

Metro Ethernet e Light-Trails: Uma Proposta Experimental de Integração Via Funcionalidades OAM

Flávio Rabello de Souza^{1,2}, Moisés R. N. Ribeiro¹

¹Laboratório de Telecomunicações (LABTEL) – Dept. de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – Vitória – ES – Brasil

²Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL – Brasil

flavio_rabello@yahoo.com.br, moises@ele.ufes.br

Abstract. *We present a low cost experimental setup which enables the physical layer of metropolitan networks to become dynamically reconfigurable under the Light-Trail (LT) paradigm. We demonstrate for the first time how a minimal Operation, Administration, and Maintenance (OAM) subsystem, based on Continuity Check Messages (CCM), could qualitatively evaluate LT optical segments, allowing them to be managed under a unified system. Case studies of LT switching time and evaluation of physical layer impairments, such as optical amplifier spontaneous emission noise and crosstalk from another LT, are presented.*

Resumo. *Apresentamos um arranjo experimental de baixo custo que torna a camada física de redes ópticas metropolitanas reconfigurável dinamicamente pelo paradigma de Light-trails (LT). Demonstramos pela primeira vez como um subsistema mínimo de Operation, Administration, and Maintenance (OAM), via mensagens Continuity Check (CCM), é capaz de avaliar qualitativamente os segmentos ópticos que compõem os LTs, permitindo a incorporação dos LTs a um sistema único de gerenciamento. Estudo de casos envolvendo os tempos de comutação de LTs e a influência de fenômenos de camada física, tais como o ruído de emissão espontânea de amplificadores ópticos e a interferência de outros LT na rede, são apresentados.*

1. Introdução

O explosivo crescimento de demanda de tráfego observada nas últimas décadas, tanto em largura de banda quanto em velocidade de provisionamento, vem sendo a base para a criação de novas estratégias dinâmicas que irão mudar radicalmente os aspectos das redes metropolitanas. Além da oferta de serviços de banda larga residencial, aplicações tais como backup de banco de dados institucionais em área geográfica diversa (*Storage Area Network*) [GUMASTE 2003, 2005], serviços de transmissões *multicasting* como IP-TV, vídeo de alta definição para monitoramento remoto de trânsito e tele-vigilância dos grandes centros devem transformar os conceitos atuais de rede de acesso e de rede metropolitana. Para que isso possa se tornar realidade, as redes metropolitanas existentes precisarão evoluir não apenas na direção da opticalização da sua infraestrutura, mas também na ampliação da capacidade de rápida reconfiguração da rede para melhor acomodar as características dinâmicas nas requisições de banda.

A perspectiva de uso das novas aplicações, como as citadas anteriormente, é decorrente do aumento da capacidade instalada, da casa dos Mbps para as dezenas de Gbps, possibilitada por transmissão sobre fibra óptica compartilhada em WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). O compartilhamento da infra-estrutura física em conexões ponto a ponto que o WDM possibilitou, permitiu a construção de redes metropolitanas (MAN – *Metropolitan Area Network*) multigigabit a custos viáveis. Estas novas MANs agora não mais utilizam um único comprimento de onda no meio, mas sim todo um espectro disponível, conforme padrões do *International Telecommunication Union* (ITU) para ocupação esparsa (“*Coarse*”) CWDM ou densa (“*Dense*”) DWDM. Um próximo passo na direção da dinamização de provisionamento seria a aplicação de tecnologias como a comutação transparente de comprimento de onda, até então viáveis economicamente apenas para as redes de transporte de telecomunicações.

Apesar da evolução das tecnologias de controle e comutação, decorrente da intensa pesquisa na área nas últimas décadas, os custos dos elementos comutadores ópticos plenos como os (*Optical Cross Connect – OXC*) [AGRAWAL 2002] ainda são elevados, dificultando a popularização do uso desta tecnologia em redes metropolitanas. Até mesmo o uso de *Reconfigurable Optical Add&Drop Multiplexers* (ROADM), que são utilizados em redes de topologia mais simples como anel ou barramento, pode ser proibitivo em redes MAN. Soma-se o fato de que o aumento na demanda por largura de banda não foi acompanhado pelo equivalente aumento de receita das operadoras, o que nos leva à necessidade de desenvolvimento de soluções de custo ainda mais baixo para a comutação de comprimentos de onda em redes MAN.

O conceito de Light-Trails (LT) [FREDERICK 2004; GUMASTE 2003b] é uma proposta para simplificar o problema de comutação no domínio óptico. O objetivo é estabelecer uma conexão unidirecional entre origem e destino (um LT), em um único comprimento de onda, que permite a todos os nós intermediários transmitir dados aos nós vizinhos, no sentido do fluxo origem-destino, sem necessidade de conversões OEO (Optical-Electrical-Optical). O estabelecimento destas conexões unidirecionais depende da segmentação controlada da rede, papel que é desempenhado por dispositivos de baixo custo como filtros ópticos sintonizáveis, fazendo a função de chaves ON-OFF, as quais no contexto de LTs são denominadas *shutters*.

No que diz respeito às arquiteturas da comutação eletrônica de pacotes, seguramente o padrão Ethernet é o padrão de fato nas LANs [KASIM 2008]. O *Carrier Class* Ethernet (Ethernet Classe Operadora) impulsiona hoje o desenvolvimento do padrão para MANs e WANs. Neste novo contexto surgiu a necessidade do desenvolvimento de diversas funcionalidades necessárias às soluções que almejam prestar serviços *Carrier Class* [AUTENRIETH 2007]. Funções como: *Operation, Administration and Maintenance* (OAM), isolamento entre os planos de Transporte/Gerência (da operadora) e o do usuário, proteção e suporte a *Quality of Service* (QoS). Isto habilita o padrão Ethernet a disputar espaço nas MANs e WANs com as tecnologias tradicionais, porém de custo bem mais elevado, como a *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH) e *Asynchronous Transmission Mode* (ATM).

Portanto, uma solução de comutação óptica baseada em LT integrada com a arquitetura de OAM do Carrier Ethernet poderia unir as vantagens que cada uma das arquiteturas oferece sob uma única plataforma de gerenciamento. Neste trabalho apresentamos a

implementação de um sistema mínimo, *i.e.*, que contenha funcionalidades OAM capazes de identificar falhas nos LTs, bem como controlar e monitorar as chaves ópticas (*shutters*) que atuam da delimitação dos segmentos ópticos que os definem.

O restante do artigo é dividido da seguinte forma: os trabalhos relacionados são discutidos na próxima Seção para destacar as principais contribuições apresentadas. Uma descrição dos sistemas envolvidos no trabalho é apresentada na Seção 3. A estrutura implementada é descrita na Seção 4. Os resultados experimentais estão na Seção 5, onde estudo de casos relacionados com o tempo de operação do *shutter* e limitações da camada física são demonstrados. As conclusões trazem os comentários finais e perspectivas de trabalhos futuros.

2. Trabalhos relacionados e contribuições

Desde sua proposta original [GUMASTE 2003], diversos artigos já discutiram vários aspectos da arquitetura LT, todavia quase sempre com enfoque conceitual ou apresentando resultados de simulações. Dentre os poucos trabalhos que avaliaram experimentalmente a arquitetura, podemos citar [VANDERHORN 2005] e [GUMASTE 2006]. O primeiro realiza uma avaliação experimental comparando métodos estáticos e dinâmicos de alocação de banda em redes baseadas em LTs. Já o segundo implementa uma rede física LT de 5 nós, com interfaces baseadas na tecnologia *field-programmable gate array* (FPGA), e apresenta resultados experimentais da avaliação de desempenho e de métodos de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control –MAC*).

O presente trabalho propõe a utilização de uma arquitetura *carrier class* ethernet na implementação de uma rede LT metropolitana (metro-LT). Demonstramos a viabilidade da utilização da infra-estrutura normatizada Eth-OAM como forma de viabilizar a integração entre estas arquiteturas. Os autores desconhecem, até o presente momento, trabalhos que realizem esta forma de implementação experimental da arquitetura LT sobre uma plataforma ethernet, tampouco que integrem, via funcionalidades OAM, o monitoramento de aspectos da camada física reconfigurável.

3. Elementos do sistema

3.1 Light-trails

Do ponto de vista da topologia física, a arquitetura LT permite a implementação sob a forma de barramento, anel ou mesmo em malha [GUMASTE 2004; 2003b; 2003c]. Para fins de ilustração, embora a arquitetura possibilite o uso de WDM, na Figura 1

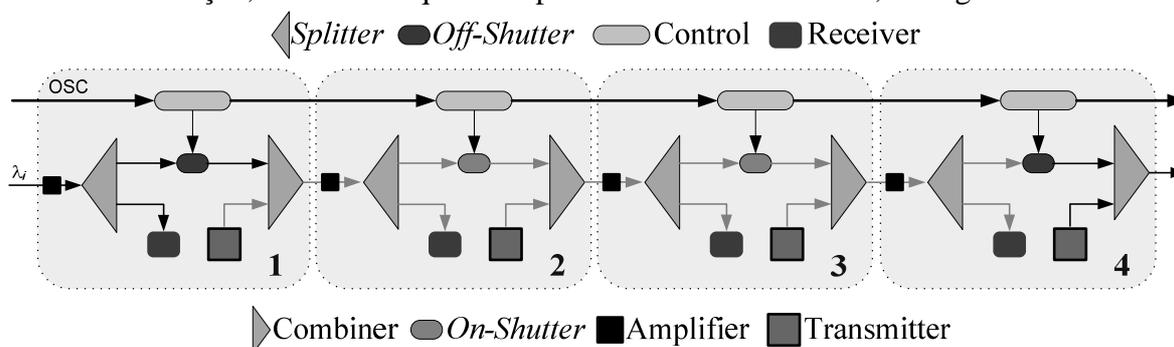


Figura 1. Ilustração de LT unidirecional estabelecido entre os nós 1 e 4.

consideraremos o cenário de um LT unidirecional, de 4 nós, em um único comprimento de onda. Este LT representa o comprimento de onda λ_l num sistema WDM com n canais.

O sinal óptico sobre λ_l é bloqueado no *shutter* do nó 1, de forma a permitir que seu transmissor utilize, sem conflito, esse comprimento de onda no estabelecimento do LT entre os nós 1 e 4. Note que o receptor do nó 1 ainda pode processar informações originárias dos nós anteriores que chegam neste comprimento de onda. O sinal óptico originário de um *UpNode* segue pelo LT no sentido origem→destino propagando-se por todos os nós. Ao chegar ao *splitter* de um determinado nó, tendo sido previamente amplificado opticamente, parte suficiente deste sinal é capturada e entregue ao seu elemento receptor, para que este possa identificar se a informação é destinada a ele e decidir se descarta o quadro ou repassa para as camadas superiores.

O restante do sinal óptico segue adiante (funcionalidade *drop and continue*) para o *shutter*, operado pelo canal óptico de controle (*Optical Supervisory Channel - OSC*) na modalidade fora de banda (*out-of-band - OOB*), que decide por permitir ou bloquear sua passagem. O sinal que não é bloqueado pelo *shutter*, passa então pelo *combiner* antes de deixar o nó. É neste ponto que o protocolo de MAC permitirá ou não ao nó inserir seus dados para transmissão.

Nos nós que encabeçam o LT (i.e., *convener node - CN*) e que o terminam (i.e., *end node - EN*), o *shutter* estará sempre na posição OFF, isolando este comprimento de onda neste trecho da rede, permitindo seu reuso nos demais segmentos da rede óptica. Em todos os demais nós intermediários do LT o *shutter* estará na posição ON, permitindo a passagem do sinal.

O controle do estabelecimento e destruição dos LT ao longo do tempo, bem como a troca de sinalização entre os elementos da rede, são realizados através do OSC. Este canal permeia a rede óptica, estando presente em todos os seus nós e sendo necessariamente processado eletricamente em cada um deles. É no OSC que também trafegam as informações sobre a disponibilidade de recursos, tabelas de LTs existentes e seus membros (i.e., o CN, EN e nós intermediários). Todas estas informações permitem ao plano de controle definir quando estabelecer novos LT, quando destruí-los, encurtá-los ou alongá-los a fim de atender às mudanças de demanda de tráfego das redes clientes.

É importante lembrar que os *shutters* não são reconfigurados dinamicamente a cada pacote ou *burst*, pois os LTs são criados para existirem na modalidade de circuitos ópticos. Com esta abordagem, minimizamos a necessidade de comutações ópticas sucessivas decorrentes das solicitações de estabelecimento de conexões entre pares origem→destino, reduzindo os tempos de reconfiguração e conseqüentemente a latência decorrente dos tempos requeridos para o provisionamento dos serviços. O light-trail poderá existir enquanto houver necessidade de comunicação entre quaisquer dos nós que dele fazem parte, podendo também ser “alongado” ou “encurtado” sem a necessidade de reconfiguração de qualquer natureza dos nós intermediários.

3.1.1 Controle de acesso ao meio

Face à possibilidade de operação baseada no compartilhamento do meio óptico, é importante que a arquitetura contemple também uma modalidade de MAC que arbitre a

alocação de recursos. O presente trabalho não aborda questões de MAC, todavia encontram-se na literatura os seguintes métodos para a arquitetura LT [GUMASTE 2003a; BALASUBRAMANIAN 2004; FREDERICK 2004]: LT-MAC: protocolo simples baseado no CSMA; LT-BUS MAC: semelhante ao LT-MAC, sendo acrescido loop de atraso no nó para reduzir probabilidade de colisão. LT FAIR ACCESS MAC: funcionamento baseia-se em um esquema *round-robin* com intervalos de transmissão (*slots*) pré-alocados.

3.1.2 LT em redes metropolitanas

O uso de LTs em redes metropolitanas se adapta bem às especificações feitas pelo Metro Ethernet Fórum (MEF) [MEF6.1 2008], visto que os três tipos de serviços definidos (E-LINE, E-LAN e E-TREE) podem ser perfeitamente implementados sobre a tecnologia LT diretamente na camada física. Uma arquitetura que provê conexões fisicamente transparentes entre elementos de comutação eletrônica contribui em muito para a redução das perdas, latências e suas incertezas (*jitter*) oriundas das filas dos switches. Por outro lado, a influência de problemas da camada física, que possam afetar a taxa de perda de quadros, torna-se fator importante a ser considerado nos sistemas ópticos transparentes como os baseados em LTs. Portanto, as funcionalidades de OAM podem ser uma ferramenta importante no monitoramento do desempenho dos sistemas Metro Ethernet que incorporam LTs sem necessidade da criação de outros protocolos.

3.2 Ethernet OAM (Eth-OAM)

Uma das funcionalidades básicas e mais importantes de um serviço *carrier class* é o suporte à Operação, Administração e Manutenção ou simplesmente OAM. Estas funções estavam presentes, até então, apenas em tecnologias maduras como SDH/SONET e ATM, que possuem nativamente recursos de monitoramento de conectividade (continuidade), detecção de falhas, testes de *loopback*, geração de alarmes e monitoramento/gerenciamento de desempenho.

Vários dos organismos mundiais responsáveis por normatizações relacionadas a telecomunicações vêm, nos últimos anos, se empenhando no lançamento de uma série de padrões relacionados ao Eth-OAM. As duas normas atualmente adotadas são as especificações feitas pelo IEEE [IEEE 802.1ag 2007] e ITU [ITU-T Y.1731 2006].

3.2.1 IEEE 802.1ag e ITU-T Y.1731

O Padrão IEEE 802.1ag, também conhecido com *Connectivity Fault Management* (CFM) e uma extensão (*amendment*) ao padrão 802.1Q-2005, que especifica funcionalidades básicas de OAM. Estas funções estão mapeadas nos seguintes protocolos: Detecção de Falhas (*Fault Detection*): *Continuity Check Protocol*. Tem por função verificar a integridade da rede, por meio do envio de mensagens periódicas unidirecionais denominadas *Continuity Check Messages* – CCM. Verificação e isolamento de falhas (*Fault Verification and Isolation*): *Loopback Protocol* – LB. O LB é utilizado, sob demanda, com a função de verificar conectividade entre MEPs ou entre um MEP e um MIP, sob a forma de mensagens *unicast* ou *multicast* denominadas *Loopback Messages* – LBM. Descoberta de Topologia (Path Discovery): *Linktrace protocol*. É uma função CFM utilizada sob demanda, que tem por objetivo permitir a descoberta de caminhos ou vizinhança (*path discovery*) e isolamento/localização de

falhas (*fault isolation*), sob a forma de mensagens *multicast* denominadas *Linktrace Message* – LTM [IEEE 802.1ag 2007].

Em linhas gerais, podemos afirmar que a especificação IEEE 802.1ag é um “*subset*” da recomendação ITU-T Y.1731, denominada “*OAM Functions and Mechanisms for Ethernet based networks*”, visto que esta última abrange um escopo muito mais amplo de funcionalidades OAM [ITU-T Y.1731 2006].

4. Sistema desenvolvido

A fim de possibilitar avaliação da funcionalidade OAM para a integração de uma rede LT, faz-se necessário, inicialmente, definir uma plataforma mínima para realização dos testes. A Figura 2 apresenta o sistema implementado, com detalhes dos dispositivos de reconfiguração do LT. O hardware e softwares desenvolvidos são discutidos a seguir.

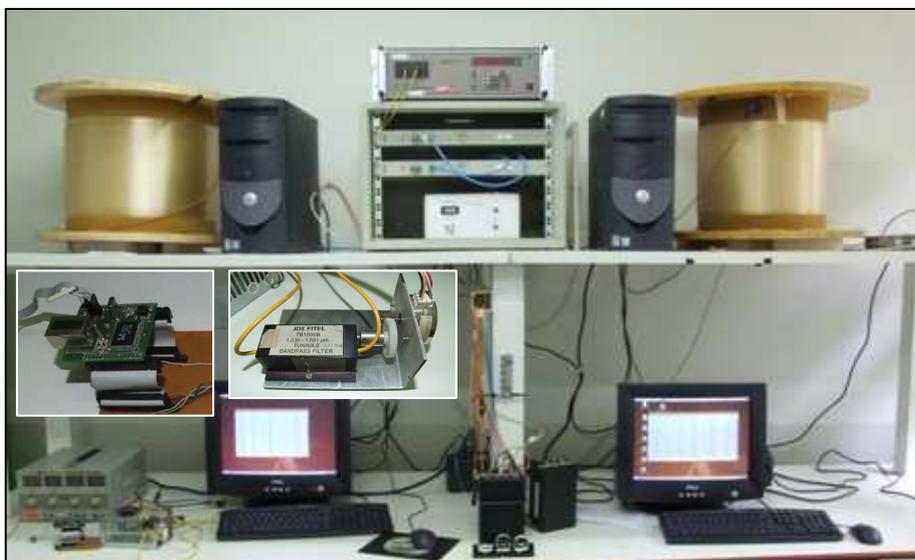


Figura 2. Sistema proposto. Visão geral do *setup* e detalhes dos elementos que compõem o *shutter*.

4.1 Hardware

Na proposta LT, o tráfego de supervisão e controle (S&C) opera *out-of-band*, sob canalização diversa daquela pelos quais circulam os demais dados da rede. Isto redundando em um ambiente com redes distintas para cada uma destas naturezas de tráfego. Neste sentido, nosso protótipo utilizou-se de duas redes diferentes, sendo uma para o tráfego de dados comuns entre as estações da rede LT e outra com função exclusiva de transportar informações de S&C, funcionando como um OSC.

A rede LT de dados opera na taxa de 1Gbps e foi construída sob a forma de um segmento óptico, tendo como base dois conversores de mídia PadTec/MCGE. Estes dispositivos, dotados de módulos GBICs long-haul operando a 1550nm, são os responsáveis por implementar os elementos que, conjuntamente com as estações de rede, assumem as vezes de nós LT. A rede OSC, por sua vez, foi emulada através de uma rede Ethernet operando sobre meio metálico a 10 Mbps. Um *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) faz as compensações no domínio óptico de perdas nas fibras e nos

splitters. Todavia, deve-se lembrar o EDFA produz o *Amplified Spontaneous Emission* (ASE), ruído óptico que vai eventualmente levar a um aumento da taxa de perda de quadros em função da elevação da taxa de erro de bits na rede de dados.

Às estações de rede presentes nos nós LT cabia a missão de construir, transmitir, receber, decodificar e analisar, simultaneamente, mensagens de S&C, quadros OAM e os dados propriamente ditos. Para que pudéssemos ter então estas redes operando distinta e simultaneamente, as estações de rede foram equipadas com dois adaptadores Ethernet cada: um ligado à rede óptica LT e outro à rede metálica de S&C.

Outro componente importante da rede LT é o *shutter*, elemento este com o objetivo de segmentar controladamente o uso dos comprimentos de onda ao longo da rede. Em nosso ambiente esta função foi desempenhada por um protótipo, composto de um filtro óptico Fabry-Perot mecanicamente sintonizável, ao qual adaptamos um motor de passo com acionamento microcontrolado. Este microcontrolador, baseado em um microcontrolador tipo PIC (*Peripheral Integrated Controller*) possui uma interface Ethernet, o que permite sua comunicação via rede com o sistema de S&C para recebimento dos comandos de abertura e fechamento do *shutter*. Note que o *shutter* pode não atenuar a totalidade de sinal óptico, o que pode dar origem a uma interferência óptica ocorrendo no mesmo comprimento de onda. Para ilustrar esse efeito, tome o LT apresentado na Figura 1. O *shutter* no nó 1, embora no estado OFF, na prática ainda permite a passagem de uma parte pequena do sinal originário do segmento anterior, sinal este que vai se misturar ao gerado no mesmo comprimento de onda pelo próprio nó 1. Como consequência, os nós subsequentes receberão o sinal oriundo do transmissor do nó 1 somado a um sinal interferente vindo de um LT anterior. Este efeito é conhecido como interferência homódina. A consequência será naturalmente a ocorrência de erros de bit e, portanto, perda de pacotes na comunicação sobre o LT.

No experimento também utilizamos um aparato auxiliar mínimo para realização de testes em sistemas ópticos, composto de: fibras, conectores, medidores de potência, *splitters*, controladores de polarização e atenuadores ópticos.

5. Software

No presente trabalho nos ativemos à implementação da funcionalidade de teste de continuidade, implementada através de quadros CCM. Em nossa análise optamos pela adoção da nomenclatura utilizada pelo ITU-T para os campos das mensagens OAM, quando referenciados.

Nas estações de rede, dois subsistemas OAM foram desenvolvidos. Ambos implementados, em linguagem ANSI-C utilizando-se de *socket raw* para a montagem do quadro completo OAM, sobre a distribuição UBUNTU Linux em kernel 2.6.24. O primeiro subsistema, denominado CCM-TX, é executado na estação transmissora e é responsável por gerar e enviar as mensagens CCM. O segundo módulo, denominado CCM-RX, é executado na estação receptora e tem a missão de receber e decodificar totalmente o quadro CCM que chega. Neste módulo, através de parâmetros informados em sua inicialização, podem ser selecionadas duas sub-rotinas distintas que definem sua modalidade de operação: o modo “debug” e o modo “BER”. O modo de operação “debug” tem por função decodificar completamente os quadros CCM recebidos, exibindo subsequentemente na tela as informações de forma estruturada. Já o modo de

operação “BER” (*Bit Error Rate*) nos permite mensurar e tabular as estatísticas necessárias à análise do comportamento estimado da taxa de erro de bits no LT com base nas mensagens OAM recebidas.

As ferramentas de testes básicas de software utilizadas para validação foram o Tcpdump e Wireshark (*sniffers* sem e com interface gráfica, respectivamente) para “debug” das mensagens que OAM que foram geradas. A estação executando o CCM-TX opera fora do modo gráfico para garantir a capacidade de geração de quadros CCM na maior taxa (300qps) sem a interferência das interrupções do sistema operacional.

Os dados coletados no CCM-RX são registrados de duas formas: exibição direta na console e gravação em arquivo texto, no formato *comma separated values* (CSV), permitindo importação direta em quaisquer ferramentas de análise.

Para que se pudesse controlar o *shutter* através de mensagens pelo OSC, fez-se necessária a implementação de um módulo de software embarcado em um sistema 2EI/PME10, baseado no microcontrolador Microchip® PIC18F8722, que atuasse sobre o conjunto motor de passo/filtro. Para este fim, desenvolvemos um programa em linguagem C (Microchip C) que tem por missão receber comandos via OSC, executando subsequentemente a ação equivalente sobre o conjunto motor-filtro óptico.

6. Estudo de casos

A estrutura desenvolvida permite a realização de diversos testes de avaliação de desempenho e de diagnósticos na arquitetura LT. Como estudos de caso, as funcionalidades implementadas nos permitem avaliar os seguintes quesitos:

- Tempo necessário para estabelecimento/comutação do LT;
- Efeitos da camada física, sob a forma de interferências por ruído faixa larga como o ASE e faixa estreita como a interferência homódina;

Estes fatores foram avaliados sob a ótica da:

- Perda de quadros CCM;
- Seqüência dos quadros recebidos;
- Delay e Jitter;
- Enfileiramento de mensagens OAM no sistema avaliado;
- Indicação de perda de continuidade do circuito óptico;

A fim de demonstrar as possibilidades de utilização das ferramentas OAM desenvolvidas em redes metro-LT, consideraremos nas seções seguintes alguns cenários práticos onde as mesmas podem ser prontamente aplicadas.

6.1 Tempo de comutação do LT

O procedimento iniciou-se posicionando o *shutter* em seu estado OFF e carregando os módulos CCM-TX e CCM-RX-BER nas estações. O *shutter* foi então movimentado, via mensagens no OSC, um número de passos suficientes para que o sistema realizasse a transição para o estado P_{on} , retornando em seguida à posição P_{off} . Este processo foi executado repetidas vezes para obtenção de uma série numérica de medidas. Coube ao sistema OAM desenvolvido a missão de mensurar estes intervalos de tempo entre eventos CCMLoss. As distribuições de intervalos de tempo de transição e da quantidade de quadros perdidos em cada evento podem ser observadas na Figura 3. Um valor médio

de 0,495 segundos entre a detecção de perda e recuperação de conectividade vista pelo sistema OAM na Figura 3a indica, portanto, que LTs podem ser estabelecidos (ou destruídos) em apenas $\frac{1}{4}$ de segundo quando apenas um *shutter* é acionado. A variância ficando em $6,2 \times 10^{-4} \text{ s}^2$ indica que numa cadeia de *shutters* para o estabelecimento de um LT cruzando vários nós, o tempo total para o fechamento de todos os *shutters* não seria muito distante do valor obtido para um único elemento. Na Figura 3b nota-se que em média 146,3 quadros CCM são perdidos no intervalo compreendido entre a interrupção e o restabelecimento do LT, valor coerente com uma taxa de 300qps interrompida, em média, em 0,495 s.

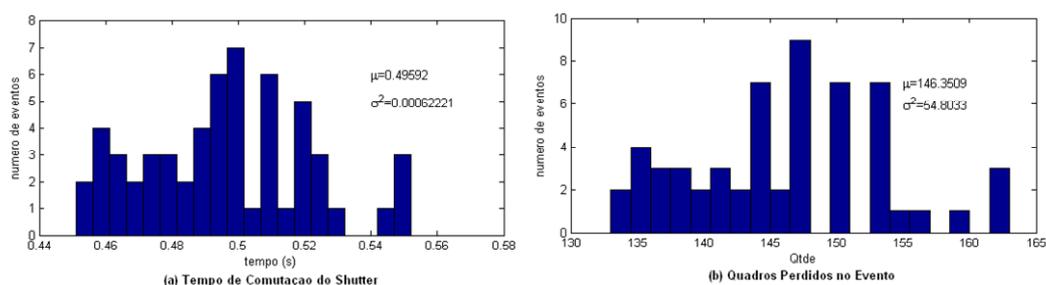


Figura 3. Histogramas da série temporal de atuação do *shutter*. (a) Tempo de comutação do *shutter* e (b) Quadros perdidos durante o evento.

Quanto à aplicabilidade prática em redes metro-LT, pudemos verificar pelo experimento que o quadro CCM, quando utilizado em testes de continuidade, pode servir para fins de verificação/confirmação do estado do LT. Esta verificação poderá ser utilizada, por exemplo, nas seguintes situações: **i)** após comandada a atuação de um *shutter* através do OSC, mensagens OAM podem ser enviadas (plano de dados) para verificar o instante em que a comutação se concluiu na prática. Isto permite que o plano de controle possa passar à próxima etapa do processo de formação/destruição/alteração do LT, sinalizando ao nó requisitante que o LT está efetivamente estabelecido. **ii)** Monitoramento fim-a-fim da integridade do LT para fins de proteção. **iii)** Medidas estatísticas de QoS relativas à disponibilidade do LT.

6.2 Monitoramento de Desempenho da Camada Física

Outro quesito que pode ser avaliado por meio da funcionalidade OAM é a análise qualitativa do canal de comunicação, através da avaliação do comportamento do sistema LT na presença de sinais interferentes. Esta avaliação pode ser utilizada para diversos fins. Um deles é na detecção e isolamento de falhas na rede. Nesta situação, a aplicação das funcionalidades OAM em uma avaliação de qualidade de cada um dos enlaces pode possibilitar a identificação do segmento da rede óptica causador da anormalidade. Outra aplicação está relacionada à oferta e garantia de qualidade de serviço. A funcionalidade OAM implementada pode ser, por exemplo, aplicada durante a admissão de uma nova conexão via análise prévia de um segmento óptico, a fim de verificar a viabilidade do atendimento de um determinado requisito de taxa de perdas de pacotes máxima aceitável. Como demonstração da viabilidade da ferramenta, fazemos a análise de duas situações extremas de sinais interferentes: interferência banda larga por ruído ASE e banda estreita por sinal interferente no mesmo comprimento de onda (i.e., interferência homódina).

6.2.1 Comportamento na Presença de Ruído ASE

Neste arranjo o EDFA tem a missão de funcionar exclusivamente como fonte de ruído ASE, uma vez que a caracterização será feita em função da relação sinal-ruído óptica (*Optical Signal to Noise Ratio* - OSNR) no receptor, a qual influencia diretamente na taxa de erro de bits, e, portanto, na taxa de perda de pacotes. O atenuador óptico, por sua vez, permite controlarmos o nível do sinal que chega, combinado ao ruído interferente, ao receptor.

Nas estações de rede transmissora e receptora, respectivamente, as medições deram-se com o carregamento das ferramentas CCM-TX e CCM-RX-BER. Com os programas em funcionamento e coletando os dados desejados, fixamos a potência de ruído gerado pelo EDFA (via controle de corrente de bombeio). Através do atenuador óptico ajustável, variamos a intensidade do sinal óptico do *transmitter* coletando dados em pontos distintos de atenuação, partindo do melhor caso, i.e., quando não se detectavam erros, chegando ao pior, onde não se detectava nenhum recebimento de quadros pelo CCM-RX. Esta operação nos possibilitou avaliar o comportamento do sistema em vários cenários de OSNR distintos.

Para cada ponto de leitura, o critério de parada utilizado foi o de recebimento de 10.000 quadros íntegros ou de um tempo total de coleta de 60s, sendo a leitura interrompida quando qualquer um dos critérios fosse atendido. O limite de tempo de 60s foi imposto em decorrência do fato de tornar-se inviável aguardar o recebimento dos 10.000 quadros válidos na medida em que aumentávamos a atenuação do sinal do transmissor.

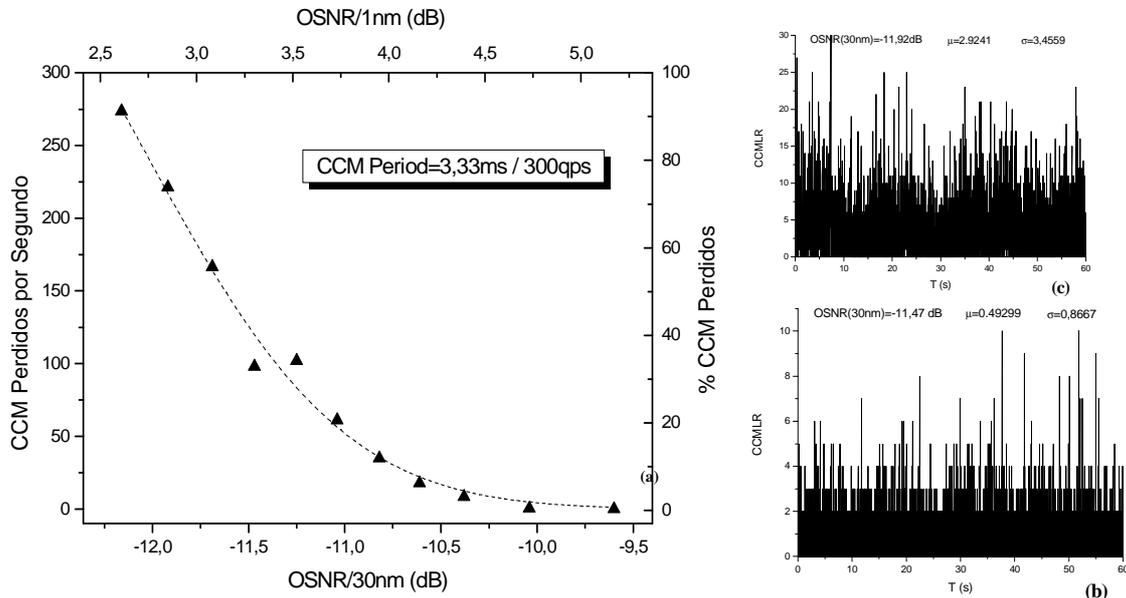


Figura 4. Taxa de CCM perdidos. (a) perda x OSNR e séries temporais CCMLoss para (b) OSNR=-11.47 dB e (c) OSNR=-11.92 dB (medidos em 30nm).

A Figura 4 apresenta a perda quadros CCM (CCM Loss Rate – CCMLR). Esta medição foi feita considerando a banda completa de nossa fonte de ruído EDFA, que é de aproximadamente 30nm (OSNR/30nm). Pode causar estranheza que a OSNR resultante tenha se mostrado negativo. Isto se deve à baixa sensibilidade de nosso receptor ($\cong -26$ dBm) onde o ruído térmico é predominante em relação ao ruído ASE no desempenho do

sistema. Uma aproximação para a equivalência das medidas em 1nm (OSNR/1nm) é apresentada na escala superior do gráfico da Figura 4a. Podemos observar que valores de OSNR inferiores a -12dB/(30nm) resultam em perdas próximas a 300 qps, o que equivale a dizer que quase todos os quadros CCM enviados estão sendo descartados. Por outro lado, valores melhores que -10dB/(30nm) se traduzem em perdas praticamente nulas. As Figura 4 (b) e (c) exibem as séries temporais para dois valores distintos de OSNR, denotando um comportamento estacionário da influência da ASE na perda de quadros.

É importante ressaltar que em nosso caso não foi utilizado nenhum tipo de filtragem óptica do sinal no lado receptor, no sentido de restringir a largura de banda do ruído que a ele chega. Todavia em sistemas WDM o processo de demultiplexação em si naturalmente restringe a largura do sinal em suas saídas, o que influencia diretamente na OSNR do sinal óptico que chega ao fotodetector, levando-o a melhores resultados que os obtidos aqui. Em suma, nossa análise pode ser considerada como um “pior caso” quando comparada a um sistema WDM prático.

6.2.2 Interferência Homódina

A interferência homódina em redes LT caracteriza-se por situações em que, por imperfeições e falhas nos *shutters*, um determinado comprimento de onda de um LT anterior a um *shutter* em posição OFF sobrepõe o sinal óptico do segmento seguinte. A interferência heteródina, por sua vez, ocorre em situação semelhante, porém com a interferência causada por comprimentos de onda diferentes do que transporta o sinal desejado. Considerando que em redes metro ethernet a tecnologia CWDM tende a ser mais aplicada, a tendência é nas redes metro-LT a interferência homódina venha a predominar.

Em nosso experimento, avaliamos o “pior caso” para a interferência homódina, onde ambos os sinais, principal e interferente, gerado através da derivação do sinal principal, possuem exatamente o mesmo comprimento de onda. Entretanto não seria razoável estudar um cenário onde as fontes possuam coerência de fase. Para contornar esta questão, inserimos um segmento de fibra adicional pelo qual trafegou o sinal interferente. Este segmento tinha comprimento físico bem superior ao comprimento de coerência para fonte óptica, conforme informado pelo fabricante do conversor de mídia.

As ferramentas OAM desenvolvidas também permitem a avaliação do comportamento do sistema neste cenário. Esta funcionalidade aplica-se aos casos em que o sinal interferente não possui intensidade suficiente para ser detectado pelo sistema de diagnóstico de mensagens OAM, porém tenha ainda capacidade de ocasionar erros de recepção.

Em nosso setup, por meio de um *splitter*, o sinal do *transmitter* é dividido em dois, onde parte dele segue para um atenuador e o restante para um segmento de fibra de 75 km em série com um controlador de polarização. A função deste lance de fibra é atrasar o sinal interferente em relação ao principal, eliminando sua coerência de fase. Já o controlador de polarização tem a missão de permitir o ajuste da polarização deste sinal. Estes sinais são então reunidos em um *combiner* antes de serem entregues ao *receiver*.

Com este arranjo, dois extremos de interferências homódinas foram avaliados. O primeiro deles foi o da situação em que o sinal principal e o interferente estão

presumidamente polarizados perpendicularmente entre si. Este é considerado o “melhor caso”, visto ser o ajuste de menor interferência possível entre os sinais. No segundo extremo, o sinal principal e o interferente chegam ao fotodetector com a mesma polarização. Esta situação resulta no “pior caso” de interferência. Com base nos dados coletados apresentamos na Figura 5a, a taxa média de perda quadros CCM (CCM Loss Rate – CCMLR) em função da (*Optical Signal to Interference Ratio* – OSIR).

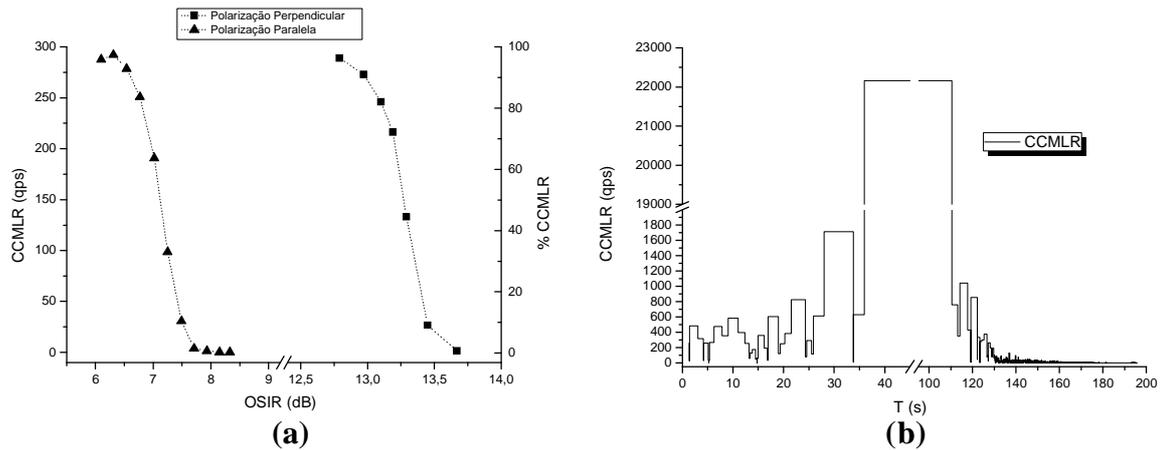


Figura 5. a) CCMLR x OSIR para polarização perpendicular e paralela. b) Comportamento temporal da interferência homódina.

Observa-se nos dois casos a enorme susceptibilidade do sistema a este tipo de interferência. Diferenças da ordem de apenas 1 dB na OSIR foram suficientes para levar o sistema de uma condição de perda total dos quadros CCM para outra de perda próxima a zero, enquanto que no caso do ASE esta diferença chegava a 2,5 dB. Estes extremos analisados caracterizam bem um sistema real, que normalmente operará “flutuando” em algum ponto do intervalo compreendido entre cada uma destas situações. Esta característica não-estacionária deste tipo de interferência pôde ser percebida claramente ao realizarmos um monitoramento de longa duração. A Figura 5b exibe os resultados obtidos para as perdas de quadros CCM (CCMLR) ao longo do tempo. Observa-se a enorme variação da CCMLR durante o intervalo de medida.

Com base na característica de não-estacionariedade das interferências homódinas, é possível desenvolvermos algoritmos vinculados aos sistemas OAM que permitam inferir sobre a natureza da interferência, mantendo-se ainda a não invasividade do método. Isto a torna uma ferramenta útil no cumprimento das funcionalidades OAM necessárias ao gerenciamento das complexidades decorrentes da integração do LT no metro ethernet.

7. Conclusões:

O forte apelo da utilização da arquitetura ethernet no âmbito das redes metropolitanas vem impulsionando o desenvolvimento de novas abordagens, dentre elas a arquitetura Light-trail, que em nosso trabalho denominamos rede metro-LT.

O presente trabalho pôde analisar a viabilidade do uso desta arquitetura em redes metropolitanas, através da sua integração pela especificação e implementação de um escopo mínimo de funcionalidades OAM. Os subsistemas desenvolvidos, CCM-TX e

CCM-RX, permitiram avaliar diversos quesitos relacionados a elementos da arquitetura LT, como, por exemplo o *shutter*, bem como o comportamento do sistema LT na presença de sinais interferentes.

O dispositivo microcontrolado desenvolvido demonstrou ser bastante eficiente e flexível ao permitir controlar, via mensagens de rede, o conjunto motor de passo/filtro óptico, que desempenhava a função de *shutter* no *setup* proposto. Nos testes realizados foram obtidos tempos de comutação da ordem de 0,25 s, tempo este que, muito embora esteja aquém das capacidades dos OXCs WDM modernos, atende perfeitamente à proposta LT ora apresentada.

A funcionalidade OAM desenvolvida também nos permitiu realizar avaliações qualitativas dos sinais que trafegavam pelos enlaces ópticos nestas situações.

Embora tenhamos explorado importantes aspectos na integração metro-LT via a funcionalidade OAM proposta, alguns outros pontos podem ser investigados sob a forma de trabalhos futuros. Um deles é quanto à velocidade de operação do sistema *shutter* implementado. Neste quesito, novos trabalhos poderiam avaliar a aplicação de filtros de naturezas diversas, como os acionados eletricamente, para esta função.

Outra funcionalidade interessante a ser acrescida ao framework Eth-OAM proposto é relativa à integração com as camadas superiores. As funcionalidades do sistema OAM poderiam ser estendidas, a fim de fornecer às demais camadas, informações qualitativas relativas aos canais ópticos. Estas informações poderiam permitir o dimensionamento automático da *Maximun Transfer Unit* (MTU) e da TCP Window com base na avaliação qualitativa do canal de comunicação, bem como a geração de estatísticas para uma MIB SNMP. Esta integração também poderia ser realizada com subsistemas de QoS, por meio de protocolos de sinalização e reserva com o RSVP, oferecendo funcionalidade de avaliação do meio de comunicação a fim de verificar viabilidade de garantia de critérios requeridos.

Uma vez que neste trabalho nos ativemos à implementação da CCM, trabalhos futuros poderiam também complementar o *framework* com os demais tipos de mensagens especificadas nas normas.

Referências:

- Gumaste, A.; Chlamtac, I. (2003a) “Light-trails: A novel Conceptual Framework for Conducting Optical Communications”, IEEE.
- Gumaste, A.; Si Qing Zheng (2005) “Next-generation optical storage area networks: the light-trails approach”, IEEE Communications Magazine, Volume 43, Issue 3, Março, p. 72 – 79.
- Gumaste, A.; Chlamtac, I. (2003b) “Light-trails: A solution to IP centric communication in optical domain”, Publicação Online, Springer-Verlag, Fevereiro.
- Gumaste, A.; Chlamtac, I. (2004) “Light-trails: An Optical Solution for IP Transport”, Journal of Optical networking, p. 261 281, vol. 3, nº 5, Maio.
- Gumaste, A.; Chlamtac, I. (2003c) “Mesh Implementation of Light-trails: A solution to IP Centric Communication”, IEEE.

- Agrawal, G. (2002) "Fiber-Optic Communication Systems", 3ed, Wiley.
- Frederick, M.T.; Vanderhorn, N.A. (2004) Somani, A.K.; "Light trails: a sub-wavelength solution for optical networking", High Performance Switching and Routing, HPSR. 2004 Workshop, p. 175 – 179.'
- Vanderhorn, N.A.; Balasubramanian S.; Mina, M.; Somani, A.K. (2005) "Light-trail Testbed for IP-Centric Applications", IEEE Optical Communications, Agosto.
- Balasubramanian S.; Kamal, A. E.; Somani, Arun K. (2004) "Medium Access Control Protocols For light-trail and light bus Networks", 8th IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modeling, 2 a 4 de Fevereiro.
- Kasim, Abdul (2008) "Delivering Carrier Ethernet: Extending Ethernet Beyond The Lan", McGraw Hill.
- Schmid-Egger, Arno; Kirstädter, Andreas (2006) "Ethernet in Core Networks: A Technical and Economical Analysis", IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing.
- Autenrieth, Achim; Et Al (2007) "Carrier Grade Metro Ethernet Networks", Beitrag der ITG-Fachgruppe 5.3.3 "Photonische Netze", Fevereiro.
- Ohta, Hiroshi (2006) "Standardization Status on Carrier Classe Ethernet OAM", IEICE Trans. Commun. Vol. E89B, Março.
- IEEE 802.1D (2004) "MAC Bridges", IEEE 802.1 Working Group, Junho.
- IEEE 802.1ag (2007) "Virtual Bridged Local Area Networks - Amendment 5: Connectivity Fault Management", IEEE 802.1 Working Group, Dezembro.
- ITU-T Y.1731 (2006) "OAM functions and mechanisms for Ethernet based networks", International Telecommunication Union, Maio.
- ITU-T G.8031 (2006) "Ethernet Protection Switching", International Telecommunication Union, Junho.
- MEF6.1 (2008) "Ethernet Services Definitions - Phase 2", The Metro Ethernet Forum, Abril.
- MEF17 (2007) "Service OAM Requirements & Framework", The Metro Ethernet Fórum, Abril.
- IETF RFC 1157 (1990) "Simple Network Management Protocol (SNMP)", Internet Engineering Task Force.