

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

**MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO DE REDES DE
TELECOMUNICAÇÕES**

VICTOR ISHIZUCA TELES

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DEGRADAÇÃO
IMPOSTA POR SISTEMAS ÓPTICOS A
APLICAÇÕES IP**

CAMPINAS

2010

VICTOR ISHIZUCA TELES

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DEGRADAÇÃO
IMPOSTA POR SISTEMAS ÓPTICOS A
APLICAÇÕES IP**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações, ao programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional em Gerência de Redes de Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

PUC-Campinas

2010

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SEI - PUC-Campinas

621.3692
I269a

Teles, Victor Ishizuca.

Análise experimental da degradação imposta por sistemas ópticos a aplicações IP / Victor Ishizuca Teles. - Campinas: PUC-Campinas, 2010.

71p.

Orientador: Marcelo Luis Francisco Abbade.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Fibras óticas - Juntas. 2. Comunicações óticas - Tecnologia. 3. Sistemas de comunicação sem fio. 4. Sistemas de transmissão de dados. 5. Telecomunicações. I. Abbade, Marcelo Luis Francisco. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

22.ed. COD – 621.3692

Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias

BANCA EXAMINADORA

Presidente e Orientador Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade (PUC-Campinas)

1º Examinador Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto (PUC-Campinas)

2º Examinador Prof. Dr. Helio Waldman (Universidade Federal do ABC)

Campinas, 12 de Fevereiro de 2010

Para Aurea, Bruna, Roberto e Winston.

São muitas as pessoas que desejo agradecer neste momento tão especial de minha vida.

Gostaria de começar agradecendo aos meus professores, orientadores e amigos Marcelo Abbade e Eric Fagotto que me apresentaram ao mundo maravilhoso da pesquisa científica.

Quero agradecer a toda minha família, agora completa. Cada um a sua maneira soube como me ajudar quando precisei.

Gostaria também de expressar a minha eterna gratidão a Bruna e ao pato James T. Kirk não apenas por me apoiarem em mais este trabalho, mas por tudo o que vivemos juntos.

Agradeço aos meus amigos Livia e Raphael por todo apoio que me deram.

E finalmente, porém não menos importante, agradeço a Deus e todas suas entidades que sempre olharam e olham por mim.

Dedico a todos a minha mais sincera gratidão. OBRIGADO!

"I don't believe in no-win scenarios."

James T. Kirk

RESUMO

Ishizuca, Victor. Análise Experimental da Degradação Imposta por Sistemas Ópticos a Aplicações IP. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas 2010.

Este trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente como impedimentos físicos de redes ópticas afetam o desempenho de aplicações IP. Em especial, esse trabalho compreendeu a análise do efeito de *cross-layer* causado por conversores de comprimento de onda totalmente ópticos em sinais de vídeo. Para isso avaliou-se a degradação da taxa de erro de pacotes em função de parâmetros da camada física. Essa análise foi feita para uma propagação do sinal de vídeo pela Rede KyaTera, seguida de uma conversão de comprimentos de onda totalmente óptica. Os resultados experimentais permitiram concluir que sinais convertidos, separados do sinal original por até 1,5 THz, sofrem uma penalidade média de potência de 2,1 dB. Este fato indica que para cada conversão que o sinal sofrer o seu alcance será reduzido em aproximadamente 10 km (admitindo-se uma atenuação de 0,2 dB/km nas fibras da rede). Concluiu-se também que a presença do conversor de comprimentos de onda na rede implica em uma penalidade de 16 dB. Este fato torna a conversão de comprimentos de onda uma opção viável para os casos nos quais o sinal não convertido tenha de ser propagado por uma distância superior a 80 km. Os resultados obtidos indicam que existe uma forte correlação entre a taxa de erro de pacotes da transmissão do sinal de vídeo e a degradação da razão sinal-ruído óptica imposta pelo referido conversor. Não foi encontrada nenhuma referência na literatura de qualquer trabalho que fizesse uma caracterização desta maneira. Adicionalmente também foram realizados experimentos para emular a degradação de sinais de vídeo transmitidos por enlaces com uma cascata de amplificadores ópticos. Os resultados deste experimento indicam que a taxa de erro de pacotes está relacionada não apenas com a razão sinal-ruído óptica, mas também com a potência do sinal no receptor.

Termos de indexação: Conversão de Comprimentos de Onda Totalmente Óptica, *Cross-Layer*, Taxa de Erro de Pacotes.

ABSTRACT

Ishizuca, Victor. *Experimental Analysis of the Degradation Imposed by Optical Systems on IP Applications*. 2010. Dissertation (Master Degree in Management of Telecommunication's Networks) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas 2010.

The objective of this work is to experimentally evaluate how physical impairments on the network can affect the performance of IP applications. Especially This work encompasses the analysis of the cross-layer effect caused by all-optical wavelength converters in the video signal. For this purpose, it was evaluated the packet error rate degradation caused by physical layer parameters. Such analysis was made for a video signal propagation through the KyaTera Network, followed by an all optical wavelength conversion. The experimental results allowed concluding that converted signals separated by up to 1.5 THz from the original signal may experience 2.1-dB penalty. This fact indicates that for each wavelength conversion the signal propagation range will be reduced in 10 km (Considering an attenuation of 0.2 dB/km in the transmission fibers). It was also verified that the presence of the all-optical wavelength converter in the network implies a 16-dB power penalty. For this reason the wavelength conversion is a viable option for cases where the propagation distance for the unconverted signal is larger than 80 km. Results indicate the existence of a strong relation between the packet error rate and the degradation of the optical signal-noise ratio caused by the mentioned converter. It was not found any reference in the literature of any work with this type of characterization. Additionally, experiments to emulate the degradation of the video signals transmitted through links with a cascade of optical amplifiers were also performed. The results indicate that the packet error rate is related not only with optical signal-noise ratio, but also with the received signal power.

Indexing Terms: All-Optical Wavelength Conversion, Cross-Layer, Packet Error Rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Topologia da TON.....	14
Figura 2 - Exemplo de Interação entre Camadas	19
Figura 3 - Estrutura de Camadas do modelo ISO/OSI.....	21
Figura 4 - Estrutura dos Modelos de Referência OSI e TCP/IP	24
Figura 5 - Elementos da Arquitetura de Rede	28
Figura 6 - Conceito de Cross - Layer	30
Figura 7 - Diagrama Simplificado do Conversor de Comprimento de Onda.....	37
Figura 8 - Cópia do Sinal f_s em f_{c1} e f_{c2}	38
Figura 9 - Diagrama de Blocos para Transmissão com AOWC	41
Figura 10 - Diagrama de Blocos do Conversor de Comprimento de Onda	42
Figura 11 - Encapsulamento - Processo	44
Figura 12 - Encapsulamento - Estrutura.....	45
Figura 13 - Espectros dos Sinais de Entrada (f_s), Bombeio (f_p) e Sinais Convertidos (f_c) .	46
Figura 14 - Espectros dos Sinais Convertidos (f_c) e do Sinal Original (f_s).....	47
Figura 15 - Imagens de Conectores: PER = 0% (a) e PER = 0.5% (b).....	48
Figura 16 - PER – Desempenho da PER para transmissões com e sem AOWC	49
Figura 17 - Dependência entre OSNR e Potência Recebida	50
Figura 18 - Espectro para os Sinais de Bombeio.....	52
Figura 19 - Espectro - Sinal Convertido e Caso de Referência.....	53
Figura 20 - Curvas de Ajuste Exponencial para os Dados Experimentais.....	54
Figura 21 - Diagrama de Blocos para Transmissão sem AOWC	58
Figura 22 - Espectro do Filtro Óptico Passa-Faixa	60
Figura 23 - Desempenho da PER para Diferentes Tamanhos de Pacotes	61
Figura 24 - PER x Distância para Pacotes com Tamanhos Diferentes	62
Figura 25- Espectros: Pacotes com Tamanho de 960 Bytes para Nível de Ruído de (a) - 39.1 dBm, (b) -35.7 dBm, (c) -33.6 dBm.	64
Figura 26 - Curvas de Ajuste Exponencial para os Resultados Experimentais	66

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução.....	11
1.1 Motivação.....	13
1.2 Objetivo.....	15
1.3 Organização do Trabalho.....	15
Capítulo 2. Redes de Computadores e Efeito Cross – Layer.....	17
2.1 Arquitetura de Rede.....	17
2.2.1 Modelo de Referência OSI/ISO.....	19
2.2.2 Camadas do Modelo OSI.....	20
2.3 Modelo de Referência TPC/IP.....	24
2.4 Protocolo RTP.....	27
2.5 Arquitetura de Redes Ópticas.....	28
2.6 Efeito de <i>Cross-Layer</i>	29
2.7 Taxa de Erro de Pacotes (PER).....	31
Capítulo 3. Mistura de Quatro Ondas e Conversão de Comprimento de Onda.....	34
3.1 Mistura de Quatro Ondas – FWM.....	34
3.2 Conversor de Comprimento de Onda.....	36
Capítulo 4. Transmissão com Conversão de Comprimentos de Onda.....	40
4.1 Arranjo Experimental.....	40
4.1.1 Conversor de Comprimento de Onda.....	41
4.2 Programas Utilizados no Experimento.....	43
4.2.1 Encapsulamento.....	44
4.3 Resultados para Transmissão com AOWC.....	45
4.3.1 Imperfeições na Imagem (<i>Glitches</i>).....	48
4.3.2 Análise da PER para o AOWC.....	48
4.3.3 Análise da Diferença de Desempenho Entre os Sinais Convertidos.....	51
4.4 Curvas de Ajuste para os Resultados Experimentais.....	54
4.5 Conclusão para Transmissão de Vídeo com AOWC.....	55
Capítulo 5. Testes Adicionais sem Conversão de Comprimento de Onda.....	57
5.1 Arranjo Experimental.....	58
5.2 Resultados.....	61
5.3 Curvas de Ajuste para os Resultados Experimentais.....	65
5.4 Conclusão.....	68
Capítulo 6. Conclusões e Perspectivas de Continuidade.....	69
Referências.....	71

Capítulo 1

Introdução.

Com o contínuo crescimento da Internet, não apenas em número de usuários, mas também em novas aplicações, é crescente a necessidade por taxas de transmissão cada vez mais altas. Para atender a esta demanda, o núcleo das redes de telecomunicações faz uso da elevada largura de banda provida pelas fibras ópticas. Em geral, as redes ópticas convencionais são constituídas por vários nós que agregam equipamentos eletrônicos, como roteadores, *switches*, interconectados por fibras ópticas. Obviamente, cada nó precisa fazer uma conversão eletro-óptica para enviar seus dados pelas fibras e uma conversão opto-elétrica para receber os sinais advindos de outros nós da rede.

Esse tipo de rede possui alguns problemas. Em primeiro lugar, essas conversões introduzem uma complexidade e um custo que poderiam ser evitados se os equipamentos presentes nos nós da rede pudessem trabalhar de maneira totalmente óptica. Além disso, como o processamento eletrônico não pode ser feito a taxas superiores a algumas dezenas de Gb/s, esses equipamentos eletrônicos constituem um gargalo de processamento para a rede. Um terceiro ponto importante reside no fato de que o consumo de energia destes equipamentos eletrônicos cresce à medida que a taxa de transmissão aumenta. De fato, atualmente, as grandes operadoras chegam a consumir até 1% da energia destinada a região onde estão instaladas. Como mesmo as estimativas mais conservadoras estimam que a largura de banda disponível nos próximos vinte anos deve crescer cerca de 100 vezes, se for admitido que o consumo de energia das operadoras seja diretamente proporcional a largura de banda oferecida, é possível observar que a sustentabilidade das redes ópticas convencionais será relativamente complicada do ponto de vista energético.

Uma possível solução para os problemas mencionados acima é a utilização de redes ópticas transparentes (TONs, *Transparent Optical Networks*), baseadas em sistemas de multiplexação por divisão de comprimentos de onda (*WDM*, *Wavelength Division Multiplexing*) (Mukherjee, 2006). Nessas redes os fluxos de dados dos clientes

são alocados fim-a-fim no domínio óptico, em um ou mais comprimentos de onda. Se necessário, os nós devem realizar o processamento óptico dos sinais.

As TONs devem utilizar alguma estratégia para rotear os dados que trafegam por ela. A literatura aponta ao menos três estratégias principais para realização desse roteamento no domínio óptico: a) a comutação por comprimento de onda, b) comutação por pacotes ópticos e c) a comutação por rajadas ópticas. Apesar das duas últimas proverem uma maior granularidade que a primeira, a maturidade da tecnologia atual favorece enormemente a implementação da comutação por comprimentos de onda e este será o único roteamento considerado no trabalho atual. Nesta modalidade o fluxo de dados do cliente é alocado em um *lightpath*, que é o nome atribuído ao canal de comunicação que liga um cliente ao outro através de uma rede óptica. Esse canal é unidirecional podendo passar por vários enlaces dentro da rede óptica (Ramasmami, 2001).

Para minimizar o número de conexões bloqueadas as TONs devem utilizar algum tipo de algoritmo de roteamento e atribuição de comprimento de onda (*RWA, Routing and Wavelength Assignment*). Alguns algoritmos de roteamento por circuito levam em consideração o fato de que a qualidade do sinal em um *lightpath* pode degradar devido a fenômenos lineares e não-lineares, como por exemplo, a deterioração do fator Q imposta pela dispersão cromática e o modo de polarização (Ali, 2002; Kulkarni, 2005), a influência da mistura de quatro ondas (*FWM, Four Wave Mixing*) na taxa de erro de bit (Fonseca, Almeida *et al.*, 2004), e o efeito do ruído de emissão espontânea ASE (*ASE, Amplified Spontaneous Emission*) e a relação sinal ruído (Deng, 2004). Esse tipo de algoritmo que leva em consideração as degradações físicas experimentadas pelos sinais é chamado de *Impairment Aware RWA (IA-RWA)*.

Com a tecnologia atual, se um comprimento de onda não está disponível para um *lightpath* em um determinado enlace da rede óptica, todo o *lightpath* é bloqueado. Em redes dotadas de conversores de comprimentos de onda totalmente ópticos (*AOWC, All Optical Wavelength Converters*), este fato não constitui um problema, uma vez que, se o recurso não está disponível, o nó pode realizar uma conversão para um comprimento de onda que esteja disponível no enlace. Assim, a conversão de comprimentos de onda irá contribuir positivamente na maximização da eficiência de uma TON, atuando para a diminuição do bloqueio na rede (Chu e Li, 2005).

Geralmente o desempenho de uma transmissão em uma rede óptica é avaliado através da medida da taxa de erro de bit (*BER, Bit Error Rate*). Um conceito ainda pouco explorado nas redes ópticas é a avaliação deste desempenho através da taxa de erro de pacotes (*PER, Packet Error Rate*). O Capítulo 2 fará uma comparação detalhada entre os dois métodos, porém é importante que sejam ressaltados alguns pontos positivos da PER. O primeiro é o seu baixo custo de implementação, necessitando apenas de um computador e um programa que monitore a interface de rede do cliente. O segundo é que quando a PER é comparada com impedimentos da camada física, como por exemplo, a relação sinal-ruído óptica (*OSNR, Optical Signal Noise Ratio*) ela permite que o efeito de *cross-layer* seja levado em consideração na análise do desempenho da transmissão.

O efeito de *cross-layer* acontece quando parâmetros de uma determinada camada influenciam parâmetros de outras camadas. Até o momento, poucos trabalhos apresentados na literatura consideram a ação deste efeito em redes ópticas. É possível explorar o conceito de *cross-layer* de maneiras diferentes. Do ponto de vista de projeto de rede, é possível desenvolver protocolos que utilizem parâmetros de outras camadas para melhor desempenhar a sua função. Por exemplo, um protocolo de roteamento que baseado na relação sinal-ruído possa escolher qual a melhor rota para transmitir o fluxo de dados de um cliente. Do ponto de vista de qualidade, o efeito de *cross-layer* permite considerar todas as funcionalidades presentes na pilha de protocolos. Tais funcionalidades podem contribuir positivamente na qualidade da transmissão. A análise deste efeito em TONs é um assunto bastante recente, pouco explorado na literatura e que pode contribuir para otimizar o desempenho deste tipo de rede.

1.1 Motivação

A Figura 1 pode ser utilizada para contextualizar a motivação deste trabalho. Na figura é considerado um cenário hipotético, no qual uma TON cujos nós representados por letras são nós de clientes. Os nós representados por números são nós do núcleo da TON. Os nós com a maior concentração de tráfego podem ser capazes de realizar a conversão de comprimentos de onda totalmente óptica nós (2, 3 e 8), para aliviar o congestionamento da rede.

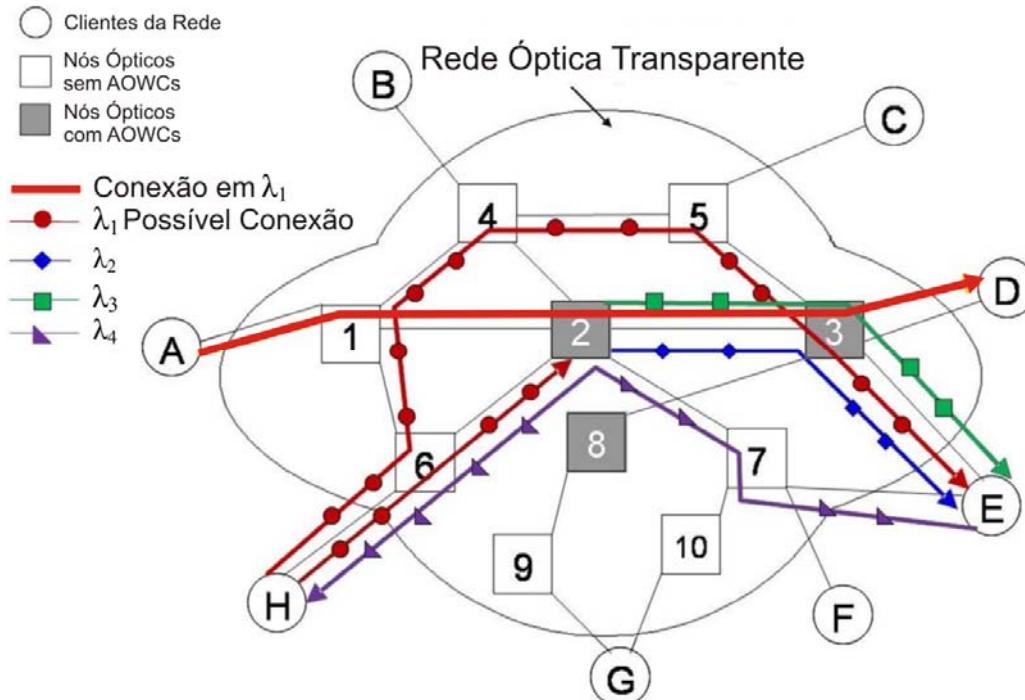


Figura 1 - Topologia da TON

Para a situação ilustrada acima, o cliente A inicia uma conexão com o cliente D através dos nós 1-2-3 no comprimento de onda λ_1 . Posteriormente o cliente H deseja estabelecer uma conexão com o cliente E, em um primeiro momento, também em λ_1 . Existem algumas possíveis opções para essa conexão, cabendo ao sistema de gerenciamento da rede escolher uma delas. Fazer uma transmissão por um caminho maior (H-6-1-4-5-3-E) sem fazer uma conversão de comprimento de onda. Um caminho menor (H-6-2-3-E), porém fazendo uma conversão de λ_1 para λ_2 ou λ_3 no nó 2.

A figura também ilustra o caso em que um cliente de destino pode enviar dados para um cliente de origem. Geralmente essa conexão de retorno não segue o mesmo caminho, nem utiliza o mesmo comprimento de onda da conexão inicial. Na figura 1 esse caminho está representado pela conexão (E-7-2-6-H) no comprimento de onda λ_4 .

Para o cenário apresentado, o algoritmo de roteamento da rede pode fazer a escolha da melhor rota seguindo uma série de critérios, tais como: a relação sinal-ruído, o fator Q, o *jitter* e/ou a potência do sinal.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente como impedimentos físicos de redes ópticas afetam o desempenho de aplicações IP, uma vez que as aplicações IP dominam o crescimento da Internet. Sob este escopo, foi considerada neste trabalho a ação do efeito de *cross-layer* na propagação de um sinal de vídeo quando este é transmitido através de um conversor de comprimentos de onda. Esta análise foi feita avaliando-se a degradação da PER em função da diminuição da relação sinal-ruído óptica. Também foi estudada a degradação de sinais de vídeo transmitidos por enlaces com uma cascata de amplificadores ópticos. Este estudo foi realizado através de uma emulação na qual a degradação do sinal é decorrente do acúmulo de ruído ASE devido à cascata de amplificadores. A análise do desempenho para essa emulação foi feita considerando-se a degradação da PER em função da relação sinal-ruído óptica.

Para a realização dos testes a aplicação escolhida foi a de transmissão de vídeo. Essa aplicação foi escolhida tendo em mente que é cada vez maior o número de usuários que assistem a vídeo sob demanda na Internet, bem como portais que disponibilizam esse tipo de conteúdo. A transmissão de um sinal de vídeo exige significativamente mais da rede, quando comparada a demais aplicações comuns na Internet, tais como: envio e recebimento de mensagens, acesso a páginas e até mesmo VoIP.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O capítulo 2 apresentará alguns conceitos importantes para o entendimento deste trabalho. Neste capítulo será feita uma revisão dos modelos de referência OSI e TCP/IP, da arquitetura de redes ópticas, os conceitos do efeito de *cross-layer* e principais diferenças entre BER e PER. O capítulo 3 fará uma revisão sobre a mistura de quatro ondas, uma vez que esse fenômeno proporciona uma das maneiras de se realizar a conversão de comprimentos de onda.

O capítulo 4 apresentará o experimento que avaliou a degradação introduzida pela conversão de comprimentos de onda na transmissão de vídeo. O capítulo 5 contém os testes adicionais feito para uma transmissão de vídeo sem conversão de comprimentos de onda. O Capítulo 6 apresentará as conclusões finais do trabalho e as perspectivas de continuidade.

Capítulo 2

Redes de Computadores e Efeito Cross - Layer.

Este capítulo é dedicado primeiramente a uma revisão dos modelos de referência OSI e TCP/IP, uma vez que o conceito de hierarquia em camadas é essencial para o entendimento do efeito de *cross-layer*. Neste capítulo também será abordada a questão da arquitetura de redes ópticas, o efeito de *cross-layer* e as principais diferenças entre a utilização da BER e da PER como métrica para avaliar o desempenho da rede.

2.1 Arquitetura de Rede

As redes de computadores atuais se tornaram entidades extremamente complexas, visto que, com tecnologias cada vez mais convergentes, estas redes têm de acomodar uma grande variedade de tecnologias se comunicando de maneiras diferentes. Portanto a tarefa de estabelecer a comunicação e posteriormente gerenciar essa comunicação não é simples. Para realizar a comunicação entre entidades da rede, foi criada uma série de programas, chamados de protocolos. Cada protocolo é responsável por uma determinada função na comunicação entre duas entidades. De modo a organizar essa comunicação, os protocolos que desempenham tarefas similares foram agrupados em camadas e tais camadas foram organizadas também em uma determinada seqüência.

A idéia de se trabalhar com uma arquitetura de rede organizada em camadas proporciona uma série de vantagens. Do ponto de vista da implementação de uma nova tecnologia de rede, a estrutura de camadas oferece um projeto modular, de modo que, quando se desejar adicionar uma nova classe de serviço as alterações necessárias possam ser realizadas de maneira localizada, sem causar um impacto global em toda a estrutura de comunicação. Outra vantagem que pode ser ressaltada reside no fato de que

a estrutura em camadas permite decompor a comunicação em componentes gerenciáveis, ou seja, cada protocolo irá prover um serviço de comunicação distinto, se torna mais direto estabelecer, por exemplo, em qual etapa da comunicação ocorreu uma falha.

O objetivo de uma camada é prestar um determinado conjunto de serviços para a camada superior, relacionando-se, de um ponto de vista lógico, com a sua camada equivalente na máquina de destino (Soares, Lemos *et al.*, 1995).

A Figura 2 ilustra o exemplo de como se daria a comunicação entre duas máquinas, olhando do ponto de vista da pilha de protocolos. A máquina de origem pretende enviar uma mensagem para a máquina de destino.

A mensagem criada na máquina de origem é entregue a camada 4. Essa camada então executa o protocolo de comunicação P4 que adiciona um cabeçalho (*Header*) H4. O protocolo H4 está executando um serviço, por exemplo, especificando o tipo de conexão pela qual a mensagem será trafegada. A informação adicionada pelo protocolo H4 é destinada ao protocolo da camada 4 que é executado na máquina de destino. Ao final da execução de P4 a mensagem acrescida do cabeçalho H4 é passado para a camada 3. Lá será executado um determinado protocolo da camada 3, por exemplo, responsável pelo endereçamento da mensagem. O protocolo da camada 3 irá adicionar a mensagem e ao cabeçalho da camada 4 o seu cabeçalho H3. Um processo similar irá acontecer na camada 2. A camada 1 fará a transmissão da mensagem mais todos os cabeçalhos que nela foram adicionados para a máquina de destino. Uma vez chegando à máquina de destino todo o processo é desfeito à medida que cada camada processa o seu respectivo cabeçalho e entrega os dados para a camada superior.

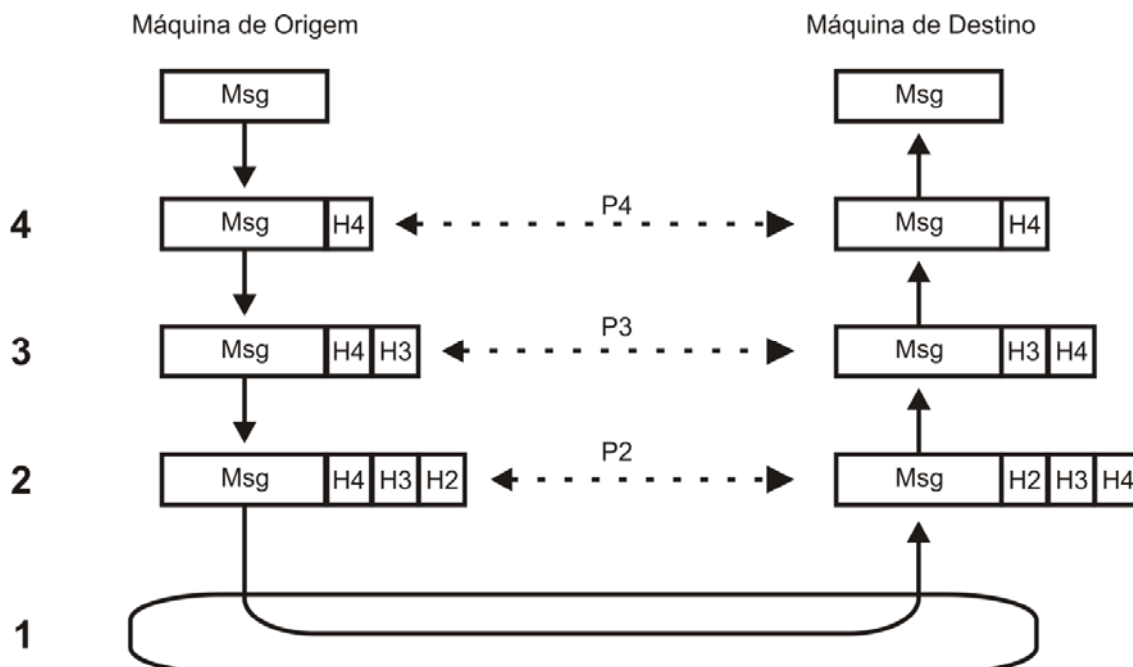


Figura 2 - Exemplo de Interação entre Camadas

A inserção de cabeçalhos ilustrada acima é chamada de encapsulamento e será abordada mais a fundo futuramente neste capítulo. Para a discussão atual a idéia da estrutura de camadas para a comunicação é mais importante que o processo pelo qual cada camada se relaciona com sua camada correspondente.

2.2.1 Modelo de Referência OSI/ISO

O modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) de referência se baseia na proposta desenvolvida pela ISO (*International Organization for Standardization*). Ele não é uma arquitetura de rede, uma vez que, não especifica diretamente os protocolos e serviços a serem utilizados em cada camada. O modelo OSI apenas especifica a função de cada camada.

São sete as camadas que formam o modelo OSI: Camadas Física, de Enlace de Dados, de Rede, de Transporte, de Sessão, de Apresentação e de Aplicação. Essas camadas foram criadas seguindo cinco princípios (Tanenbaum, 2002):

- Uma camada deve ser criada sempre que houver a necessidade de um grau maior de abstração.
- Cada camada deve executar uma função bem definida.
- A função de uma camada deve ser escolhida tendo em vista que seus protocolos possam ser padronizados internacionalmente.
- Os limites de cada camada devem ser definidos visando minimizar o fluxo de informação pelas interfaces
- O número de camadas deve ser grande o suficiente para que funções diferentes não precisem ser desnecessariamente colocadas na mesma camada. O número de camadas também deve ser suficientemente pequeno para que a arquitetura não se torne difícil de controlar.

2.2.2 Camadas do Modelo OSI

A Figura 2 exibe a estrutura das camadas no modelo de referência OSI. A Figura 2 ilustra como se daria uma comunicação entre duas máquinas que seguem a organização proposta pelo modelo de referência OSI e utilizam dois sistemas de retransmissão presentes na rede.

A camada física não faz qualquer distinção entre quadros ou pacotes, pressupondo uma comunicação binária, ela trabalha bit a bit tendo como meta que se foi transmitido um bit 1 da máquina de origem, chegará um bit 1 na máquina de destino.

Camada de Enlace de Dados

Cabe a camada de enlace corrigir possíveis erros ocorridos na transmissão em nível físico. Para isso a camada de enlace de dados divide os dados a serem transmitidos em vários quadros. Em cada quadro bits para controle de erros são inseridos. A camada de enlace também faz o controle de fluxo de dados, isto é, ela evita que um transmissor rápido envie uma quantidade excessiva de dados a um receptor lento.

Na camada de enlace de dados se situa uma subcamada responsável pelo controle de acesso ao meio de comunicação. Essa camada é chamada de camada de controle de acesso ao meio, (*Media Access Control*, MAC). Como o próprio nome diz, ela controla qual aplicação poderá utilizar o meio de comunicação a cada vez.

Camada de Rede

A camada de rede é responsável por controlar a maneira pela qual os pacotes serão roteados da origem até o destino. Ela pode estabelecer rotas seguindo vários tipos de algoritmo. A camada de rede também faz o controle de congestionamento na rede, podendo oferecer parâmetros para a qualidade de serviço da rede.

A camada de rede pode oferecer dois tipos de comunicação: datagrama ou circuito virtual. No serviço de datagrama (serviço sem conexão), cada pacote deve carregar o seu endereço de destino e cada pacote não mantém qualquer relação com o pacote anterior ou posterior. O roteamento para este tipo de serviço é calculado a cada vez que um pacote é encaminhado por um dos nós da rede. No serviço de circuito virtual (serviço orientado à conexão) é necessário que a origem envie um pacote estabelecendo uma rota até o destino. Depois de estabelecida a rota todos os pacotes dessa comunicação passarão pelo mesmo caminho estabelecido, chegando ao destino na mesma ordem.

Camada de Transporte

Acima da camada de rede, se encontra a camada de transporte é a primeira camada a trabalhar de uma maneira fim a fim, ou seja, as camadas inferiores variam conforme o tipo de rede na qual os dados estão trafegando. A camada de transporte também determina qual o tipo de serviço que será oferecido à camada de sessão, e por consequência aos usuários da rede e também qual o tipo de conexão utilizada para esse serviço.

Camada de Sessão

A camada de sessão oferece serviços para que usuários em diferentes máquinas possam estabelecer uma sessão de comunicação entre eles. Para isso essa camada atua no controle do diálogo, ou seja, ela controla qual máquina deve transmitir em cada momento. Ela também gerencia o *token*, impedindo que duas máquinas executem operações críticas ao mesmo tempo.

Camada de Apresentação

É função da camada de apresentação fazer com que computadores que trabalhem com modos de representação diferentes possam se comunicar. Portanto a camada de apresentação irá trabalhar a semântica e a sintaxe das informações transmitidas.

Camada de Aplicação

Na camada de aplicação localiza-se uma série de protocolos necessários aos usuários, ou seja, é na camada de aplicação que são definidos as funções de gerenciamento e mecanismos que irão servir de suporte a construção de uma aplicação

distribuída. Protocolos como o HTTP, que constitui a base para a *World Wide Web*, o *FTP* para transferência de arquivos e vários outros fazem parte da camada de aplicação.

2.3 Modelo de Referência TPC/IP

Diferentemente do modelo OSI, que foi concebido como um modelo antes de seus protocolos correspondentes terem sido criados, o modelo TCP/IP recebe esse nome graças aos seus dois principais protocolos, ou seja, o modelo de referência TCP/IP foi baseado em uma rede já existente.

A arquitetura TCP/IP foi utilizada na antecessora da Internet, a ARPANET. O Departamento de Defesa dos Estados Unidos criou a ARPANET com a intenção de interligar universidades, centros de pesquisa, repartições públicas e instituições militares. À medida que essa rede foi se expandindo e diferentes tipos de redes foram sendo agregadas, como redes de rádio e satélite, os problemas para a interconexão dessas redes fizeram com que uma arquitetura de referência fosse desenvolvida (Tanenbaum, 2002). Portanto um dos pontos fundamentais para essa arquitetura era o de conectar redes heterogêneas de maneira uniforme. Outro ponto importante dessa arquitetura é capacidade de ser flexível, sendo capaz de se adaptar a aplicações com requisitos diferentes, por exemplo, comunicações de voz e transferência de arquivos. A rede também deve ser capaz de manter a comunicação entre origem e destino mesmo que algumas das máquinas e linhas de retransmissão intermediárias deixem repentinamente de operar.

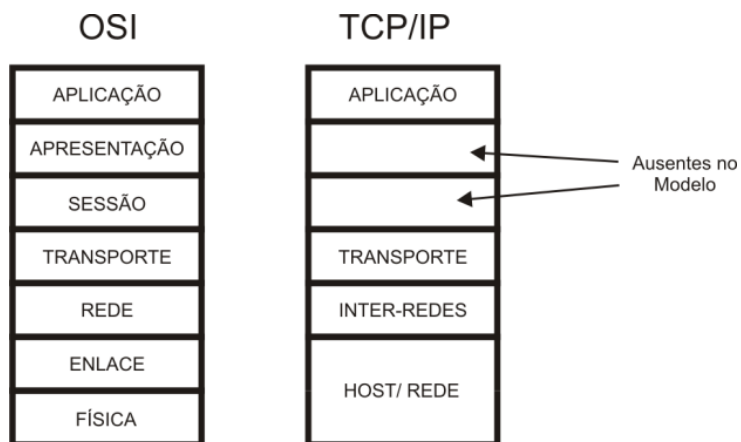


Figura 4 - Estrutura dos Modelos de Referência OSI e TCP/IP

A Figura 4 apresenta uma comparação entre as estruturas de camadas do modelo de referência OSI e do modelo de referência TCP/IP. No modelo de referência TCP/IP os serviços prestados pelas camadas de sessão e apresentação foram incorporados a camada de aplicação. Existem ainda outras diferenças, mais sutis, entre as camadas de ambos os modelos, mas uma discussão mais aprofundada sobre este tópico está além do escopo deste trabalho e pode ser encontrada na literatura (Tanenbaum, 2002).

A seguir serão apresentadas algumas das principais características da Arquitetura TCP/IP.

Camada Host/Rede

O modelo de referência TCP/IP não define muito bem o que acontece abaixo da camada de inter-redes, exceto o fato de que cada host deve utilizar um protocolo que seja capaz de transmitir pacotes IP. Esse protocolo tende a variar bastante de rede para rede e de *host* para *host* (Tanenbaum, 2002). Essa ausência de definição a respeito do que ocorre abaixo da camada de inter-redes faz parte da essência do modelo TCP/IP, uma vez que, o mesmo diz que a comunicação entre os elementos de uma rede deve ocorrer independente do meio físico em que a informação trafega.

Camada de Inter - Redes

Similar a camada de rede do modelo de referência OSI, a camada de inter-redes do modelo de referência TCP/IP desempenha a função de roteamento de pacotes. A camada de inter-redes trabalha sem conexão e com comutação de pacotes, cabendo às camadas superiores reorganizá-los caso sejam entregues em ordem diferentes. O roteamento é um ponto fundamental para esta camada, bem como a necessidade de evitar o congestionamento.

Camada de Transporte

A camada de transporte do modelo de referência TCP/IP trabalha de maneira similar a sua equivalente no modelo de referência OSI. Ela assegura com que pares de origem-destino possam manter uma conversação.

Os dois principais protocolos da camada de transporte são: O protocolo de controle de transporte (*TCP, Transport Control Protocol*) e o protocolo de datagrama do usuário (*UDP, User Datagram Protocol*)

TCP – Transmission Control Protocol

É um protocolo confiável, orientado a conexão. O TCP trabalha fragmentando um fluxo de dados em mensagens que são passadas para a camada de Inter-Redes. No destino o TCP irá remontar essas mensagens obtendo o fluxo de dados original. O TCP pode solicitar a origem à retransmissão de um pacote perdido. No processo de recepção dos pacotes ele também os organiza na mesma seqüência que foram enviados. O TCP também faz controle de fluxo, ou seja, faz com que um transmissor rápido não sobrecarregue um receptor lento.

UDP – User Datagram Protocol

O UDP é um protocolo não confiável e sem conexão. Ele é utilizado por aplicações que não desejam controle de fluxo nem a manutenção da seqüência das mensagens enviadas. Este protocolo é utilizado por aplicações nas quais a entrega imediata da mensagem é mais importante que a entrega precisa da mensagem, como por exemplo, na transmissão de dados de voz ou vídeo.

Camada de Aplicação

A camada superior do modelo de referência TCP/IP é a camada de aplicação. Como os serviços oferecidos pelas camadas de apresentação e sessão do modelo OSI são pouco utilizados no modelo TCP/IP, eles foram incorporados a camada de aplicação no modelo TCP/IP (Tanenbaum, 2002).

A camada de aplicação contém os protocolos de níveis mais altos, tais como: o protocolo de correio eletrônico (*Simple Mail Transfer Protocol, SMTP*), o protocolo de transferência de arquivo (*File Transfer Protocol, FTP*), o protocolo que mapeia os nomes dos hosts para seus respectivos endereços (*Domain Name System, DNS*), o protocolo para acessar páginas na Internet (*Hypertext Transfer Protocol, HTTP*), dentre outros.

2.4 Protocolo RTP

O protocolo de transporte em tempo real (*Real-time Transport Protocol, RTP*) comumente opera sobre o protocolo UDP em aplicações multimídia em tempo real e é amplamente utilizado por aplicações de videoconferência, vídeo sob demanda, música sob demanda e telefonia pela internet. Este protocolo foi um elemento chave para a realização das transmissões de vídeo realizadas neste trabalho, abordadas nos Capítulos 4 e 5. Por essa razão é importante que sejam ressaltadas algumas das características do RTP.

O RTP é um protocolo de transporte descrito pela RFC 1889 (IETF, 1996). Uma de suas principais funções é multiplexar fluxos de áudio, vídeo e texto advindos de uma dada aplicação e armazená-los em uma biblioteca RTP. Essa biblioteca por sua vez codifica os fluxos em pacotes RTP que por sua vez são inseridos em pacotes UDP, seguindo assim o processo convencional de encapsulamento descrito anteriormente.

Embora seja denominado como um protocolo de transporte, o RTP se encontra na camada de aplicação, uma vez que, ele incorpora uma série de funcionalidades que são específicas para aplicações multimídia (Peterson e Davie, 2003). Ele é chamado de protocolo de transporte porque provê funções fim-a-fim para uma série de aplicações. (Protocolos da camada de aplicação, como o HTTP, por exemplo, são específicos para um único tipo de aplicação). O RTP comumente opera sobre o protocolo UDP em aplicações multimídia em tempo real. Cada pacote RTP contém em seu cabeçalho um número seqüencial uma unidade maior que seu predecessor. Este número permite ao destino descobrir se algum pacote foi perdido durante a transmissão.

2.5 Arquitetura de Redes Ópticas.

Nesta seção será feita uma abordagem a respeito das arquiteturas de redes ópticas. As redes ópticas se tornaram entidades com alto grau de complexidade. Decorrente disto foi necessária a adaptação da pilha de protocolos tradicional para melhor acomodar as funcionalidades das redes ópticas.

Existem vários modelos para arquiteturas de redes ópticas. Um dos mais utilizados é descrito em (Mukherjee, 2006) e descrito na figura 5. Esse modelo de três camadas possui na base a camada física, que trabalha com parâmetros físicos, tais como taxa de transmissão, amplitude do sinal, potência do ruído e a conversão de comprimentos de onda. A camada central é a camada de rede óptica, desempenhando tarefas de roteamento e encaminhamento. Por vezes, essas duas camadas em conjunto são chamadas de camada de transporte óptico. No topo da arquitetura está a camada de aplicação, cujos serviços são utilizados pelo cliente da rede, podendo transmitir, por exemplo, pacotes IP.

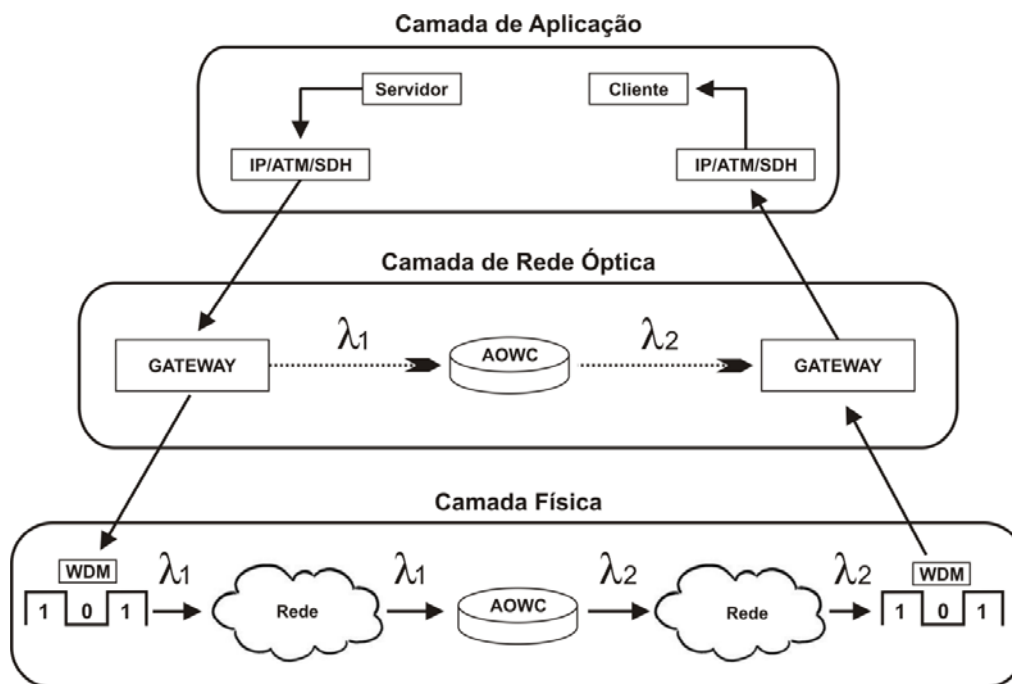


Figura 5 - Elementos da Arquitetura de Rede

Continuando a discussão a respeito de modelos de arquitetura de rede, alguns autores classificam a arquitetura de uma rede óptica contando apenas com a camada física e a camada de rede óptica, uma vez que, a camada de aplicação não está diretamente associada à rede óptica em si. Um exemplo dessa visão é a arquitetura apresentada em (Freeman, 2004) no qual o autor divide a rede óptica em duas camadas, uma camada óptica de transporte e outra de serviços. A camada óptica de transporte é análoga a camada física, sendo baseada em tecnologia WDM e a camada óptica de serviços é baseada em SDH, sendo análoga a camada de rede óptica apresentada na figura anterior.

Outro modelo encontrado na literatura faz menção apenas à camada óptica (Ramasmami, 2001). Imaginando que a comunicação entre dois clientes ocorra através de uma rede do tipo WDM, a camada óptica poderá multiplexar vários *lightpaths* em uma única fibra óptica e em cada nó da rede ela poderá extrair ou acrescentar *lightpaths* a transmissão. Como mencionado anteriormente, *lightpath* é o nome dado a uma conexão fim a fim que passe pela rede óptica (Capítulo 1). Essa conexão pode passar por vários enlaces de fibra e trocar de comprimento de onda ao longo do caminho, admitindo uma rede óptica dotada de AOWC. Portanto a abstração necessária para que essa comunicação ocorra de forma transparente fim a fim será fornecida pela camada óptica (Subramaniam e Silvalingam, 2004).

Nas discussões posteriores deste trabalho, será considerado o modelo de três camadas (Mukherjee, 2006) ilustrado na figura 5.

2.6 Efeito de *Cross-Layer*.

O efeito de *cross-layer* pode ser definido como a influência que determinados parâmetros ou entidades de uma camada exercem sobre parâmetros e entidades de outra camada. Embora novo para as redes ópticas, é algo que é estudado já há certo tempo nas as redes sem-fio.

O efeito de *cross-layer* também pode ser incorporado a um projeto de um determinado sistema de comunicação. O conceito de *cross-layer*, durante o projeto é aplicado para maximizar o desempenho de qualquer sistema de telecomunicações explorando a interação entre protocolos de diferentes camadas. Esse tipo de estudo evoluiu, sobretudo, com a evolução dos sistemas de comunicações sem fio, uma vez que estes possuíam alguns problemas que não eram bem administrados pela pilha de protocolos tradicional. Por exemplo, em alguns tipos de redes sem fio o tipo de modulação pode variar conforme a distância que separa os equipamentos que estão se comunicando.

Projetar os protocolos de um sistema levando em consideração o conceito de *cross-layer* de certo modo pode vir a constituir uma violação do modelo de arquitetura de camadas (Srivastava e Motani, 2005), pois como foi dito anteriormente, os protocolos de uma determinada camada devem prestar um tipo específico de serviço para sua camada superior. Desta maneira cada camada oculta da camada superior os detalhes da implementação de seus recursos (Tanenbaum, 2002) (Soares, Lemos *et al.*, 1995).

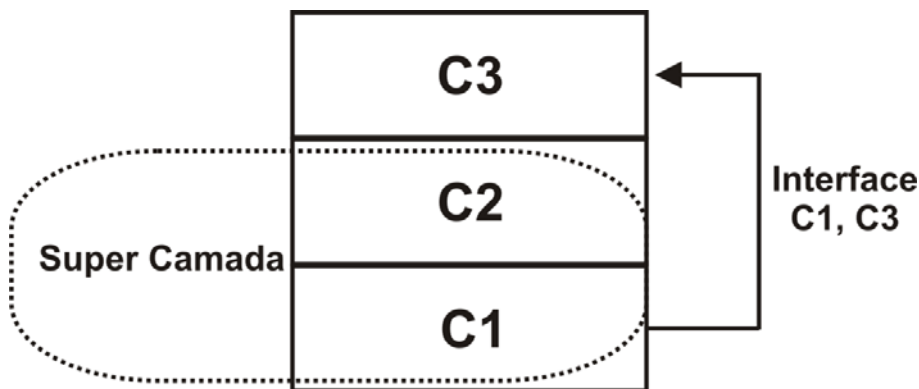


Figura 6 - Conceito de Cross - Layer

A Figura 6 ilustra o exemplo de uma arquitetura com três camadas, C1, C2, C3. Seguindo o modelo tradicional de hierarquia em camadas, não existe interface entre C3 e C1. Mas uma determinada aplicação implementada em uma arquitetura que considere o efeito de *cross-layer*, possa necessitar que C1 passe um parâmetro diretamente para C3, por exemplo, o tipo de modulação, ou taxa de transmissão para um sistema sem fio com modulação adaptativa. Para isso existe a necessidade de se criar uma interface que passe parâmetros entre C1 e C3, o que constitui uma violação aos princípios de elaboração de arquiteturas. Outra aplicação pode enxergar C1 e C2 como uma única

camada e, portanto desenvolver e utilizar protocolos conjuntos para essa “super camada”, o que também constitui uma violação a definição da arquitetura de camadas (Srivastava e Motani, 2005).

Em especial, a gerência de uma TON pode utilizar parâmetros na escolha de rotas entre seus clientes. Por exemplo, um IA-RWA pode utilizar informações como taxa de erro de bits, potência do sinal e relação sinal-ruído para escolher qual a melhor rota para uma determinada conexão. Do ponto de vista da estrutura de camadas (modelo OSI), isso significa que parâmetros da camada física (taxa de erro de bits, relação sinal-ruído e potência do sinal) irão influenciar uma decisão da camada 3 (roteamento).

Neste trabalho o conceito de *cross-layer* é será considerado em um sistema de comunicações ópticas. A relevância do conceito de *cross-layer* está no fato de que o desempenho do sistema visto no nível da aplicação é função do desempenho de todas as camadas que estão abaixo e, portanto dimensionar um sistema de comunicação baseado apenas na BER, como é feito atualmente, pode ignorar recursos utilizados em camadas superiores, como por exemplo, sistemas de correção de erro. A métrica utilizada para avaliação de erro neste trabalho é a PER, avaliada na camada 4 do modelo OSI (ou camada de aplicação do modelo apresentado na Figura 5). Como será mostrado, em determinados casos é possível mostrar que a PER é proporcional a razão sinal-ruído óptica do sinal (camada 1 do modelo OSI ou do modelo de apresentado na Figura 5). Isso caracteriza o um efeito de *cross-layer*. Esta proporcionalidade também poderia ser explorada para alimentar algoritmos de IA-RWA.

2.7 Taxa de Erro de Pacotes (PER).

Uma das maneiras mais usuais de se medir o desempenho de sinais por redes ópticas é avaliar a BER associada a estes sinais. Em especial, a BER pode ser medida de maneira determinística ou estimada de forma estatística. O primeiro destes métodos requer a utilização de um equipamento chamado de medidor de BER. De maneira simplificada este equipamento transmite uma seqüência conhecida de bits pelo enlace (ou sistema óptico) a ser analisado. Na outra extremidade do enlace, a seqüência recebida é comparada com a original para a quantificação dos erros. Um problema deste

é que pode ser demorado. Por exemplo, a BER esperada para redes ópticas é de 1×10^{-12} ou menores (Ramaswami, 2001) o que significa que haverá um bit errado para cada 1×10^{12} bits recebido. Assim, se a taxa de transmissão for de 1 Gb/s, serão necessários 1000 segundos para que um bit errado seja identificado. Além disso, para se ter maior certeza sobre a taxa de erro de bit experimentada pelo sistema, é necessária a realização de várias medidas. Caso opte-se por vinte medidas, serão necessárias mais de cinco horas para estimar a BER imposta ao sinal em consideração. Medidas determinísticas de BER são amplamente utilizadas em redes síncronas, como é o caso de redes com hierarquia digital síncrona (Synchronous Digital Hierarchy, SDH).

O método estatístico para avaliar a BER utiliza um osciloscópio que avalia a BER a partir do fator Q obtido no diagrama de olho do sinal. Esta estratégia é muito mais rápida que a anterior e provê uma estimativa de BER em, no máximo alguns segundos. No entanto, uma desvantagem deste método é que grande parte dos osciloscópios ópticos apresenta uma sensibilidade mínima em torno -10 dBm, ao passo que parte dos sistemas reais opera com sinais abaixo deste limite. De fato, um limite de potência tão alto impede que as medidas de sensibilidade de receptores reais (que atingem, por exemplo, valores típicos de -28 dBm para sinais de 1 Gb/s)

Quando comparada com as técnicas de medição de BER, a medição de PER apresenta uma série de vantagens. Elas apresentam baixo custo para implementação e facilidade experimental, requerendo apenas um computador e um programa que monitore a interface de rede do cliente. De fato, é possível encontrar na Internet programas gratuitos que façam esse monitoramento. Como a detecção dos pacotes é feita em alguma camada superior a camada 1 do modelo OSI, se houver alguma outra medida relativa à camada física que possa ser associada a PER considerada, será possível realizar uma medida do efeito *cross-layer*. A PER também pode ser utilizada para avaliar a qualidade de redes assíncronas, como redes IP. Outra característica importante é que, do ponto de vista do usuário, a PER de uma dada aplicação pode ser uma medida mais relevante que a BER. Isto ocorre, por exemplo, porque dependendo dos protocolos usados pode haver correção de erros de bits que não conduzam a perda de pacotes.

Neste trabalho, o interesse está voltado para analisar como características da camada física afetam o desempenho de aplicações (assíncronas) IP. Apesar de ser possível estimar a BER a partir de outras características da camada física (como potência de sinal, potência do ruído e razão sinal-ruído óptica) e de ser possível avaliar a perda de quadros¹ a partir da BER e do número de bits no quadro, na prática essas relações não podem conduzir a resultados muito confiáveis para a avaliação pretendida. Isso ocorre porque tais estimativas necessitam do conhecimento preciso das distribuições de ruído e do número de bits de cada quadro. Como exemplo, sob determinadas condições, a utilização de distribuições de ruído gaussiano ou chi quadrado podem levar a erros de até duas ordens de grandeza na estimativa da BER (Marcuse, 1990). Adicionalmente, a distribuição do número de bits em cada quadro (ou pacote) varia de aplicação para aplicação, o que influencia a estimativa de perda de quadros em função da taxa de erro de bits.

Por todas as razões e dificuldades acima citadas, é considerado mais pertinente medir experimentalmente (ao invés de fazer um estudo teórico) a relação entre o desempenho de sinais de aplicações IP e parâmetros da camada física em sistemas ópticos. Em particular, nos Capítulos 4 e 5, tal desempenho será avaliado em termos da PER de pacotes na camada 4 do modelo OSI e levará em consideração as condições de baixa potência (nas quais a BER não pode ser estimada através do método estatístico). Espera-se que tal avaliação experimental possa, em um futuro próximo contribuir para corroborar a utilização de modelos teóricos.

¹ Neste trabalho, é considerado que um quadro é um pacote da Camada 2 do Modelo OSI

Capítulo 3

Mistura de Quatro Ondas e Conversão de Comprimento de Onda.

Como mencionado anteriormente alguns nós de uma TON, podem ser capazes de realizar a conversão óptica de comprimentos de onda. Neste trabalho, tal conversão foi considerada através da mistura de quatro ondas. A conversão óptica através da mistura de quatro ondas independe da taxa de transmissão dos sinais e nem da modulação dos mesmos, desde que a amplitude e a fase sejam preservadas durante o processo (Ramaswami, 2001).

Neste capítulo será abordado o fenômeno da mistura de quatro ondas e como a sua aplicação foi utilizada neste trabalho. A seção 3.1 irá abordar o fenômeno da mistura de quatro ondas e a seção 3.2 explicará como esse conceito é utilizado na conversão de comprimento de ondas.

3.1 Mistura de Quatro Ondas – FWM

Quando três sinais nas frequências f_1 , f_2 e f_3 são co-propagados, o efeito de Kerr (dependência entre o índice de refração da fibra e a intensidade do sinal nela incidente) fará com que esses três sinais se combinem e criem um novo sinal na frequência $f_{123} = \pm f_1 \pm f_2 \pm f_3$. Esse fenômeno recebe o nome de mistura de quatro ondas. É possível estimar a potência gerada pela mistura de quatro ondas na frequência f_{123} através da equação (Shibata, Braun *et al.*, 1987; Song, Allen *et al.*, 1999).

$$P_{1,2,3}(L) = \frac{\eta}{9} D^2 \gamma^2 P_1 P_2 P_3 \exp(-\alpha L) \left\{ \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]^2}{\alpha^2} \right\} \quad (1).$$

Nesta equação P_1 , P_2 e P_3 representam as potências (em Watts) dos sinais em f_1 , f_2 e f_3 respectivamente, L é o comprimento da fibra, α é o coeficiente de atenuação da fibra, γ é o coeficiente não linear da fibra, D é o fator de degeneração que é igual a seis, para o caso não degenerado (considerado acima); ou três para o caso degenerado, no qual duas das frequências são coincidentes ($f_2 = f_3$).

A eficiência η da mistura de quatro ondas irá depender do casamento de fase entre os sinais que estão sendo transmitidos. Para haver casamento de fase, a dispersão cromática da fibra deve ser baixa, pois assim os sinais com diferentes comprimentos de onda irão se propagar com velocidades próximas. Outros fatores tais como: a potência dos canais de transmissão, a separação entre as frequências sinais propagados, o comprimento do enlace de fibra, irão influenciar a eficiência da mistura de quatro ondas. De fato, esta eficiência pode ser expressa da seguinte forma (Shibata, Braun *et al.*, 1987; Song, Allen *et al.*, 1999):

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta k')^2} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta k' L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\} \quad (2).$$

$\Delta k'$ representa o fator de casamento de fase.

$$\Delta k' = \Delta k - \gamma(P_1 + P_2 - P_3) \left\{ \frac{1 - \exp(-\alpha L_{eff})}{\alpha L_{eff}} \right\} \quad (3)$$

Δk representa o fator de casamento de fase linear.

$$\Delta k = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta_{f1k} \Delta_{f2k} \left[D_c + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta_{f1k} + \Delta_{f2k}) \frac{dD_c(\lambda_k)}{d\lambda} \right] \quad (4)$$

L_{eff} representa o comprimento efetivo da fibra para o qual se assume que a potência dos sinais seja fracamente depletada. λ_k representa o comprimento de onda na frequência f_k ,

Δ_{f_1k} e Δ_{f_2k} representam o espaçamento dos sinais nas frequências f_1 e f_2 em relação ao sinal na frequência f_k . D_c representa a dispersão cromática da fibra. As equações (1) a (3) também pressupõe que os sinais nas frequências f_1, f_2 e f_3 tenham o mesmo estado de polarização.

Em sistemas de comunicação com multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing WDM*) a mistura de quatro ondas é uma grande fonte de *cross-talk*, pois pode gerar ondas que se sobrepõem aos sinais que estão sendo transmitidos (Ramaswami, 2001). Existem algumas estratégias para minimizar a influência negativa gerada pela mistura de quatro ondas, tais como: aumentar a separação entre os canais de transmissão e alocar tais canais com separação não homogênea, de tal forma que os sinais gerados pela mistura de quatro ondas não se sobreponham aos canais de transmissão (Mukherjee, 2006).

3.2 Conversor de Comprimento de Onda

Nesta seção será discutida como a FWM pode ser utilizada para implementar um conversor de comprimentos de onda.

A Figura 7 (a) contém um diagrama de blocos simplificado de um conversor de comprimentos de onda baseado na FWM. A Figura 7 (b) contém um gráfico ilustrando o espectro de frequências para cada um dos pontos A, B, C e D da Figura 7 (a)

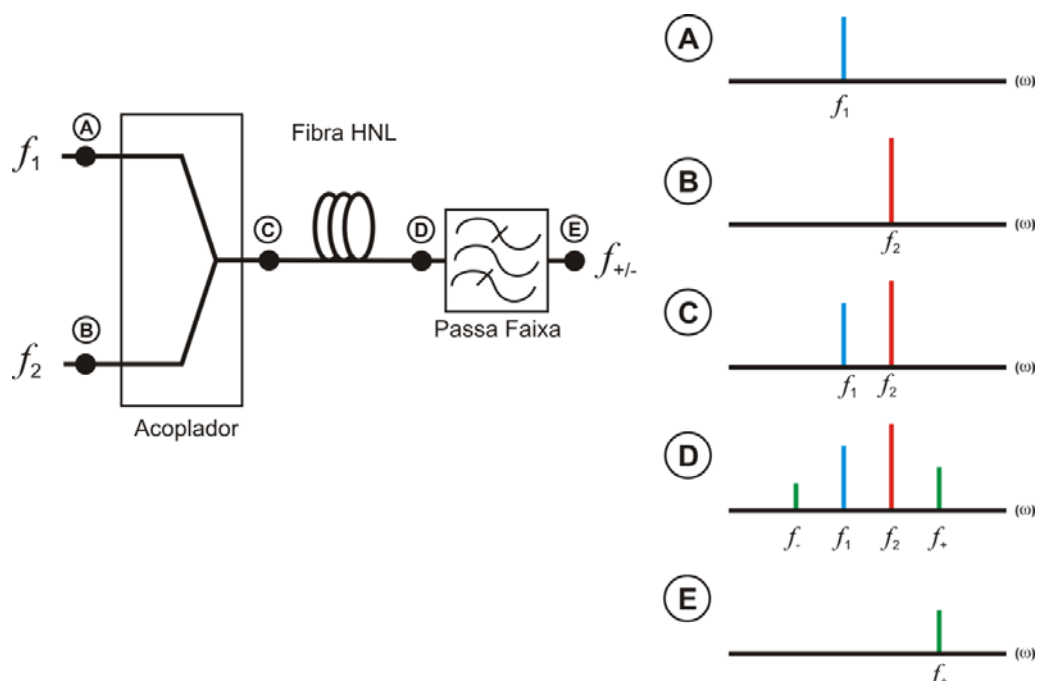


Figura 7 - Diagrama Simplificado do Conversor de Comprimento de Onda

O ponto A representará o ponto no qual o sinal original será inserido na frequência f_s . Para que haja a conversão de comprimento de onda, no ponto B será inserido o sinal de bombeio em uma frequência f_p . Este sinal consiste de uma onda contínua (*continuous wave cw*) e de alta potência. O ponto C está localizado na entrada da fibra do tipo altamente não linear (*HNL-DS – Highly Nonlinear Dispersion Shifted*) que evidencia os fenômenos não lineares e, portanto, irá contribuir positivamente para a conversão de comprimento de onda. Quando os sinais em f_s e f_p são propagados na fibra HNL a mistura de quatro ondas irá agir fazendo com que sejam criados sinais nas frequências laterais f_{c1} e f_{c2} dadas por:

$$f_{c2} = 2f_s - f_p \quad (5a)$$

$$f_{c1} = 2f_p - f_s \quad (5b)$$

De fato as potências dos sinais em f_{c1} e f_{c2} podem ser previstas por (1) aplicada ao caso degenerado da FWM:

$$P_{c1}(L) = \eta \gamma^2 P_s P_p^2 \exp(-\alpha L) \left\{ \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]^2}{\alpha^2} \right\} \quad (6a)$$

$$P_{c2}(L) = \eta \gamma^2 P_p P_s^2 \exp(-\alpha L) \left\{ \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]^2}{\alpha^2} \right\} \quad (6b)$$

A partir destas equações observa-se que sempre que houver um bit 0 em f_s , a potência do sinal convertido será nula. Além disso, sempre que houver um bit 1 em f_s haverá também um bit 1 em f_{c1} e f_{c2} . Isso mostra que os sinais criados nas frequências f_{c1} e f_{c2} são cópias do sinal inserido na frequência f_s conforme ilustrado na Figura 7.

Prosseguindo com a seqüência apresentada na Figura 7, o ponto D está localizado no final da fibra HNL, neste ponto é evidente a presença dos sinais em f_{c1} e f_{c2} . O ponto E localiza-se após o filtro passa faixa, cuja função é selecionar um dos canais convertidos em f_{c1} ou f_{c2} .

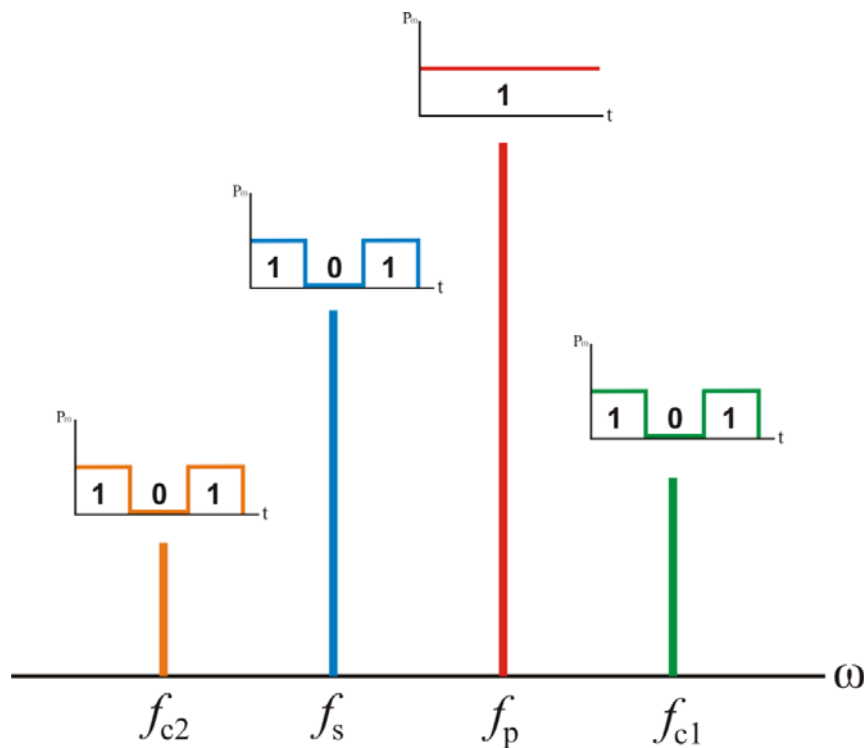


Figura 8 - Cópia do Sinal f_s em f_{c1} e f_{c2}

Deve-se ressaltar o fato de que o diagrama de blocos apresentado pela Figura 7 é uma versão simplificada do conversor de comprimento de onda utilizado neste experimento. O objetivo deste diagrama é demonstrar a aplicação da mistura de quatro ondas e facilitar o entendimento de como a utilização deste fenômeno permite realizar a conversão de comprimento de onda. O diagrama do conversor utilizado neste trabalho será abordado em detalhes no arranjo experimental apresentado no Capítulo 4.

Capítulo 4

Transmissão com Conversão de Comprimentos de Onda.

Este capítulo apresentará os testes realizados para avaliar o efeito de *cross-layer* em uma transmissão de vídeo quando esta passa por um conversor de comprimento de ondas. Estes testes irão avaliar a influência da conversão de comprimento de onda na qualidade de uma transmissão de vídeo. A Seção 4.1 irá apresentar o arranjo experimental utilizado para este fim. A Seção 4.2 apresentará os programas utilizados no experimento. A Seção 4.3 apresentará a análise dos resultados obtidos com os testes. Tais resultados foram publicados em (Abbade, Marconi *et al.*, 2009) A Seção 4.4 contém as curvas de ajuste obtidas para os resultados experimentais e Seção 4.5 apresentará as conclusões para os testes de transmissão de vídeo com conversão de comprimentos de onda.

4.1 Arranjo Experimental

O experimento consistiu em transmitir um sinal de vídeo por um determinado enlace de fibra, fazer a conversão de comprimento de onda e avaliar como essa conversão influenciou a PER do sinal.

A Figura 9 apresenta o diagrama de blocos para o experimento. O sinal de vídeo, que consistia de um DVD contendo um filme de três horas de duração, codificação MPEG – 2 de resolução 720 x 480, a uma taxa de transmissão de quadros de 29.97 quadros por segundo, partia do servidor de vídeo VS. O conversor de mídia MC convertia um sinal Gigabit Ethernet elétrico para o domínio óptico e o enviava para ser amplificado pelo EDFA 1. Depois de amplificado o sinal era transmitido pela rede KyaTera. O sinal partindo da UNICAMP foi propagado até a Fundação CPqD, encaminhado para a PUC – Campinas, redirecionado para UNICAMP. O sinal percorria esse caminho duas vezes,

totalizando um percurso de 40 km em fibra monomodo STD, e depois era inserido no conversor de comprimento de onda AOWC. O sinal na saída deste dispositivo, que será chamado de sinal convertido, foi então atenuado pelo VOA, amplificado por EDFA 2 e filtrado por OBPF 1. Um acoplador dividia este sinal em duas partes. A primeira era encaminhada ao analisador de espectro OSA 2, ao passo que o sinal da segunda parte era convertido para o domínio elétrico pelo conversor de mídia MC. O vídeo era então reproduzido no cliente de vídeo no qual um programa de computador avaliava a sua PER.

O quadrado tracejado representa a parte da rede óptica experimental KyaTera utilizada no experimento.

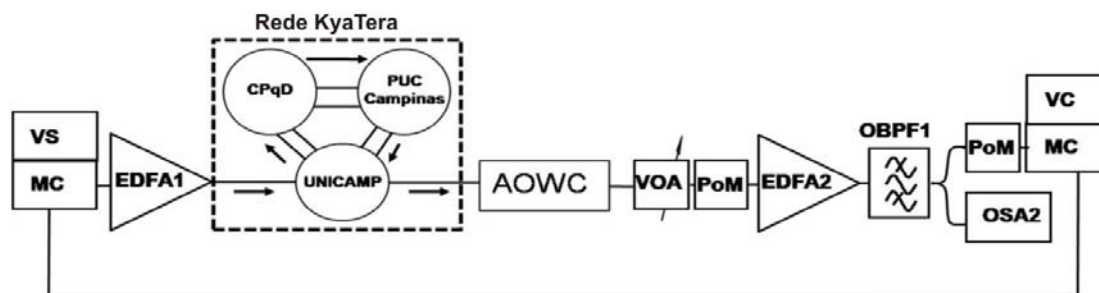


Figura 9 - Diagrama de Blocos para Transmissão com AOWC

Adotou-se que o sinal de entrada f_s ficaria sempre na mesma frequência $f_s = 193.1$ THz. Para obter diferentes sinais convertidos f_c seria variada a posição do sinal de bombeio f_p . Foram escolhidas cinco frequências para conversão: $f_c = 191.6$ THz, 191.8 THz, 192.0 THz, 192.1 THz e 192.2 THz.

4.1.1 Conversor de Comprimento de Onda

A Figura 10 apresenta o diagrama de blocos do conversor de comprimentos de onda. Ela apresenta o conteúdo do bloco AOWC da Figura 9.

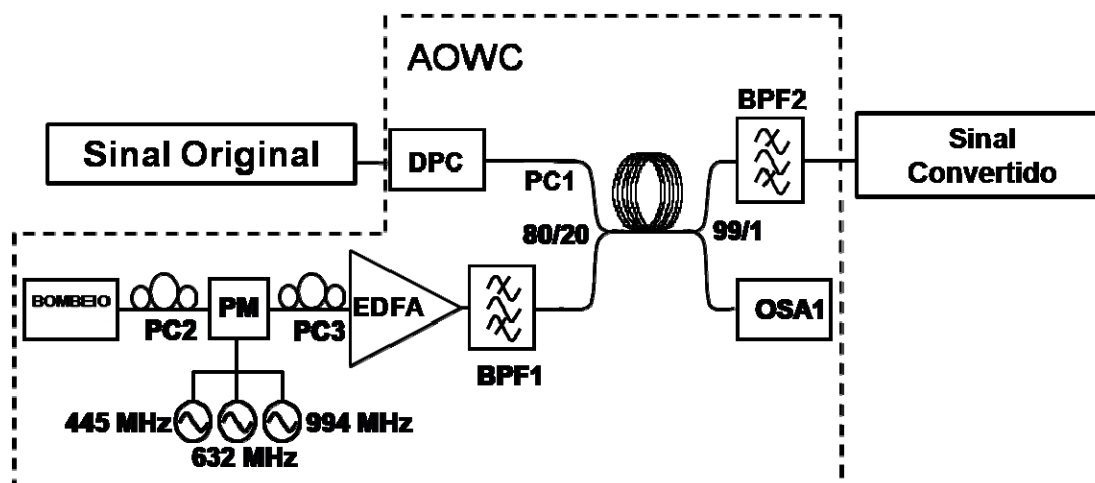


Figura 10 - Diagrama de Blocos do Conversor de Comprimento de Onda

O conversor de comprimento de ondas atua da seguinte maneira: O sinal original de vídeo é inserido no conversor através da entrada, aqui representada pelo bloco Sinal Original. O sinal então passa por um controlador dinâmico de polarização DPC que mantém constante o estado de polarização do sinal. Depois é inserido na fibra altamente não linear HNL através de um acoplador 80/20. Pela outra entrada do acoplador é inserido o bombeio. O laser gerador do sinal de bombeio é representado pelo bloco bombeio. Antes de ser amplificado o sinal passa por dois controladores de polarização PC2 e PC3 e por um modulador de fase. O sinal de bombeio foi modulado em fase para prevenir que haja o retroespalhamento Brillouin. A modulação de fase foi feita utilizando-se um conjunto de três frequências de RF: $f_{RF1} = 445$ MHz, $f_{RF2} = 632$ MHz e $f_{RF3} = 994$ MHz. Com estas frequências a modulação em fase aumenta a largura de linha do laser de bombeio para aproximadamente 5 GHz (Marconi, Boggio *et al.*, 2004). A largura de linha do sinal convertido pode ser obtida somando-se a largura de linha do sinal de bombeio a largura de linha do sinal original. Este fato pode ser um limitador para o número de conversões que um sinal pode sofrer antes que sua largura de linha esteja alargada demais para a utilização em uma rede prática (Marconi, Callegari *et al.*, 2009).

Depois de passar pelo modulador de fase o sinal de bombeio é amplificado e inserido pelo acoplador 80/20 em uma fibra do tipo altamente não linear. A Tabela 1 apresenta os parâmetros da fibra.

Comprimento	$L = 3 \text{ km}$
Coefficiente de Atenuação	$\alpha = 0.83 \text{ dB/km}$
Parâmetro Não – Linear	$\gamma = 9.1 \text{ (W} \cdot \text{km)}^{-1}$
Inclinação da Dispersão	$S_0 = 0.017 \text{ ps/nm}^2\text{km}$
Comprimento de onda para o Zero de Dispersão Médio	$\bar{\lambda}_0 \sim 1556 \text{ nm}$

Tabela 1 - Parâmetros da Fibra HNL

O desvio padrão de para $\bar{\lambda}_0$ e $\Delta\lambda_0$ é de aproximadamente 10 nm. A medida de $\bar{\lambda}_0$ e $\Delta\lambda_0$ foi feita conforme descrito em (Boggio, Marconi *et al.*, 2007). O valor relativamente alto de $\Delta\lambda_0$ apresenta a vantagem de aumentar a largura de banda de conversão de comprimento de onda (Marconi, Callegari *et al.*, 2009).

4.2 Programas Utilizados no Experimento

Para fazer a transmissão do vídeo utilizou-se o programa gratuito VLC Media Player (Www.Videolan.Org, 2007). O tamanho padrão para o pacote UDP utilizado pelo VLC é de 1336 Bytes.

Para contabilizar a perda de pacotes foi utilizado no cliente de vídeo um programa analisador de protocolos chamado Wireshark (Geraldcombs, Guyharris *et al.*, 2007). Esse programa atua monitorando a interface de rede do computador de destino capturando todos os pacotes recebidos. Através da numeração seqüencial inserida pelo protocolo RTP o programa consegue determinar o número de pacotes que não chegaram ao destino. As perdas de pacotes foram analisadas para capturas em um período de trinta segundos. Neste período o programa capturava em média vinte mil pacotes.

Nas medidas foi definido um limite máximo de 6% para a PER. De fato em torno de 6% a deterioração da qualidade da transmissão era significativamente grande a ponto de interromper por completo a transmissão do vídeo. No entanto é importante notar que PERs em torno de 0.3 % e 0.5 % já causavam, respectivamente, falhas no áudio e na imagem (*glitches*).

4.2.1 Encapsulamento

Retomando o conceito apresentado nas Figuras 3 e 4, quando a estrutura de camadas foi apresentada, a Figura 11 apresenta este conceito já com os protocolos utilizados em todos os experimentos deste trabalho.

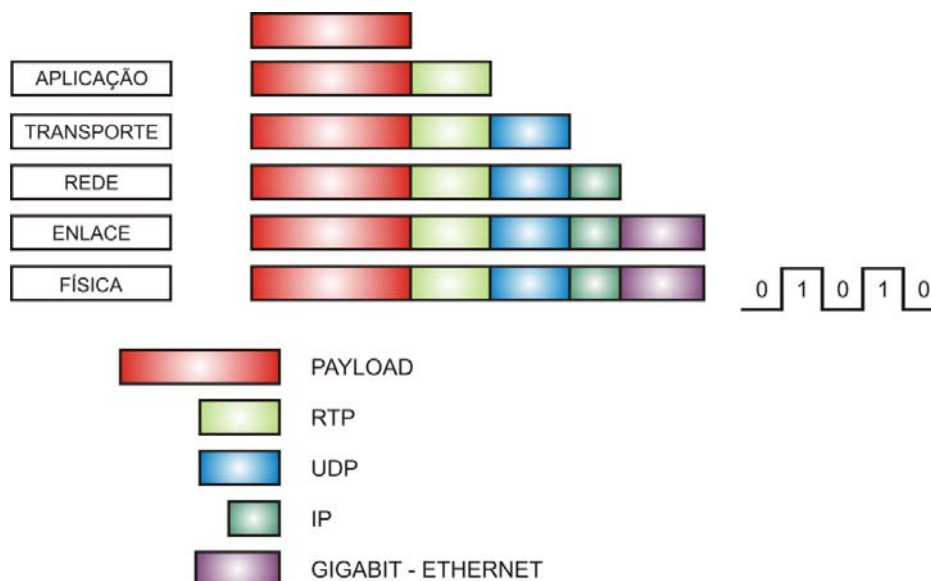


Figura 11 - Encapsulamento - Processo

O processo de encapsulamento para todos os experimentos neste trabalho acontece da seguinte maneira: Em um primeiro momento o *payload*, que é composto por um arquivo de vídeo é entregue à camada de aplicação. Essa camada irá utilizar o protocolo RTP (*Real-Time Transport Protocol*) que como é mostrado na Figura 11, adiciona um cabeçalho ao *payload*. A camada de aplicação então passa os dados para a camada de transporte. O protocolo da camada de transporte utilizado foi o UDP, que por sua vez também adiciona seu cabeçalho. Na camada enlace os dados são agrupados em um quadro Ethernet. Os bits do quadro então são transmitidos pela camada física.

A Figura 12 exemplifica a estrutura de um quadro resultante do processo de encapsulamento descrito anteriormente. Nela é possível perceber que o *payload* acrescido do cabeçalho irá se tornar o *payload* da camada inferior. Novamente quando a camada inferior acrescenta um cabeçalho a este *payload* os dois irão se tornar o *payload* da camada abaixo.

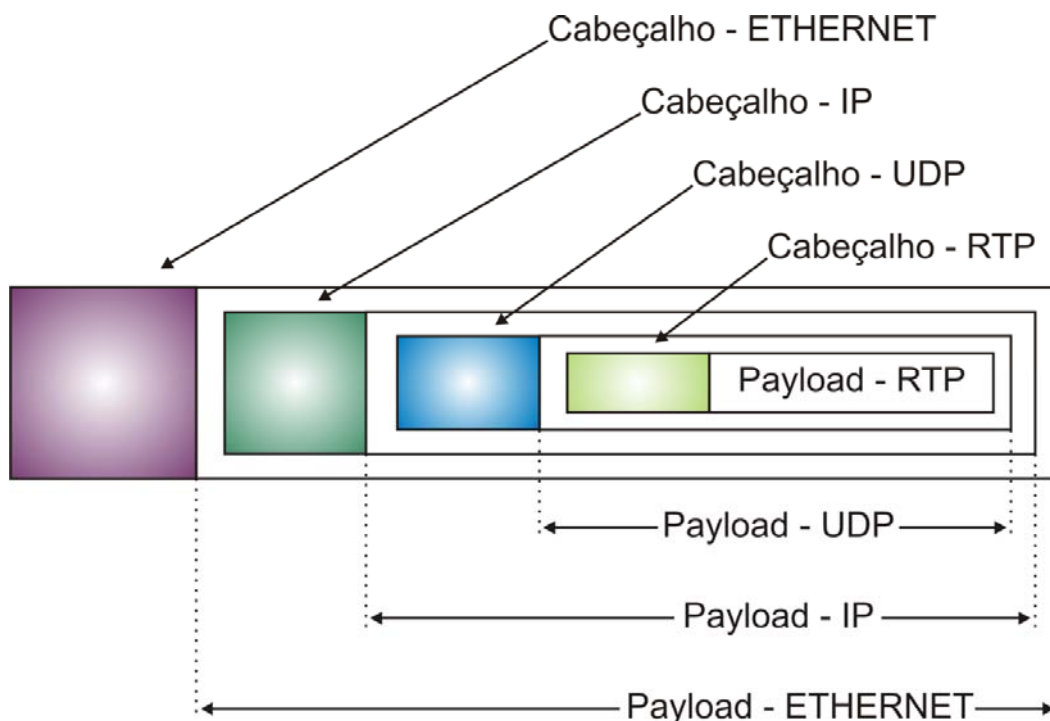


Figura 12 - Encapsulamento - Estrutura

4.3 Resultados para Transmissão com AOWC

A Figura 13 apresenta a análise espectral contendo os sinais convertidos (f_c), o sinal original (f_s) e os sinais de bombeio (f_p). Como mencionado no capítulo anterior para gerar os canais convertido variou-se a posição do sinal de bombeio. Os canais convertidos foram escolhidos segundo a grade ITU para as frequências de: $f_c = 191.6$ THz, 191.8 THz, 192.0 THz, 192.1 THz e 192.2 THz. A Figura 13 foi obtida pelo OSA1, com uma resolução de 0.01 nm.

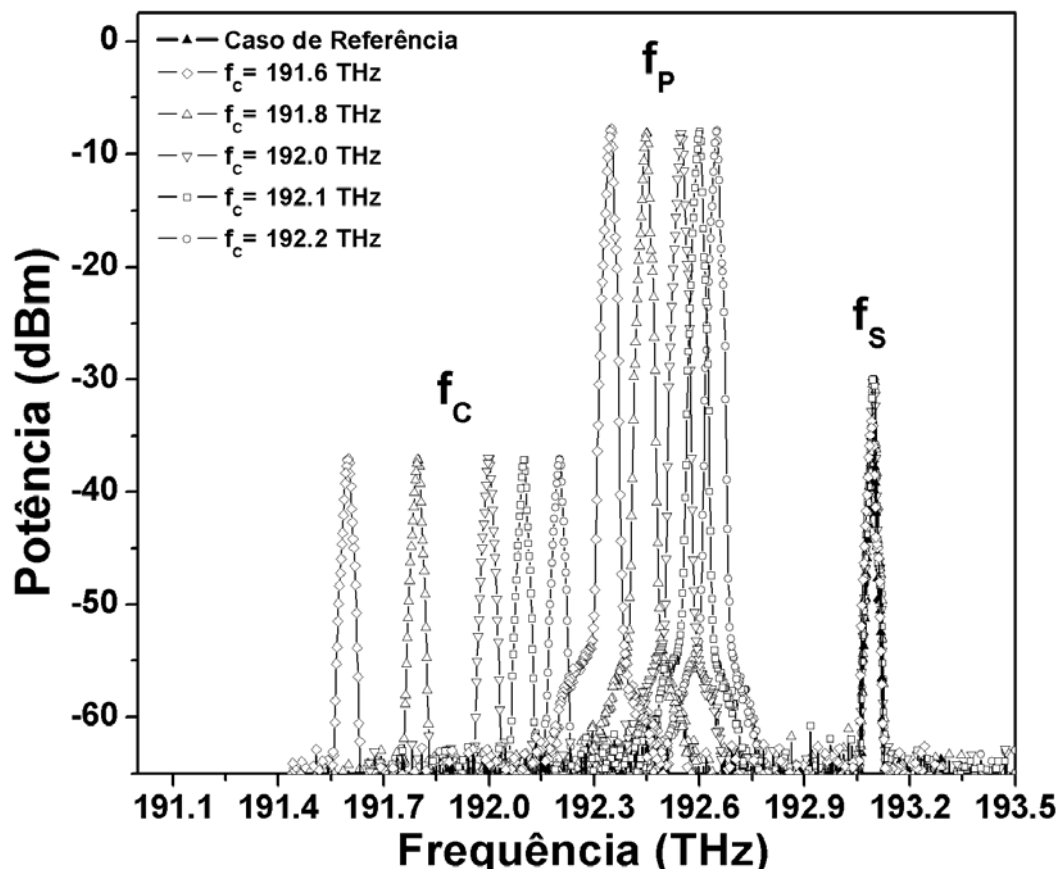


Figura 13 - Espectros dos Sinais de Entrada (f_s), Bombeio (f_p) e Sinais Convertidos (f_c)

A Figura 14 apresenta a análise espectral para o sinal original (f_s) e os sinais convertidos (f_c). Essa figura foi obtida pelo OSA 2 exibido também na Figura 9 que contém o diagrama de blocos para o dispositivo de conversão de comprimento de onda.

O Caso de Referência exibido tanto na Figura 13 quanto na Figura 14, foi obtido transmitindo o sinal através do conversor de comprimento de onda, porém com o sinal de bombeio desligado. De maneira a conseguir uma comparação justa entre o desempenho do sinal transmitido com conversão de comprimento de onda e o sinal transmitido sem a conversão de comprimento de onda, as potências dos sinais convertidos foram equalizadas.

Essa equalização foi feita controlando-se a potência do sinal de bombeio através do ajuste do ganho do amplificador EDFA 2. Os sinais equalizados são mostrados na Figura 14.

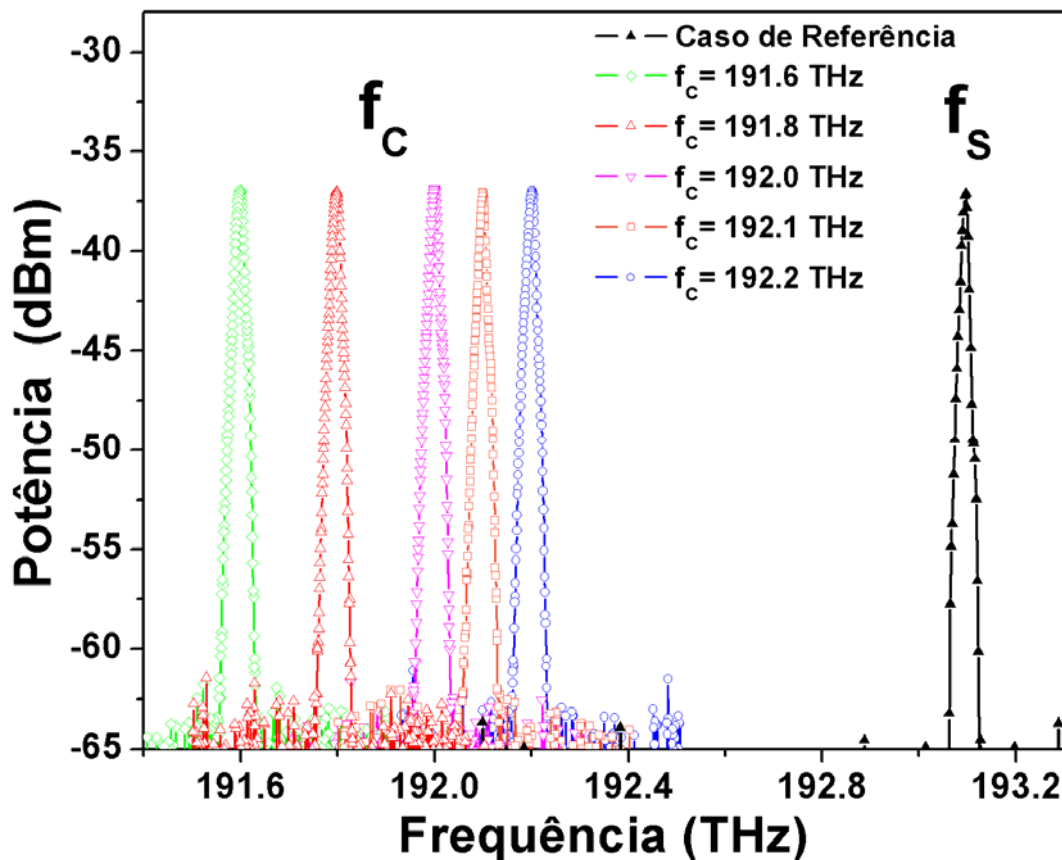


Figura 14 - Espectros dos Sinais Convertidos (f_c) e do Sinal Original (f_s)

A diferença na potência de pico entre os sinais foi inferior a 0.3 dB. É válido ressaltar que tal procedimento de equalização se relaciona também ao fato de sistemas de comunicação WDM atingirem maior distância de propagação quando todos os seus sinais apresentam a mesma potência (Ramaswami, 2001).

4.3.1 Imperfeições na Imagem (*Glitches*)

A Figura 15 exibe imagens capturadas no cliente de vídeo. As imagens são para os casos em que a transmissão ocorre com uma PER = 0% (a) e para uma transmissão com uma PER = 0.5% (b).

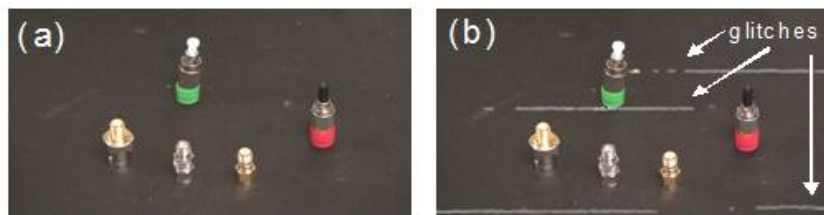


Figura 15 - Imagens de Conectores: PER = 0% (a) e PER = 0.5% (b)

Como foi mencionado anteriormente, para uma PER = 0.5 % já é possível notar o surgimento de imperfeições na imagem. Essas imperfeições são chamadas de *glitches* de vídeo. Vários são os parâmetros que irão influenciar o surgimento destas imperfeições em uma transmissão de vídeo, tais como: a codificação utilizada pelo vídeo, o tipo de filme que é transmitido, podendo variar conforme o dinamismo de uma determinada cena. Porém, a discussão acerca de padrões e codificações de vídeo e como estes são afetados pela PER de um sistema de transmissão não é foco deste trabalho, uma vez que, neste trabalho considerou-se a transmissão total do conteúdo de um filme, este contendo tipos variados de cenas. A imagem apresentada na Figura 15 possui os mesmos padrões de codificação utilizados para o teste. Devido a problemas referentes aos direitos autorais do filme neste trabalho não serão anexadas imagens do filme utilizado.

4.3.2 Análise da PER para o AOWC

A Figura 16 exibe um gráfico da PER do sinal de vídeo em função da potência óptica no receptor para o caso de referência e para os cinco casos de conversão analisados.

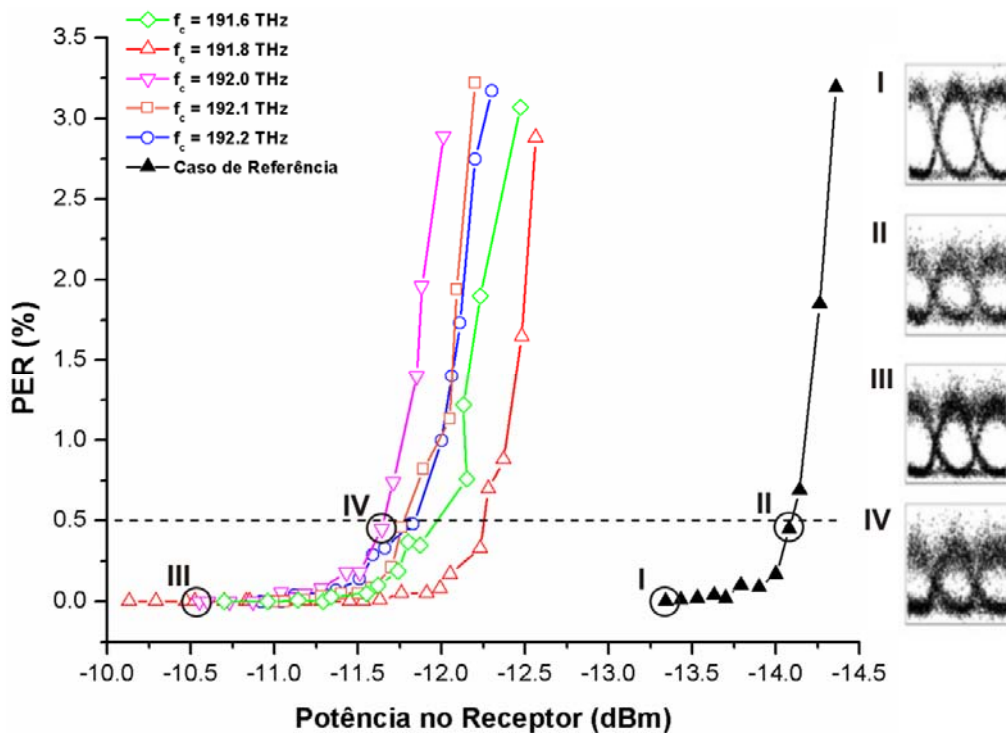


Figura 16 - PER – Desempenho da PER para transmissões com e sem AOWC

É possível perceber que quando o sinal de vídeo sofre a conversão de comprimento de onda a perda de pacote se manifesta em uma potência de recepção aproximadamente 2,1 dB maior.

Outra informação apresentada pela Figura 16 são os diagramas de olhos para as situações de PER igual a 0% e 0.5% para um sinal que sofreu conversão de comprimento de onda e para o sinal de referência. Uma observação importante deve ser feita a respeito destes diagramas. Para o arranjo experimental utilizado, a PER só se tornaria pronunciável para potências de recepção em torno de -12 dBm e -14 dBm. Essas potências estão abaixo da sensibilidade do osciloscópio utilizado no experimento. Portanto para tornar possível a visualização dos diagramas de olho a potência do sinal teve de ser amplificada para uma potência média de -8 dBm. Deve ser ressaltado o fato de que o processo de amplificação do sinal introduziu mais ruído ao sinal, dessa maneira não é possível estabelecer uma comparação quantitativa entre os diagramas de olho e as PERs observadas.

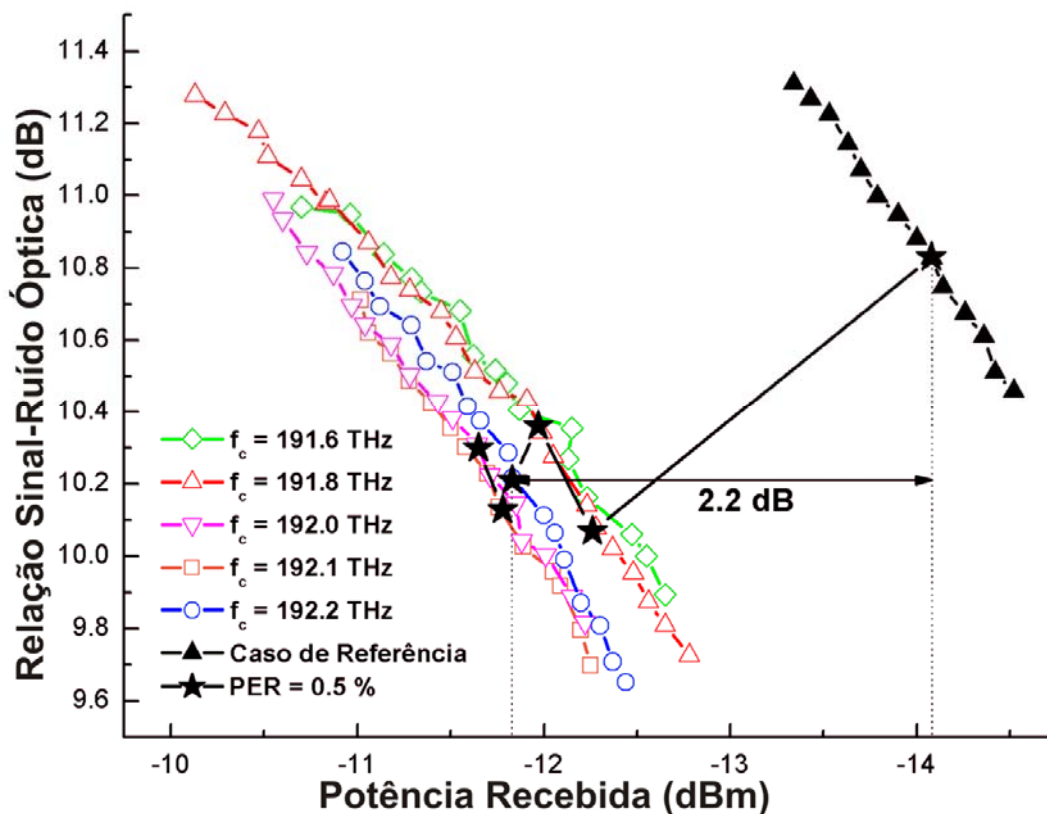


Figura 17 - Dependência entre OSNR e Potência Recebida

A Figura 17 apresenta um gráfico de potência recebida por relação sinal-ruído óptica. Para esta figura os pontos nos quais a PER é igual ou mais próximo possível a 0.5% foram marcados com uma estrela e unidos um ao outro. Foi possível perceber uma perda de aproximadamente 2.2 dB para uma mesma PER quando são comparados os casos em que há conversão de comprimento de onda e o caso de referência. Esta relação entre a degradação da relação sinal – ruído óptica e a PER também pode ser observada para outros casos, como por exemplo, para PERs equivalentes a 1% e 3%. Portanto quanto menor for a relação sinal-ruído óptica maior será a PER.

Outro aspecto que é possível notar nas Figuras 16 e 17 é que cada comprimento de onda convertido apresentou um desempenho diferente. Mesmo depois de equalizada as potências dos canais convertidos, como mostrado na Figura 14, os sinais convertidos continuavam a apresentar um desempenho diferente.

4.3.3 Análise da Diferença de Desempenho Entre os Sinais Convertidos

A teoria de Instabilidade Modulacional pode ser utilizada para explicar as flutuações na potência de ruído que deterioram a relação sinal-ruído de maneira diferente para cada sinal convertido. A diferença no desempenho dos sinais convertidos vistas nas Figuras 16 e 17 é função da quantidade diferente de ruído introduzida pelo dispositivo de conversão de comprimento de onda em cada um dos sinais convertidos

De fato, quando λ_0 apresenta um valor bem definido ($\Delta\lambda_0$ suficientemente pequeno), a teoria de instabilidade modulacional prevê o surgimento de sinais dentro da largura de banda, através de (7) (Agrawal, 2001), (Abbade, Marconi *et al.*, 2009).

$$\Omega_c = 2\pi f_p \pm \sqrt{\frac{4\gamma P_p}{|\beta_2|}} \quad (7)$$

Na equação 7 P_p representa a potência de sinal de bombeio e β_2 representa a dispersão de velocidade de grupo. O ganho da instabilidade modulacional é dado por:

$$g(\Omega) = |\beta_2\Omega| \sqrt{\Omega_c^2 - \Omega^2} \quad (8)$$

Na qual:

$$\Omega = 2\pi(f - f_p) \quad (9)$$

Desta maneira é possível notar que cada componente de ruído na frequência f estará sujeito a um ganho diferente. Portanto neste experimento o ruído em torno de uma dada frequência f_{c1} apresentará um ganho $g(f_{c1})$. Quando a frequência de bombeio é alterada para se obter um novo sinal convertido, em, por exemplo, f_{c2} a mudança no espectro de Instabilidade Modulacional irá modificar o ganho do ruído ao redor de f_{c2} .

A Figura 18 apresenta os espectros para os sinais de bombeio utilizados para fazer a conversão de comprimento de onda. Para obtenção destes espectros o filtro passa banda BPF1, apresentado na Figura 9 foi contornado.

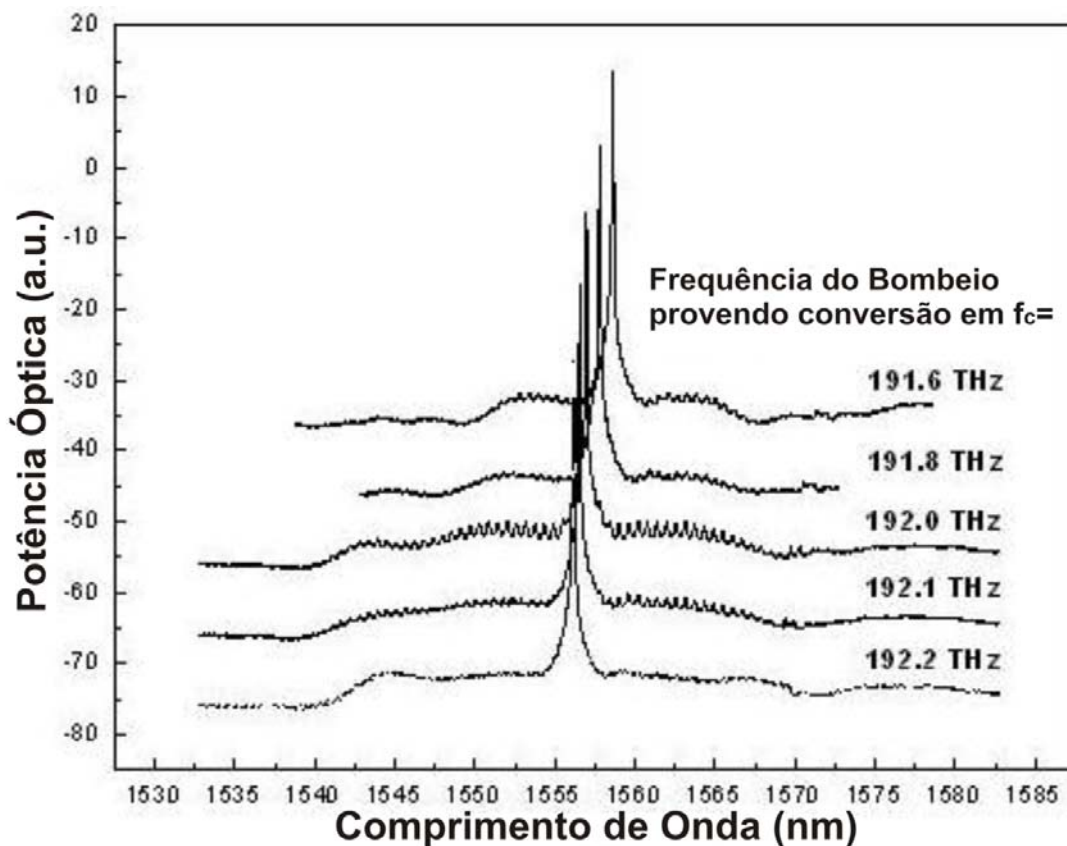


Figura 18 - Espectro para os Sinais de Bombeio

Os espectros utilizados apresentam uma região plana de ganho que maximiza a largura da banda de conversão (Marconi, Callegari *et al.*, 2009). Porém este fator não é previsto pelas equações (7) e (8). Esta maximização se deve ao valor de $\Delta\lambda_0$ da fibra altamente não-linear HNL ser alto, $\Delta\lambda_0 \sim 10 \text{ nm}$. Apesar da diferença entre a teoria de instabilidade modulacional e os resultados experimentais, foi observado o fato de que sinais em uma dada frequência (ou comprimento de onda, $\lambda = c/f$) estão sujeitos a diferentes ganhos variando conforme a frequência do sinal de bombeio. Este fato estava de acordo com as expectativas para a diferença no desempenho da PER para os sinais que sofreram a conversão de comprimento de onda.

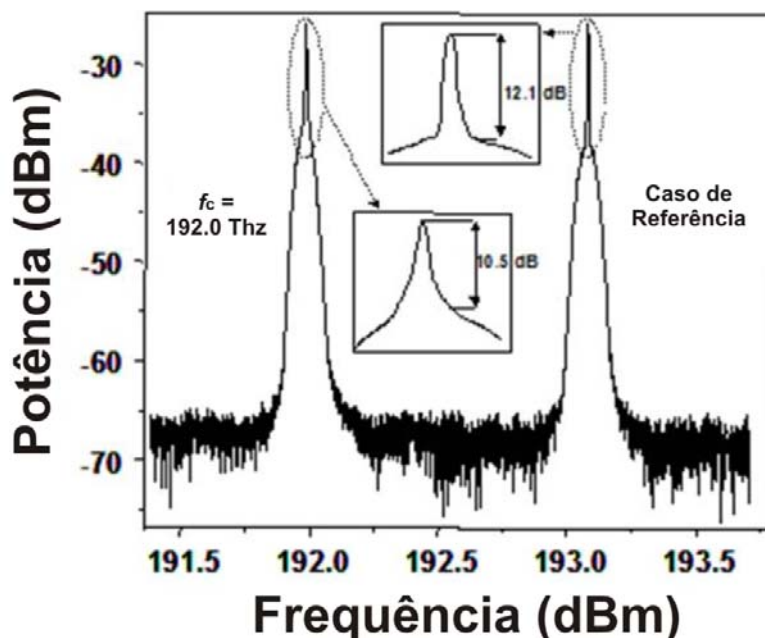


Figura 19 - Espectro - Sinal Convertido e Caso de Referência

A Figura 19 exibe os espectros dos sinais transmitidos para o caso de referência, no qual não há conversão de comprimento de onda e para um sinal que foi convertido para a frequência de 192.0 THz. Essa figura também mostra um comparativo entre a relação sinal-ruído de ambos os sinais. Em ambos os sinais a PER era de aproximadamente 0.5%. Fica claro que para este caso a relação sinal-ruído caiu de 12.1 dB para 10.5 dB, uma perda de 1.5 dB.

Estes resultados indicam que a origem física do efeito de *cross-layer* reside no fato de que o dispositivo de conversão de comprimento de onda causa certa degradação na relação sinal-ruído óptica. Esta degradação faz com que haja maior perda de pacotes e por consequência da compressão de vídeo utilizada, para este caso o MPEG 2, irá gerar um aumento dos *glitches* observados no vídeo.

Com a finalidade de estabelecer a penalidade imposta pela presença do dispositivo de conversão de comprimento de onda teria em uma rede óptica um teste adicional foi feito. Esse teste consistiu em contornar o dispositivo de comprimento de onda e avaliar o desempenho da PER nesta situação.

Os resultados obtidos revelam que a presença de tal dispositivo na rede implica em uma penalidade de aproximadamente 16 dB para o sistema. Assumindo que uma fibra de transmissão tenha uma atenuação padrão de 0.2 dB/km a utilização do conversor de comprimento de onda se torna aceitável para enlaces com uma distância superior a 80 km (= 16 dB/0.2 dB/km).

4.4 Curvas de Ajuste para os Resultados Experimentais

Esta seção apresentará as curvas de ajuste para os resultados obtidos no experimento com conversão de comprimentos de onda. A importância dessas curvas será discutida no próximo capítulo.

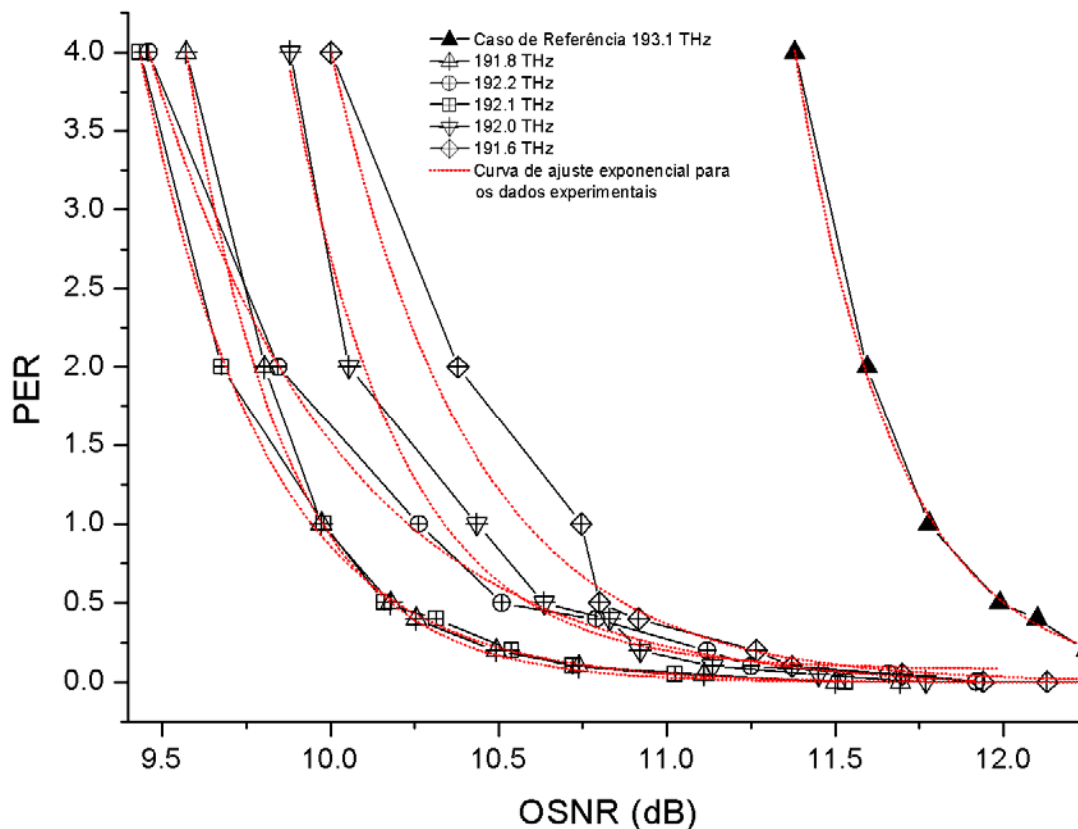


Figura 20 - Curvas de Ajuste Exponencial para os Dados Experimentais

A Figura 20 apresenta um gráfico de PER pela relação sinal-ruído óptica para o caso de referência e os experimentos com conversão e comprimentos de onda. Ainda no gráfico estão presentes as curvas de ajuste exponencial para os resultados obtidos. Os parâmetros para estas curvas são apresentados abaixo. As curvas foram obtidas com um coeficiente de determinação R^2 de no mínimo 0.97.

$$PER_{REF} = 0.01 + 4.06 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-11.38)}{0.3}} \quad (10a)$$

$$PER_{192.2 THz} = -0.04 + 4.08 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-9.45)}{0.56}} \quad (10b)$$

$$PER_{192.1 THz} = -0.003 + 4.03 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-9.43)}{0.36}} \quad (10c)$$

$$PER_{192.0 THz} = 0.08 + 3.94 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-9.86)}{0.32}} \quad (10d)$$

$$PER_{191.8 THz} = 4 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-9.58)}{0.29}} \quad (10e)$$

$$PER_{191.6 THz} = 4 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-10)}{0.42}} \quad (10f)$$

4.5 Conclusão para Transmissão de Vídeo com AOWC

Os resultados obtidos para as transmissões de vídeo com conversão de comprimento de onda permitem concluir que sinais convertidos separados do sinal original por até 1.5 THz podem sofrer uma penalidade média de potência de 2.1 dB e uma penalidade máxima de potência de 2.5 dB. Para uma rede WDM realizando roteamento por comprimento de onda, esta informação pode ser utilizada pelo algoritmo de roteamento (IA – RWA) para elevar os custos das rotas que abrangem nós capazes de realizar a conversão de comprimento de onda totalmente óptica. Assumindo que fibras

de transmissão possuam uma atenuação típica de 0.2 dB/km, cada conversão tende a reduzir o alcance de propagação do sinal em aproximadamente 10 km.

Os resultados também permitem concluir que os parâmetros físicos que influenciaram a PER para os diferentes comprimentos de ondas para os quais o sinal de vídeo foi convertido, estão relacionados com ganho do ruído introduzido pela Instabilidade Modulacional.

Outra informação importante revelada neste experimento é o fato de o dispositivo de conversão de comprimento de onda introduzir uma penalidade de aproximadamente 16 dB ao sistema. Sinais que simplesmente passem pelo dispositivo mesmo que não sofram conversão de comprimento de onda estarão sujeitos a perda mencionada. Essa é informação também é de grande importância para os IA-RWA, pois a conversão de comprimentos de onda se torna aceitável apenas para casos em que o sinal não convertido tivesse que trafegar por distâncias superiores a 80 km. Para esta última afirmação deve ser salientado o fato de que o valor de 16 dB para a atenuação imposta pelo dispositivo de conversão de comprimento de onda foi obtido experimentalmente e que para o desenvolvimento do dispositivo utilizado não houve um trabalho orientado a otimização do dispositivo. A montagem foi feita exatamente como mostrada no arranjo experimental, mostrado nas Figuras 9 e 10 da seção 4.1 deste capítulo.

Capítulo 5

Testes Adicionais sem Conversão de Comprimento de Onda.

No capítulo anterior, foram apresentados resultados relativos à influência de um conversor de comprimentos de onda na perda de pacotes ocasionada durante uma transmissão de vídeo. Estes resultados podem ser úteis no dimensionamento de redes ópticas futuras, que venham a utilizar tais dispositivos de conversão. No entanto também é interessante analisar como a transmissão de sinais de vídeo é influenciada pela propagação nos enlaces das redes ópticas atuais. Por esta razão, neste capítulo, serão apresentados alguns resultados complementares, relativos à degradação de sinais de vídeo transmitidos por estes enlaces.

Os experimentos realizados neste capítulo emulam uma situação na qual:

- a) A dispersão nos enlaces estaria totalmente compensada.
- b) Os efeitos não lineares da fibra são desprezíveis.
- c) O sinal de vídeo pode ser degradado ao passar por uma cascata de amplificadores ópticos que gerarão um acúmulo de ruído ASE ao sinal.

Estas considerações estão de acordo com os resultados obtidos em (Simões, Rocha *et al.*, 2003). Em especial o objetivo deste experimento foi avaliar o desempenho da PER variando-se dois parâmetros: Potência de ruído e tamanho de pacotes. As potências de ruído escolhidas foram: -39.2, -35.7 e -33.6 dBm e os tamanhos de pacotes utilizados foram de: 1336, 960, 584 e 396 Bytes.

Este capítulo está organizado da seguinte forma. O arranjo experimental é apresentado na Seção 5.1. Os resultados experimentais estão na Seção 5.2, na Seção 5.3 são apresentadas as curvas de ajuste para os resultados experimentais. A Seção 5.4 contém as conclusões deste experimento.

5.1 Arranjo Experimental

A Figura 21 apresenta o arranjo experimental que visa emular uma rede óptica para se estudar como a degradação da relação sinal-ruído afeta a perda de pacotes na transmissão de um sinal de vídeo.

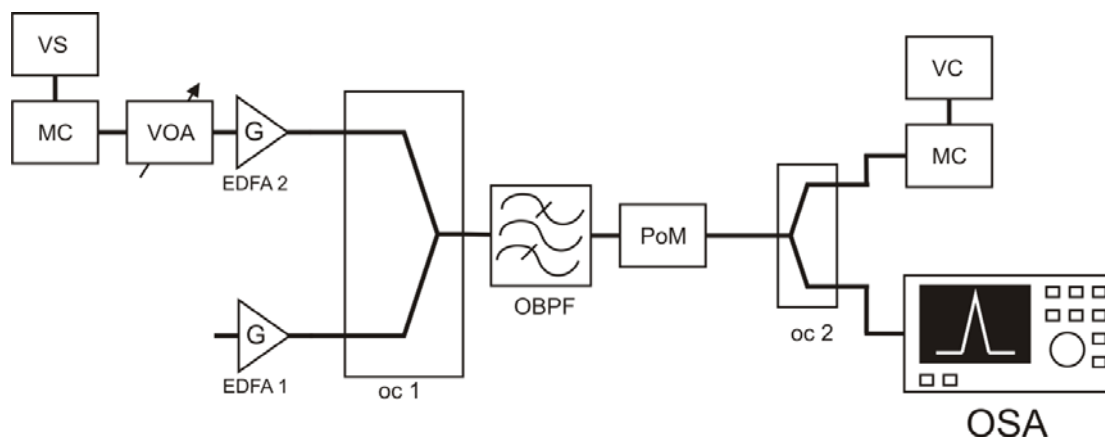


Figura 21 - Diagrama de Blocos para Transmissão sem AOWC

Com relação ao diagrama de blocos apresentado na Figura 21, os blocos VS e VC representam respectivamente o computador servidor de vídeo e o computador cliente de vídeo. Os blocos MC representam os dois conversores de mídia. EDFA1 e EDFA 2 representam amplificadores ópticos, VOA é um atenuador óptico variável, OC1 e OC2 são acopladores, OBPF é um filtro óptico passa faixa, PoM representa um medidor de potência óptica e OSA é um analisador de espectro óptico.

Esse arranjo experimental foi utilizado para determinar como a PER em uma transmissão de vídeo é influenciada pela degradação da relação sinal-ruído em diferentes situações.

O experimento consistiu em transmitir o sinal de vídeo a partir de VS. O primeiro conversor de mídia MC convertia o sinal Gigabit Ethernet para o domínio óptico. O sinal então passava pelo VOA a fim de emular a propagação por um enlace de fibra óptica. O amplificador EDFA 2, foi utilizado para compensar as perdas iniciais do sistema para que todas as medidas fossem feitas inicialmente com a mesa potência de recepção no medidor de potência óptica PoM. Saindo do amplificador EDFA 2 o sinal então era inserido no acoplador OC1. O amplificador EDFA1 foi conectado a outra entrada de OC1, com o intuito de injetar ruído na transmissão de vídeo e emular o comportamento que ocorreria se o sinal estivesse sendo propagado por uma cascata de amplificadores ópticos. Para realizar esta tarefa, assim como feito em (Marconi, Callegari *et al.*, 2009) , a corrente de ganho de EDFA1 foi gradualmente aumentada, sem que houvesse nenhum sinal na entrada deste equipamento. Dessa maneira, o ruído ASE gerado pelo próprio EDFA1 tornava-se amplificado e reduzia a relação sinal-ruído do sinal de vídeo. O sinal então acrescido de ruído passava pelo filtro óptico passa faixa OBPF e depois era dividido por OC2, parte para o cliente de vídeo, passando pelo conversor de mídia e parte para o analisador de espectro óptico. No computador cliente VC a PER da transmissão era quantificada (de acordo com o procedimento já explicado no Capítulo 4) e no OSA era analisado o espectro do sinal.

Para uma captura de trinta segundos de filme, para transmissões com pacotes de tamanho igual a 1336 Bytes foram capturados uma média de 20.000 pacotes. Para as transmissões com pacotes de tamanhos iguais a 960 Bytes foram capturados em média 28.000 pacotes. Em transmissões com pacotes de 584 Bytes foram capturados uma média de 48.000 pacotes. Transmissões com pacotes de tamanhos iguais a 396 Bytes foram capturados uma média de 68.000 pacotes.

A Figura 22 apresenta o espectro do filtro óptico passa faixa utilizado neste experimento. Observa-se que a largura de banda deste filtro é igual a 0.46 nm e 1.24 nm, respectivamente, a 3 e 10 dB da potência de pico do sinal.

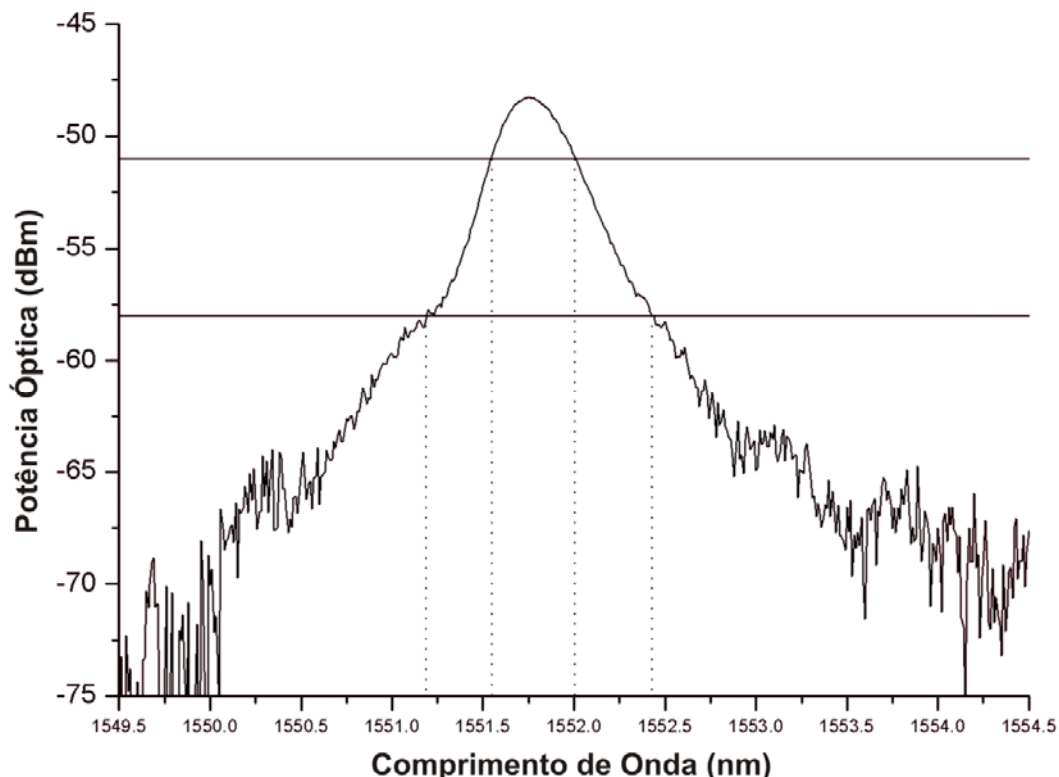


Figura 22 - Espectro do Filtro Óptico Passa-Faixa

Os parâmetros para a realização das medidas foram os seguintes:

- Potência do ruído injetado por EDFA 1: -39.2 dBm, -35.7 dBm e -33.5 dBm.
- Tamanho dos pacotes UDP: 396 Bytes, 584 Bytes, 960 Bytes e 1336 Bytes.

Para obtenção das medidas foi utilizado o seguinte procedimento: Primeiro era ajustado no amplificador EDFA 1 a potência de ruído desejada. Depois com o atenuador VOA regulado para 0 dB de atenuação ajustava-se o amplificador EDFA 2 de modo que a potência exibida no medidor de potência óptica PoM fosse igual a -18 dBm. O amplificador EDFA 2 foi utilizado para que as comparações entre os tamanhos diferentes de pacotes pudesse ser feita sempre com a mesma potência de recepção. Uma vez estabelecida essa configuração os testes eram iniciados. Para cada nova captura de pacotes a atenuação era acrescida em 0.2 dB. Esse procedimento era repetido até que a PER medida ultrapassasse o limite de 6%.

5.2 Resultados

Esta seção apresentará resultados complementares aos apresentados no capítulo anterior. Estes resultados foram obtidos através da emulação da transmissão de um sinal de vídeo por uma rede óptica.

A Figura 23 mostra o desempenho da PER para pacotes com tamanhos de: 336 Bytes, 584 Bytes, 960 Bytes e 1336 Bytes. O desempenho desses pacotes foi analisado para três situações distintas. Em cada situação a potência de ruído era diferente. As potências de ruído utilizadas foram de: -33.6 dBm, -35.7 dBm e -39.1 dBm.

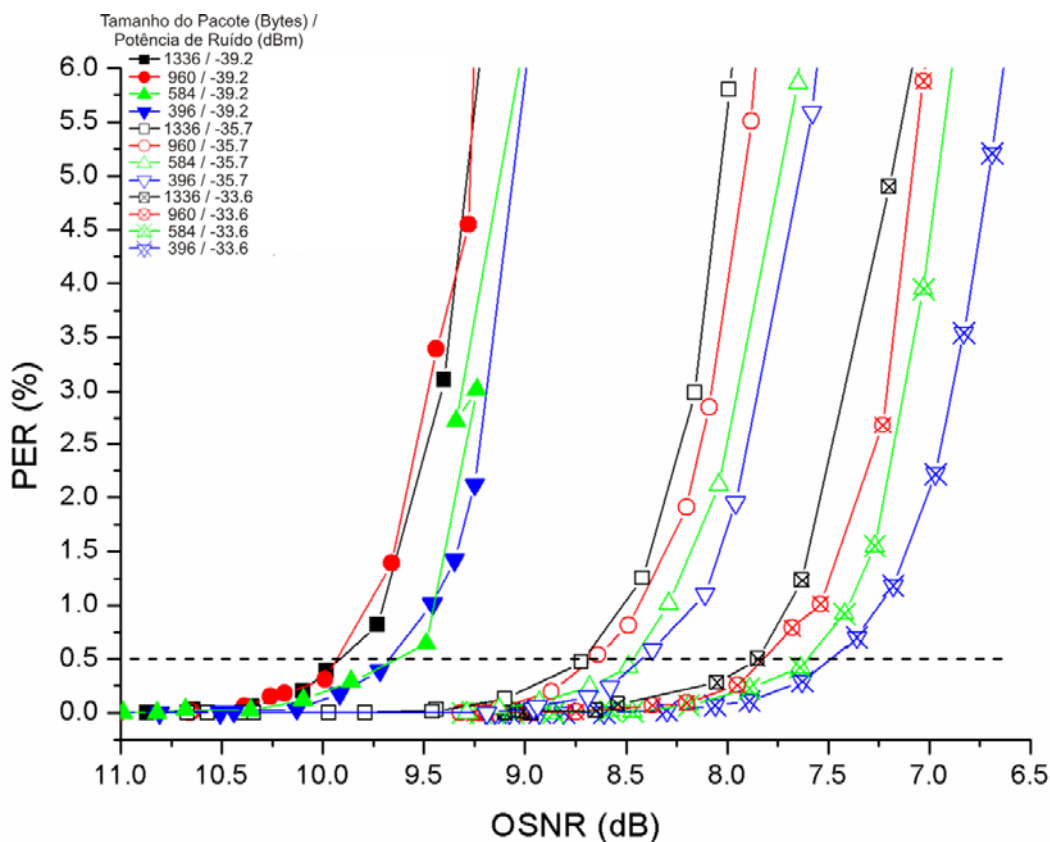


Figura 23 - Desempenho da PER para Diferentes Tamanhos de Pacotes

Na Figura 23 está claro o fato de que a transmissão utilizando um tamanho de pacote menor apresenta melhor desempenho. Uma possível explicação para esta diferença no desempenho se deve ao fato de que para uma mesma PER quanto menor

for o pacote menor será a chance de esse pacote conter um bit errado. Como os pacotes que contém pelo menos um bit errado são desconsiderados é possível afirmar que pacotes maiores terão um pior desempenho.

Uma questão importante que deve ser levantada, é que alguns trabalhos que estudaram o desempenho de redes consideraram apenas a relação sinal-ruído (Pereira, Chaves *et al.*, 2008). Porém os resultados apresentados neste capítulo indicam que além da relação sinal-ruído também deve ser levado em consideração a potência do sinal, uma vez que, para uma mesma relação sinal-ruído é possível obter PERs diferentes.

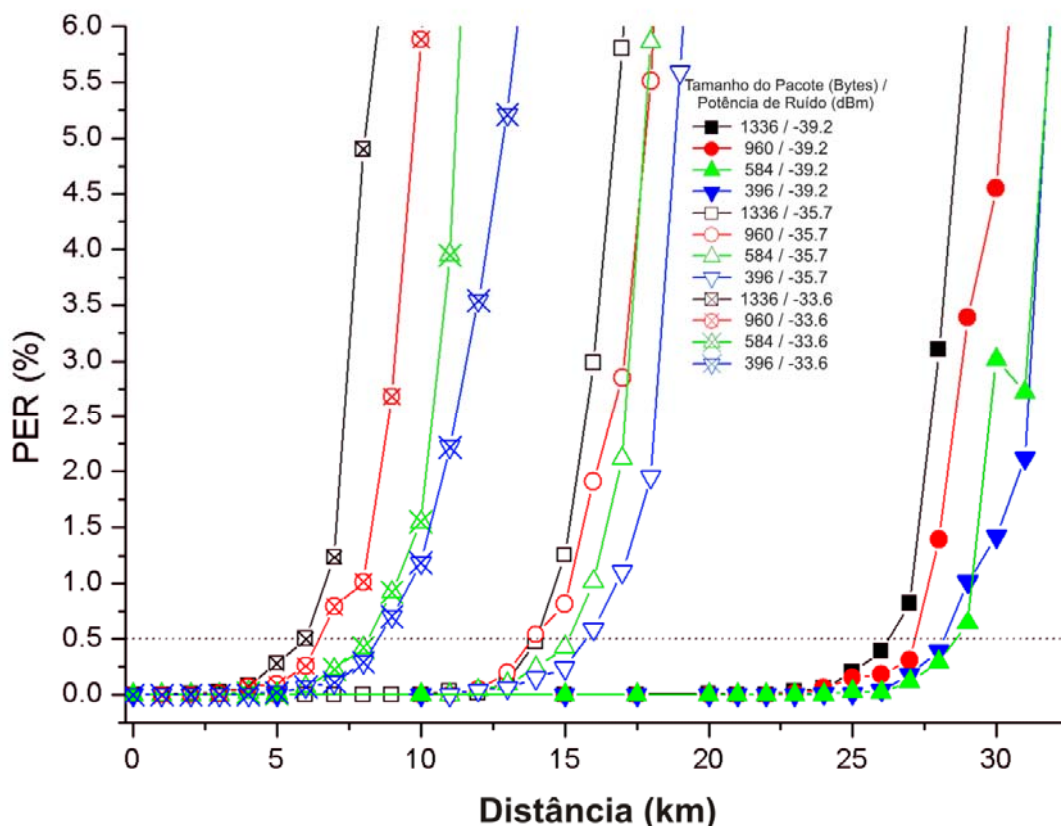


Figura 24 - PER x Distância para Pacotes com Tamanhos Diferentes

A Figura 24 apresenta um gráfico de PER em função da distância estimada de propagação. Uma vez que foi considerado para os testes que a dispersão nos enlaces estaria compensada e os demais fenômenos não-lineares são desprezíveis, o único fenômeno que influenciaria a transmissão seria a atenuação. Considerando uma atenuação de 0,2 dB/km foi possível estimar as distâncias apresentadas na Figura 24.

Da mesma maneira que o gráfico apresentado na figura anterior, este gráfico traz o desempenho de PER para a transmissão de sinais de vídeo utilizando pacotes de tamanhos diferentes em situações cujo ruído inicial da transmissão foi variado. A Figura 24 exibe de maneira mais clara o alcance máximo que uma transmissão de vídeo terá em função da potência de ruído inicial. Admitindo um cenário hipotético, no qual as curvas para o caso de uma potência de ruído de -33.6 dBm, apresentadas no gráfico, fossem obtidas em um nó intermediário da TON, a interferência do ruído é tão acentuada que o sinal não poderia ser transmitido por uma distância superior a 7 km.

Para encerrar as análises deste capítulo, a Figura 25 apresenta os espectros analisados para os três níveis iniciais de ruído injetado pelo amplificador EDFA 2, do arranjo experimental exibido pela Figura 21 da Seção 5.1. Os espectros apresentados nas Figuras 25 são para uma potência de ruído de (a) -39,1 dBm, (b) -35,7 dBm (c) -33,6 dBm. Para as três figuras o tamanho do pacote utilizado foi de 960 Bytes. Cada uma das figuras mostra três espectros sobrepostos. Esses espectros foram tirados para três situações diferentes durante o teste. A primeira para uma PER = 0%. A segunda para uma situação em que começavam a ser vistos glitches na transmissão de vídeo, isto é, para uma PER entre 0.1% e 0.4%. E o último espectro para a situação em que não havia mais transmissão de vídeo, com uma PER superior ao limite máximo de 6%, para uma situação na qual a transmissão era perdida por completo. As três figuras exibem com clareza a degradação da relação sinal-ruído imposta pelo aumento da potência do ruído.

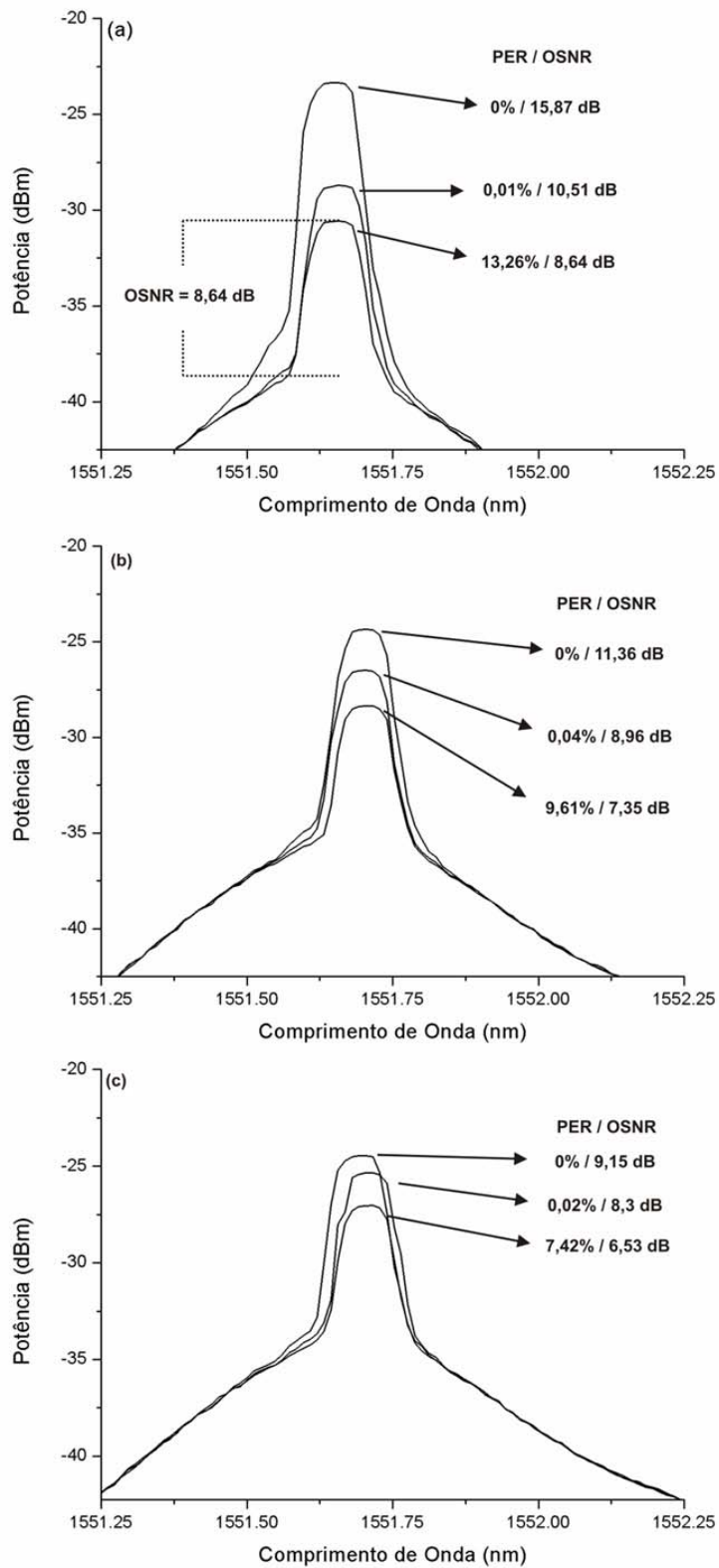


Figura 25- Espectros: Pacotes com Tamanho de 960 Bytes para Nível de Ruído de (a) -39.1 dBm, (b) -35.7 dBm, (c) -33.6 dBm.

A razão sinal-ruído óptica foi medida dividindo-se a potência de pico do sinal pela potência de pico do ruído, conforme indicado na Figura 25 (a) (para uma OSNR de 8,64 dB). Também foram realizadas algumas medidas sem o filtro óptico seguindo este mesmo procedimento para estimar a OSNR. No entanto, neste caso, as medidas de PER foram muito superiores às mostradas nas Figuras 23, 24, 25. Isso sugere que a relação entre PER e a OSNR depende da largura de banda do filtro óptico utilizado. Portanto, os resultados apresentados neste trabalho são válidos apenas para o filtro cuja função de transferência é apresentada no Capítulo 4. Um estudo mais profundo sobre este assunto será investigada em uma ocasião futura.

5.3 Curvas de Ajuste para os Resultados Experimentais

A partir dos resultados experimentais obtidos com os experimentos apresentados neste capítulo e no capítulo anterior, foram geradas curvas de ajuste que pudessem descrever o comportamento da degradação da PER em função da relação sinal-ruído. A importância destas curvas reside no fato de que elas podem servir como fonte de informação para o algoritmo de roteamento da TON. De posse de informações como a relação sinal-ruído o algoritmo pode estimar a degradação da PER para uma determinada rota, atribuindo, por exemplo, uma rota mais curta a uma transmissão com uma PER mais degradada e deixando uma rota mais longa para sinais com PERs menos degradadas.

A função que melhor descreveu esse comportamento foi a função exponencial, com forma:

$$PER_{x,y} = c_1 + c_2 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-c_3)}{c_4}} \quad (11)$$

na qual x é o tamanho do pacote medido em bytes, y é potência do ruído medida em dBm, $OSNR_{dB}$ é a razão sinal-ruído medida em dB e os parâmetros c_1 , c_2 , c_3 , e c_4 são os parâmetros de ajuste que precisam ser determinados para cada curva.

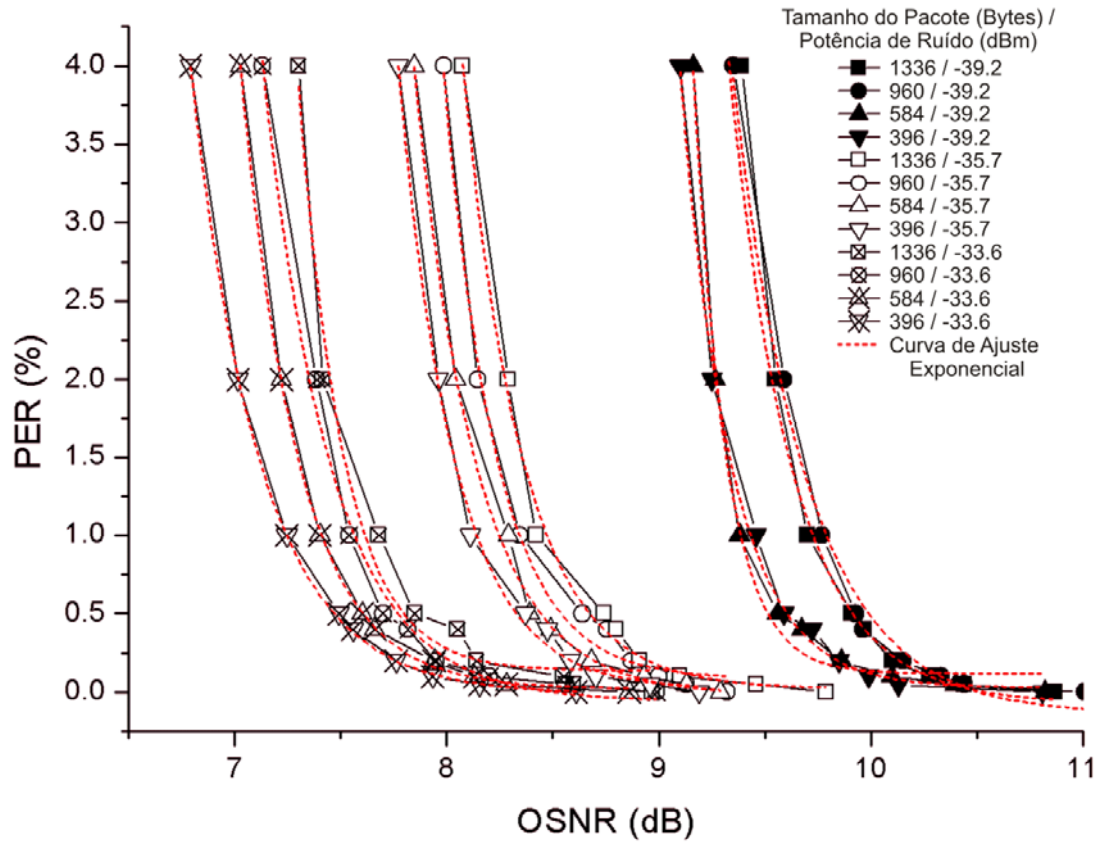


Figura 26 - Curvas de Ajuste Exponencial para os Resultados Experimentais

A Figura 26 apresenta as curvas de ajuste exponencial para os resultados experimentais obtidos no experimento deste capítulo. As equações para as curvas de ajuste exponencial apresentadas na figura anterior estão indicadas abaixo.

$$PER_{1336,-39,2} = -0.06 + 4.12 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-9.32)}{0.29}} \quad (12a)$$

$$PER_{960,-39,2} = -0.14 + 4.06 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-9.35)}{0.35}} \quad (12b)$$

$$PER_{584,-39,2} = 0.11 + 4.10 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-9.15)}{0.15}} \quad (12c)$$

$$PER_{396,-39,2} = 0.02 + 4 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-9.09)}{0.23}} \quad (12d)$$

$$PER_{1336,-35,7} = 0.02 + 4.04 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-8.07)}{0.28}} \quad (12e)$$

$$PER_{960,-35,7} = 0.08 + 4.02 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-7.97)}{0.25}} \quad (12f)$$

$$PER_{584,-35,7} = -0.01 + 4.08 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-7.84)}{0.29}} \quad (12g)$$

$$PER_{396,-35,7} = 0.02 + 4.04 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-7.76)}{0.26}} \quad (12h)$$

$$PER_{1336,-33,6} = -0.13 + 3.95 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-7.28)}{0.21}} \quad (12i)$$

$$PER_{960,-33,6} = -0.05 + 4.08 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-7.13)}{0.32}} \quad (12j)$$

$$PER_{584,-33,6} = 0.02 + 4.09 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-7.01)}{0.27}} \quad (12k)$$

$$PER_{396,-33,6} = -0.09 + 4.07 e^{\frac{-(OSNR_{dB}-6.78)}{0.33}} \quad (12l),$$

As curvas de ajuste apresentadas acima possuem um coeficiente de determinação R^2 de no mínimo 0.97. O fato de a dependência entre a PER e a $OSNR_{dB}$ ser aproximadamente exponencial, basta para manter $OSNR_{dB}$ suficientemente maior que c_3 . No entanto, à medida que $OSNR_{dB}$ se aproxima de c_3 , a PER começará a aumentar rapidamente. Por esta razão, um sistema de transmissão de vídeo por redes ópticas deve operar na condição de $OSNR_{dB} \gg c_3$, para evitar que pequenas variações de potência façam com que a PER varie subitamente de valores aceitáveis para valores que impeçam a visualização do vídeo.

5.4 Conclusão

Uma contribuição deste trabalho é a determinação quantitativa da degradação da PER em função da diminuição da relação sinal-ruído. Não foi encontrada nenhuma referência na literatura de qualquer trabalho que fizesse uma caracterização desta maneira.

Como foi mencionado anteriormente, um determinado sistema de roteamento de uma TON pode utilizar essa informação para aumentar a eficiência da rede. Baseado nas curvas de ajuste apresentadas na seção anterior, o sistema pode atribuir um custo diferente a uma determinada rota. No momento em que uma transmissão adentrasse a TON, baseando-se na PER e na potência de sinal esperadas no receptor, a gerência da TON poderia estimar qual a melhor rota para essa conexão. Utilizando as curvas de ajuste apresentadas no capítulo anterior (caso em que há conversão de comprimento de onda), se um determinado recurso não está disponível em um enlace, o algoritmo de roteamento pode decidir também se é melhor efetuar uma conversão de comprimentos de onda (considerando a degradação imposta por este processo) ou trafegar a conexão por uma rota mais longa.

É importante destacar o fato de que o experimento apresentado neste capítulo originalmente foi concebido como um teste complementar ao experimento apresentado no capítulo anterior. Existem ainda muitas perspectivas para continuidade para este trabalho.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas de Continuidade.

Neste trabalho foi avaliado experimentalmente como impedimentos da camada física das redes ópticas afetam o desempenho de sinais de vídeo. Em especial, foi observada que a degradação da PER estava relacionada com a diminuição da relação sinal-ruído. A utilização da PER como métrica de avaliação de desempenho permitiu uma quantificação do efeito de *cross-layer* em rede ópticas servindo aplicações IP.

A partir dos resultados experimentais apresentados no Capítulo 4, foi possível concluir que o desempenho dos sinais convertidos depende da degradação da OSNR introduzida pelo AOWC. Sinais separados de até 1,5 THz do sinal original sofrem uma penalidade média de potência de 2,1 dB e uma penalidade máxima de potência de 2,5 dB. Assumindo uma atenuação de 0,2 dB/km cada conversão no comprimento de onda do sinal irá reduzir o alcance da transmissão em aproximadamente 10 km. Outra informação importante obtida no experimento de conversão de comprimentos de onda é de que o conversor introduz uma penalidade ao sistema de 16 dB. Essa penalidade indica que a conversão de comprimentos de onda se torna aceitável para os casos nos quais o sinal não convertido tiver que trafegar por distâncias superiores a 80 km.

Outra conclusão importante que pode ser obtida através dos testes realizados no Capítulo 5 é que apenas a utilização da relação sinal ruído como parâmetro de qualidade em uma transmissão não é suficiente. Através dos resultados experimentais foi possível observar diferentes valores de PER para uma mesma OSNR. Os resultados sugerem que os algoritmos de roteamento levem em consideração, além da relação sinal-ruído óptica, a potência de sinal transmitido. Estes resultados podem contribuir positivamente para a maximização da eficiência das TONs. Um algoritmo de roteamento pode se basear, por exemplo, na potência e na relação sinal-ruído para estimar a PER e assim selecionar a melhor rota para transmitir o fluxo de dados de um cliente da rede óptica.

Como perspectiva de continuidade deste trabalho é possível sugerir um experimento utilizando o arranjo experimental apresentado no Capítulo 4 que busque associar a degradação do sinal de vídeo na camada de aplicação, analisando o desempenho de diferentes tipos de codificações de vídeo. Outro trabalho que pode contribuir positivamente para os resultados aqui apresentados é a investigação da relação da PER e da OSNR com largura de banda do filtro passa-faixa utilizado (Figura 22, Seção 5.1 do Capítulo 5). Pode-se sugerir ainda que este mesmo estudo seja realizado para outros tipos de conversores de comprimentos de onda, por exemplo, conversores paramétricos.

Referências

Abbade, M. L. F., J. D. Marconi, *et al.* Field Trial Evaluation of Cross-Layer Effect Caused by All-Optical Wavelength Converters on IP Network Applications. Journal of Lightwave Technology, v.27, n.12, June 15, p.1816-1826. 2009.

Agrawal, G. Nonlinear Fiber Optics. New York. 2001

Ali, M. T., L. Impact of polarization-mode dispersion on the design of wavelength-routed networks. Photonics Technology Letters, IEEE, v.14, n.5, August 7,, p.1041 - 1135. 2002.

Boggio, J. M. C., J. D. Marconi, *et al.* Method for measuring high order dispersion in optical fibers. Optical Communications Conference. Anaheim, USA 2007.

Chu, X. e B. Li. Dynamic Routing and Wavelength Assignment in the Presence of Wavelength Conversion for All-Optical Networks. Networking, IEEE/ACM Transactions on, v.13, n.3, p.11. 2005.

Deng, T. S., S. Source power management in transparent wavelength-routed mesh networks. Communications, 2004 IEEE International Conference on, v.3, September 26,, p.1664-1668. 2004.

Fonseca, I. E., R. C. J. Almeida, *et al.* Meeting optical QoS requirements with reduced complexity in dynamic wavelength assignment. Broadband Networks, 2004. BroadNets 2004. Proceedings. First International Conference on, December 13,, p.331-333. 2004.

Freeman, R. L. Telecommunication System Engineering. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience. 2004. 1024 p.

Geraldcombs, Guyharris, *et al.* WireShark 2007.

Ietf. RFC 1889 1996.

Kulkarni, P. T., A. Machuka, C.M. Tomkos, I. Benefits of Q-factor based routing in WDM metro networks. Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on, v.4, September 29,, p.981-982. 2005.

Marconi, J. D., J. M. C. Boggio, *et al.* Narrow linewidth fibre-optical wavelength converter with strain suppression of SBS. ELECTRONICS LETTERS, v.40, p.1213-1214. 2004.

Marconi, J. D., F. A. Callegari, *et al.* Field-trial evaluation of the Q-factor penalty introduced by fiber four-wave mixing wavelength converters. Optics Communications, v.282, n.1, p.106-116. 2009.

Marcuse, D. Derivation of analytical expressions for the bit-error probability in lightwave systems with optical amplifiers. Journal of Lightwave Technology, v.8, n.12, p.1816-1823. 1990.

Mukherjee, B. Optical WDM Networks. New York: Springer. 2006 (Optical Network Series)

Pereira, H. A., D. A. R. Chaves, *et al.* OSNR model to consider physical layer impairments in transparent optical networks. Photonic Network Communications, v.18, p.12. 2008.

Peterson, L. L. e B. S. Davie, Eds. Computer Networks: A Systems Approach. San Francisco: Morgan Kaufmann, 3 ed. 2003.

Ramaswami, R. Optical Networks: A Practical Perspective. New York: Morgan Kaufmann. 2001. 864 p. (The Morgan Kaufmann Series in Networking)

Shibata, N., R. Braun, *et al.* Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber. IEEE Journal of Quantum Electronics, v.23, n.7, p.1205-1210. 1987.

Simões, F. D., M. L. Rocha, *et al.* Q-Factor Penalty Evaluation in a Cascade of All-Optical Nodes Using a Re-Circulating Loop. Microwave and Optoelectronics Conference, 2003. IMOC 2003. Foz do Iguaçu, Brasil, 2003. PD24 p.

Soares, L. F. G., G. Lemos, *et al.*, Eds. Redes De Computadores Das Lans, Mans E Wans As Redes Atm. Rio de Janeiro, Brasil: Campus, 2ª Ed ed. 1995.

Song, S., C. Allen, *et al.* Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers. Journal of Lightwave Technology, v.17, n.11, Nov. 1999, p.2285-2290. 1999.

Srivastava, V. e M. Motani. Cross - Layer Design: A Survey and the Road Ahead. IEEE Communication Magazine, v.43, n.12, December, 2005, p.112-119. 2005.

Subramaniam, S. e K. Silvalingam, Eds. Emerging Optical Network Technologies Architectures, Protocols And Performance. New Yorked. 2004.

Tanenbaum, A. S. Computer Networks. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 2002

Www.Videolan.Org. VLC Media Player 2007.