



**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**

ESTUDO DE DESEMPENHO DE SERVIÇOS IEC 61850 NA REDE SDH

Maurício Menon(*)
ITAIPU BINACIONAL

Bruno Marins Fontes
ITAIPU BINACIONAL

Artur da Silva Carrijo
ITAIPU BINACIONAL

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de utilização da rede de transporte SDH existente entre a Usina de ITAIPU (UHI) e as subestações da Margem Direita (SEMD) e de Furnas em Foz do Iguaçu (SEFI) para transporte de serviços baseados na norma IEC 61850. Foi criado um ambiente de testes através do qual foi possível analisar a performance dos pacotes desde sua geração no IED (*Intelligent Electronic Devices*) de origem na UHI até sua entrega no IED de destino na SEMD, e a respectiva mensagem de resposta, passando por todo o processo de mapeamento do tráfego *Ethernet* na entrada da rede SDH através das tecnologias de camada 2 (*Layer 2*) LCAS (*Link Capacity Adjustment Scheme*), GFP (*Generic Frame Procedure*), e VCAT (*Virtual Concatenation*). Com base nos tempos obtidos nos testes foi possível analisar a viabilidade da proposta através da comparação dos valores com os requisitos de entrega das mensagens IEC 61850 estabelecidos pela norma.

PALAVRAS-CHAVE

SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), EoS (*Ethernet over SDH*), LCAS (*Link Capacity Adjustment Scheme*), GFP (*Generic Frame Procedure*), IEC 61850, VCAT (*Virtual Concatenation*).

1.0 - INTRODUÇÃO

A rede de transporte SDH (Hierarquia Digital Síncrona) existente entre a UHI e as subestações de Furnas e da Margem Direita é composta por Multiplexadores ADM (Add/Drop Multiplexers) da ordem STM-1 interligados em anel através de fibra óptica com esquema de proteção 1+1. Atualmente esta rede é utilizada para transporte de serviços de voz como canais Hot-Line e ramais estendidos (FXS/FXO), serviços de dados PDH para comunicação entre dispositivos de automação e controle além de serviços de teleproteção através de interfaces de 64kbps codificadas G.703. Todos os serviços citados não consomem nem metade da banda disponibilizada pelo anel STM-1 (155Mbps).

O SDH é utilizado por empresas de transmissão de energia basicamente para substituir tecnologias maduras como carrier e micro-ondas. Alguns serviços adicionais de voz costumam ser utilizados. A capacidade não utilizada muitas vezes é comercializada para outras empresas. Implementar o transporte de serviços *Ethernet* na rede SDH possibilita interligar diferentes subestações através de uma rede de comunicação única. Os sistemas de automação e controle das subestações estão convergindo para uma arquitetura de comunicação baseada no protocolo *Ethernet* e por esse motivo torna-se importante viabilizar um meio confiável para estender as redes entre as localidades.

A Norma IEC 61850 define uma nova estrutura para automação da subestação com o objetivo de permitir a integração de diversos dispositivos envolvidos no sistema através de uma rede de comunicação única baseada em

Ethernet. A norma estabelece os requisitos de desempenho para comunicação dentro da subestação, mas está desenvolvendo padrões e modelos para comunicação entre subestações.

2.0 - ETHERNET NO SDH (EOS)

A tecnologia EoS (*Ethernet over SDH*) permite o transporte de serviços *Ethernet* através da rede mantendo todos os benefícios oferecidos pela tecnologia SDH como gerenciamento e supervisão completo da rede, alta confiabilidade através da operação em anel com esquema de proteção 1+1 e garantia de desempenho oferecida pelo esquema de multiplexação TDM (*Time Division Multiplex*). A entrada do tráfego *Ethernet* na rede SDH é feita através de uma interface instalada no equipamento ADM que recebe o tráfego através de 4 portas 10/100 BASE-T e realiza o mapeamento dos pacotes nos tributários VC-12 ou VC-3 disponíveis no multiplexador.

A interface realiza o mapeamento do tráfego *Ethernet* no SDH através do protocolo GFP (ITU-T G.7041). O protocolo GFP realiza o mapeamento baseado em cada quadro (*Frame based GFP* ou GFP-F) onde um a um os pacotes *Ethernet Layer 2* de diversos tamanhos são encapsulados em quadros GFP, que posteriormente serão mapeados em 1 ou mais tributários VC-12 ou diretamente no VC-3. Neste tipo de mapeamento, o protocolo GFP precisa conhecer o tamanho do pacote *Ethernet* para gerar o campo PLI (*Payload Length Indicator*) que faz parte do seu cabeçalho. Isso pode gerar atrasos no processo de mapeamento quando pacotes grandes estão envolvidos, uma vez que o GFP tem que esperar todo o pacote ser recebido primeiro para depois realizar o mapeamento no payload do quadro GFP. O quadro GFP adiciona um cabeçalho fixo por pacote o que permite a conversão determinística da banda *Ethernet* nos tributários. Na montagem do quadro GFP o quadro *Ethernet* é preservado sendo eliminados apenas os cabeçalhos de identificação de início de quadro e preâmbulo.

Um ponto importante a ser ressaltado com relação ao tempo de processamento necessário para o mapeamento do quadro *Ethernet* no quadro GFP é que um mesmo fluxo segmentado em uma quantidade grande de pacotes pequenos levará mais tempo para ser mapeado do que quando segmentado em pacotes grandes. Isso porque com pacotes pequenos uma maior quantidade de pacotes GFP será gerada e consequentemente mapeada nos tributários.

Em conjunto com o protocolo GFP a interface EoS permite a concatenação virtual de tributários afim de otimizar a alocação da banda durante o processo de mapeamento dos quadros. Esta técnica é denominada VCAT (Virtual Concatenation – ITU-T G.707) e permite, por exemplo, que 5 tributários VC-12 sejam concatenados em grupo virtual (VCG – *Virtual Concatenated Group*) para transportar um canal de 10Mbps. Sem o VCAT seria necessário utilizar um VC-3 inteiro para mapear o mesmo canal de 10Mbps. Essa técnica também pode gerar um atraso no tempo total de transmissão uma vez que os tributários concatenados precisam ser recompostos no equipamento de destino caso os mesmos tenham sido transmitidos por rotas distintas.

Em conjunto com o VCAT a interface possibilita também a alocação e readaptação dinâmica da banda gerada pela concatenação virtual. Essa técnica é denominada LCAS (*Link Capacity Adjustment Scheme*) e é especificada pelo ITU-T G.7043. O processo de readaptação é controlado através de mensagens de sinalização enviadas através do cabeçalho POH (*Path overhead*) dos VCs (*virtual containers*) que possibilitam a redução ou aumento do número de tributários concatenados sem interrupção ou perda de dados. O LCAS não é capaz de identificar a demanda de tráfego e automaticamente realocar a banda conforme a necessidade. A realocação precisa ser programada e definida previamente.

3.0 - REQUISITOS DE TEMPO EM REDES IEC 61850

Na norma IEC 61850-5, o tempo de transferência é definido como o intervalo necessário para completa transmissão de uma mensagem através da rede incluindo o processamento do algoritmo de comunicação no dispositivo IED em ambos os lados. O tempo de operação da teleproteção é definido da mesma forma na IEC 60834-1 (Equipamento de Teleproteção de Sistemas de Potência – Parte 1: Sistemas de Comando). Esta norma aplica-se aos sistemas de teleproteção utilizados para transmitir informações de comando, geralmente em conjunto com equipamentos de proteção. Visa o estabelecimento de requisitos de desempenho e métodos de ensaio recomendados para comando de equipamentos de teleproteção através de informações transmitidas em forma analógica ou digital.

Os tempos de transferência são questões definidas em projeto e verificadas em testes de aceitação. Quaisquer possíveis atrasos, decorrentes da inserção de componentes ativos na rede, como switches, ou por distúrbios no enlace de comunicação, devem ser definidos e considerados na avaliação do tempo de transferência. A norma IEC 61850-7 define formas de reconexão lógica do enlace de comunicação e repetição de mensagens para casos de degradação do canal de comunicação.

Uma mensagem GOOSE pode servir diversas aplicações de diferentes requisitos de performance, que são classificadas na IEC 61850-5 de acordo com a funcionalidade necessária e são independentes do tamanho da subestação.

São definidas classes de performance para aplicações de proteção e controle e para aplicações de medição e qualidade. Para aplicações de proteção e controle, onde o principal requisito é o tempo de transferência da mensagem, são especificadas três classes:

- P1: Se aplica a um bay de distribuição ou bays onde baixos requisitos podem ser aceitos;
- P2: Se aplica tipicamente a um bay transmissor ou se não especificado pelo cliente;
- P3: Se aplica tipicamente a um bay de transmissão com característica de alta performance de sincronismo e disjuntor diferencial. Onde um bay é definido como a conexão entre a linha e a subestação.

As classes de performances são utilizadas para classificar os tipos das mensagens utilizadas de acordo com as exigências da função a ser executada. Os tipos de mensagens utilizadas em aplicações de proteção e controle que requerem comunicação subestação-subestação são descritas na norma IEC 61850-90-1 como do tipo 1 – Mensagens de Alta Velocidade. Este tipo de mensagem contém informação binária como um comando de trip, abrir, fechar, iniciar, parar, bloquear, desbloquear, mudança de estado, etc, e é de tempo crítico para a performance da aplicação. O IED receptor deste tipo de mensagem deve agir imediatamente.

São divididas em dois tipos:

a) Tipo 1A – Trip

O “trip” é a mensagem binária rápida mais importante em uma subestação. Entre subestações, “bloquear” e “liberar” são tão importantes quanto. Este tipo de mensagem possui mais exigências comparadas a outros tipos de mensagens rápidas, são elas:

- Para “trip” dentro da subestação e dentro de um bay, o tempo de transferência não deve exceder 4 ms;
- Para “trip” dentro da subestação entre diferentes bays, o tempo de transferência não deve exceder 10 ms ou 4 ms, dependendo da aplicação.
- Para “trip” para outra subestação (por exemplo, para proteção de linha), os tempos de transferência devem obedecer requisitos definidos na norma IEC 60834-1, e devem ser suportados pelo sistema de comunicação aplicado (ver tabela abaixo).

b) Tipo 1B – Automação

São definidas como Tipo 1B todas as outras mensagens rápidas que são importantes para funções de automação entre IEDs e para interação dos IEDs com o processo, mas possuem menos requisitos comparados ao tipo “trip”. Os tempos de transferência para estas aplicação são de no mínimo 20 ms e máximo de 100 ms.

Tipo	Aplicações	Classe de Performance	Requisitos (tempo de transmissão)
1A	Mensagens Rápidas (Trip)	P1	10 ms
		P2/P3	3 ms
1B	Mensagens Rápidas (outras)	P1	100 ms
		P2/P3	20 ms
2	Média Velocidade		100 ms
3	Baixa Velocidade		500 ms
4	Dados Brutos	P1	10 ms
		P2/P3	3 ms
5	Transferência de Arquivos		> 1000 ms

TABELA 1 – Tipos de Mensagens e Requisitos de Tempo

Os tipos de mensagens 3 e 5 não se aplicam para funções baseadas em comunicação subestação-subestação.

4.0 - TESTES

4.1 Arquitetura da Rede

Para verificar a viabilidade da solução proposta foi montada um ambiente para testes conforme arquitetura mostrada na Figura 1. No equipamento ADM da UHI foi instalada a interface EoS com as 4 portas 10/100 BASE-T disponíveis (P3 a P6). A porta P3 foi utilizada para conexão com o *switch* representando a rede da SEMD e a porta P4 foi conectada com o *switch* representado a rede da UHI. As portas dos *switches* e da interface EoS foram configuradas para realizar auto-negociação 10/100 com canal *Full-Duplex*. Cada rede local representando um

ambiente IEC 61850 foi montada com um *switch Fast-Ethernet*, um IED SIEMENS SIPROTEC 7UT6 conectado ao *switch* através de um conversor de mídia e um *Notebook*.

No equipamento SDH da UHI foi mapeado um VC-12 (K131) da interface STM-1 conectada com o equipamento da SEFI para a porta P3. O mesmo VC-12 foi conectado entre as interfaces STM-1 no equipamento da SEFI e da SEMD. Novamente na UHI o mesmo VC-12 recebido pela interface STM-1 conectada com SEMD foi mapeado para a porta P4. Dessa forma, interconectou-se as duas redes através do anel SDH com um canal de 2 Mbps. Nesse cenário, para viabilizar os testes, as interfaces STM-1 não foram configuradas com operação 1+1.

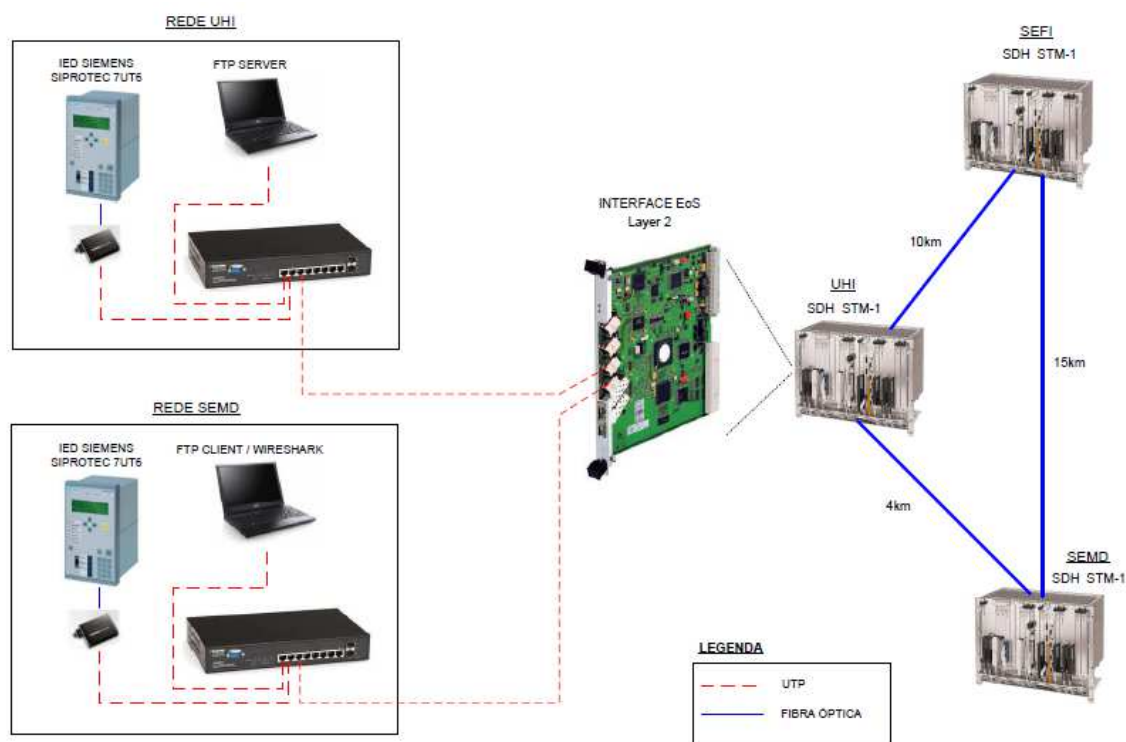


FIGURA 1 – Arquitetura dos Testes

4.2 Metodologia dos Testes

O IED instalado na rede da UHI foi configurado para gerar e enviar uma mensagem tipo Goose para o IED da SEMD. O IED da SEMD foi programado com uma lógica que recebia a mensagem Goose enviada pelo IED da UHI, processava a informação e enviava uma mensagem de resposta para o IED da UHI. Para medida dos tempos fim a fim foi tomado como referência o IED da UHI, no qual ficava registrado o momento do envio da mensagem Goose (mensagem SEND) e o momento do recebimento da mensagem de resposta (mensagem RECEIVE). Para o levantamento dos tempos utilizou-se o relógio do IED UHI, que é a diferença de tempo entre as mensagens SEND e RECEIVE registradas no mesmo IED.

As diferenças entre os tempos SEND e RECEIVE forneceu o tempo total incluindo os tempos de processamento interno dos IEDs, tempos de mapeamento na interface EoS, tempo de processamento e mapeamento do SDH, tempo de propagação na Fibra Óptica e tempo de processamento dos switches.

Através de valores médios estipulados para o tempo de processamento interno dos IEDs, tempo de propagação na fibra e processamento do SDH, foi possível estimar o tempo de ida da mensagem GOOSE do IED da UHI até o IED da SEMD.

4.3 Cenários

Mantendo o mesmo mapeamento de 1xVC-12 para cada porta, foram criados dois cenários iniciais para os testes. No primeiro cenário basicamente apenas os IEDs estavam enviando mensagens na rede. Esse cenário foi denominado “sem carga”. No segundo cenário além dos IEDs a rede foi carregada com tráfego FTP gerado pelos

Notebooks conectados na rede. O objetivo era verificar o comportamento e desempenho das mensagens Goose mapeadas no SDH frente a uma possível sobrecarga da rede. Em um cenário real essa sobrecarga seria composta por pacotes de mensagens GOOSE, TCP, UDP, ICMP, etc, e poderia representar uma condição de contingência no sistema elétrico, o que ocasionaria a troca de mensagens em avalanche entre os IED's, uma configuração incorreta dos dispositivos, ataques externos à segurança da rede de comunicação e eventuais IED's defeituosos. Esse cenário foi denominado "com carga".

Mais dois cenários ainda foram montados afim de estimar os tempos médios perdidos nos equipamentos e IEDs envolvidos. Assim, no cenário 3 os IEDs foram conectados através de um switch e no cenário 4 os IEDs foram conectados diretamente.

4.4 Resultados

Os resultados são baseados no arquivo de log do IED utilizado, que após tratamento com ferramentas (sed e awk, principalmente) forneceu os tempos para análise. Foram obtidas 100 amostras na maioria dos testes. Os dados obtidos são valores médios, portanto são referências do desempenho médio dos equipamentos.

O tempo médio para a conexão direta entre os IEDs, ou seja, o tempo entre o envio da mensagem pelo lado A, recepção do lado B, processamento, envio da resposta e recepção da resposta pelo lado A é de 14,2 ms, com desvio padrão de 3,59 ms.

O tempo médio total é o tempo em que a mensagem GOOSE é enviada pelo primeiro IED, passa pelo conversor de mídia, switch, entra no SDH, passa pelo meio de transmissão, sai do SDH, passa pela switch, conversor, é recebida no segundo IED, este ultimo responde e pelo mesmo caminho no sentido inverso até a mensagem ser recebida no primeiro IED. Este tempo foi de 16,4 ms, com desvio padrão de 1,15 ms para o teste sem carga e 60,5 ms e desvio padrão de 12,2 ms para o teste com carga. A tabela 2 resume os dados obtidos:

Tempos médios												
Sem Carga												
IED_A	Conversor	Switch	SDH	Switch	Conversor	IED_B	Conversor	Switch	SDH	Switch	Conversor	IED_A
16,35 ms												
Com Carga												
IED_A	Conversor	Switch	SDH	Switch	Conversor	IED_B	Conversor	Switch	SDH	Switch	Conversor	IED_A
60,51 ms												
IEDs												
IED_A	>					IED_B	>					IED_A
14,21 ms												

TABELA 2 – Dados obtidos durante os testes

O tempo de transmissão total pode ser considerado como o tempo em que as mensagens GOOSE passam pelos equipamentos, descontando o tempo nos IEDs (lógica, scam, tempo de processamento, fila), ficando portanto próximo de 2,14 ms no caso sem tráfego. Considerando que o tempo de envio é igual ao retorno, o tempo de "fibra" é 1,07 ms.

No caso do teste com tráfego o tempo de transmissão total é 46,30 ms. Com a mesma consideração sobre os caminhos de envio e recepção, o tempo de "fibra" de TRIP do GOOSE seria 23,15 ms. A Figura 2 contém a ocupação de banda no teste com um E1 disponível, em uma transferência FTP.

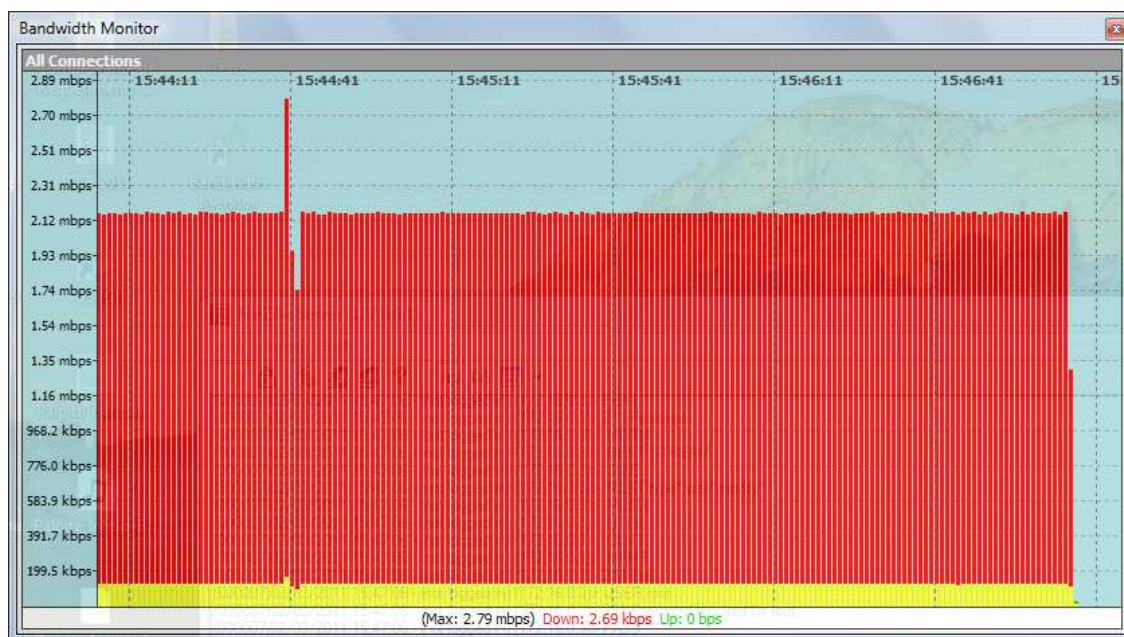


FIGURA 2 – Ocupação de banda

1394	1.970364	172.16.0.3	172.16.0.4	TCP	566	49496 > 49165 [ACK] Seq=463501 Ack=1 Win=65535 Len=500 TSval=789897010 TSecr=447212
1395	1.972495	172.16.0.3	172.16.0.4	TCP	566	49496 > 49165 [ACK] Seq=464001 Ack=1 Win=65535 Len=500 TSval=789897010 TSecr=447213
1396	1.972512	172.16.0.4	172.16.0.3	TCP	66	49165 > 49496 [ACK] Seq=1 Ack=464501 Win=257 Len=0 TSval=447240 TSecr=789897010
1397	1.973494	Ipccas_ff:a8:e5	Iec-Tc57_01:00:41	GOOSE	138	
1398	1.974612	172.16.0.3	172.16.0.4	TCP	566	49496 > 49165 [ACK] Seq=464501 Ack=1 Win=65535 Len=500 TSval=789897010 TSecr=447213
1399	1.976737	172.16.0.3	172.16.0.4	TCP	566	49496 > 49165 [ACK] Seq=465001 Ack=1 Win=65535 Len=500 TSval=789897010 TSecr=447213

FIGURA 3 – Captura de tráfego via *Wireshark*

5.0 - CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido serviu com ponto de partida inicial para utilização da tecnologia SDH como meio de transporte para interconectar redes IEC 61850 de diferentes subestações. Embora existam outras tecnologias disponíveis para interconectar duas redes locais como Metro-Ethernet, MPLS entre outras, o objetivo de se utilizar a rede SDH é aproveitar uma infraestrutura existente no cenário da ITAIPU e que já provou ser confiável e robusta para transporte de serviços críticos.

Os valores obtidos no cenário 1 “sem carga” foram satisfatórios e mostram que o mapeamento com 1 VC-12 foi suficiente para garantir um tempo de entrega adequado das mensagens GOOSE. Os pacotes das mensagens GOOSE são pequenos e como não havia tráfego adicional na rede os mesmos não sofreram atrasos de fila durante o processo de mapeamento.

No cenário 2 “com carga” os valores obtidos ficaram acima do esperado indicando que o mapeamento realizado não foi adequado para suprir a necessidade de entrega das mensagens goose. Analisando os resultados acredita-se que o principal fator de atraso ocorreu no processo de mapeamento dos pacotes. No tráfego FTP o TCP ocupa a banda disponível de forma agressiva e segmenta os dados em pacotes grandes que, devido à forma como o protocolo GFP-F atua, acabam sendo enfileirados na entrada da interface EoS prejudicando os pacotes menores como as mensagens GOOSE. O tipo de mapeamento feito pelo GFP-F prioriza a otimização da banda utilizada fazendo o mapeamento dos quadros um a um, o que acaba reduzindo a performance da rede com relação ao tempo de entrega quando pacotes grandes estão envolvidos. Em um estudo futuro pretende-se realizar novos testes utilizando diferentes tipos mapeamentos aumentando a quantidade de tributários para vários VC-12 e até um VC-3. Com isso espera-se levantar o impacto da largura de banda no tempo de mapeamento.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Engenheiros Sérgio Maurício Franczak e André Luiz Jordão da divisão de Engenharia de Manutenção Eletrônica – SMIN.DT da ITAIPU pelo suporte técnico e configuração dos IEDs utilizados nos testes.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Recommendation ITU-T G.7041 - Generic Framing Procedure (GFP), 2008.
- (2) ITAIPU BINACIONAL. Departamento de Engenharia Eletrônica e Eletromecânica. Workstatement – Equipamentos FOX-5151 para Ampliação do Sistema Óptico de Telecomunicações. Foz do Iguaçu: 2007.
- (3) ABB SWITZERLAND LTD. *FOX 515 – Technical System Description*: Manual. Suíça: 2002. 1 CD-ROM.
- (4) CISCO SYSTEMS. Advanced Technologies for SONET/SDH Metro Optical Infrastructure Deployment. Trabalho apresentado no Cisco Networkers 2003, Orlando, Flórida, EUA, 2003. Disponível em <www.cisco.com/networkers/nw03/wos.html>. Acesso em 8 jun. 2010.
- (5) MONTEIRO, B. Estudo e Análise Experimental do Mapeamento de Tráfego Ethernet sobre SDH. 2006. Dissertação de Mestrado – Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2006. Disponível em: <www.dominiopublico.gov.br>. Acesso em: 8 jun. 2010
- (6) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. International Standard IEC 61850- 5: Communication networks and systems in substations – Part 5: Communication requirements for functions and device models, 2003.
- (8) HOU, D.; DOLEZILEK, D., IEC 61850 – What it Can and Cannot Offer to Traditional Protection Schemes. 2008.. Disponível em <www.selinc.com>. Acesso em: 7 jul. 2010.
- (9) CARRIJO, A.S.. Proposta de uma Rede de Acesso Entre Subestações para Automação dos IED's de Proteção Primária e Alternada das Linhas de Transmissão de Itaipu Baseado na Norma IEC 61850. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Automação, Controle e Supervisão do Processo Elétrico Baseado na Norma IEC 61850, UNIOESTE, 2010.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Nome: Maurício Menon

Nascimento: 28/11/1981, Curitiba, PR.

Graduação: Engenharia Elétrica – ênfase Eletrotécnica, UTFPR, 2005.

Pós-graduação: Especialização em Automação, Controle e Supervisão baseado na norma IEC61850, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.

Trabalha desde Março de 2008 na Itaipu Binacional na Divisão de Montagem Eletromecânica – SOCM.DT.

Nome: Bruno Marins Fontes

Nascimento: 02/09/1984, Cascavel, PR.

Graduação: Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações, Universidade Federal do Paraná, 2006

Pós-graduação: Redes de computadores e Telemática, Universidade Federal Tecnológica do Paraná, 2008

Trabalha desde Setembro de 2008 na Itaipu Binacional na Divisão de Engenharia Eletrônica e Sistemas de Controle – ENES.DT.

Nome: Artur da Silva Carrijo

Nascimento: 17/11/1981, Franca, SP.

Graduação: Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia - MG, 2005.

Pós-graduação: Especialização em Automação, Controle e Supervisão do Processo Elétrico Baseado na Norma IEC 61850, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.

Trabalha desde junho de 2007 na Itaipu Binacional na Divisão de Engenharia de Manutenção Eletrônica – SMIN.DT.