérgio Luiz Zimath Formou-se em Engenharia de Controle e Automação em 1997 na Universidade Federal de Santa Catarina. Tem trabalhado para Reason Tecnologia desde 1995 onde foi o responsável pelo desenvolvimento de diversos produtos, tais como RT1000 e RT2000 (relógios GPS), bem como do Registrador Digital de Perturbações RPIV, entre outros. Atualmente é o Diretor de Inovação, responsável pelo desenvolvimento de novos produtos, softwares e projetos de pesquisa de novas tecnologias.

Marcelo Dalmas é graduado em Engenharia de Controle e Automação em 2001. Trabalha para Reason Tecnologia desde 2005 no desenvolvimento de software embarcado, participando do desenvolvimento de vários produtos das linhas de relógios GPS e de registradores digitais de perturbação.

Carlos Alberto Dutra é graduado em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal de Santa Catarina, em 1999. Trabalha na Reason desde 2003 e atualmente é Gerente de Desenvolvimento, sendo responsável pela gestão do desenvolvimento e do ciclo de vida dos produtos Reason.

Arlan Luiz Bettiol nasceu em Siderópolis (SC) em 07/02/1965. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1988 com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, concluindo seu Mestrado em Engenharia Elétrica em 1992, na mesma universidade e área de atuação. Obteve seu Ph.D. em 1999 pela Université de Liège (Bélgica). Trabalhou na ELETROSUL e lecionou em várias universidades. Atualmente, é sócio da Quântico Consultoria e da A Vero Domino Consultoria e Pesquisa, empresas de consultoria instaladas em Florianópolis (SC). Participa como pesquisador e/ou coordenador em diversos projetos de P&D para o setor elétrico brasileiro. Presta consultoria à ANEEL na avaliação de projetos de P&D. É responsável pela gestão de projetos de P&D de diversas empresas permissionárias de energia elétrica. Suas principais áreas de interesse são análise de sistemas de potência nos regimes permanente e transitório, localização de faltas, uso de PMUs e previsão de carga.