

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE  
CAMPINAS**

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

**MATEUS ZEGRINI NASSAR GARCIA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE  
VoIP EM REDES ÓPTICAS**

**CAMPINAS**

**2011**

**MATEUS ZEGRINI NASSAR GARCIA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE  
VoIP EM REDES ÓPTICAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

**CAMPINAS**

**2011**

Ficha Catalográfica  
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e  
Informação - SBI - PUC-Campinas – Processos Técnicos

t621.3827 Garcia, Mateus Zegrini Nassar.  
G216a Análise experimental do desempenho de VoIP em redes ópticas /  
Mateus Zegrini Nassar Garcia . - Campinas: PUC-Campinas, 2011.  
75p.

Orientador: Marcelo Luís 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. Comunicações óticas. 2. Telefonia pela Internet. 3. Sistemas  
de telecomunicação. 4. Função de transferência ótica. I. Abbade,  
Marcelo Luís Francisco. II. Pontifícia Universidade Católica de Campi-  
nas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

22.ed. CDD – t621.3827

**Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
Centro de Ciências da Vida  
Programa de Pós-Graduação**

**BANCA EXAMINADORA**

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

---

1º Examinador Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani do Nascimento (Universidade Federal do ABC)

---

2º Examinador Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho (PUC-Campinas)

---

Campinas, 17 de junho de 2011

Dedico aos meus pais, irmãos e esposa.

Agradeço à Trópico, empresa onde trabalho, pelo apoio financeiro. Agradeço ao Prof. Dr. Hugo L. Fragnito e ao Sr. Vagner V. Cardoso, ambos do Laboratório de Comunicações Ópticas da Unicamp, por disponibilizar equipamentos para a montagem dos experimentos realizados neste trabalho. Agradeço à Empirix, por disponibilizar uma licença do Hammer Call Analyzer, utilizado na avaliação dos resultados. Agradeço ao bolsista do CNPq, da Área de Fotônica do Laboratório de Meios de Transmissão da PUC-Campinas, Rafael Martins Pisa, pelo auxílio na montagem do experimento e dos testes realizados.

Em especial, agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade, pela dedicação, incentivos e orientações no decorrer do trabalho.

*“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez.”*

Jean Cocteau

## RESUMO

Garcia, Mateus Zegrini Nassar. Análise Experimental do Desempenho de VoIP em Redes Ópticas. Dissertação de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas 2011.

O objetivo desse trabalho foi avaliar experimentalmente um fluxo de voz sobre IP (*Voice Over IP*, VoIP) em redes opacas e redes ópticas transparentes. Para isso, foi montando um arranjo experimental emulando os dois tipos de redes. Em especial, nas redes opacas o arranjo experimental emulou perda de pacotes e variação do atraso e, nas redes ópticas transparentes, foi emulada a variação da relação sinal-ruído óptica (*Optical Signal-to-Noise Ratio*, OSNR). O fluxo de VoIP foi gerado pelos codecs G.711 e G.729, e a avaliação do desempenho desses codecs nas redes emuladas foi feita em termos do Fator R, que é uma ferramenta computacional desenvolvida pelo ITU-T e descrita pelo Modelo E. Os resultados experimentais permitiram concluir que, em geral, o codec G.711 possui um desempenho melhor do que o codec G.729 nas redes opacas. No entanto, nas redes ópticas transparentes o desempenho do codec G.729 foi melhor. Além disso, os resultados para as redes ópticas transparentes sugeriram que o desempenho do sistema depende não apenas da OSNR, mas também do valor absoluto da potência do sinal e ruído. Os resultados também mostraram que OSNRs superiores a 14 dB mantiveram o fator R em seu máximo.

**Termos de Indexação:** Qualidade de Serviço, Redes Ópticas, Taxa de Erro de Pacotes, Modelo E, Razão sinal-ruído óptica.



## ABSTRACT

Garcia, Mateus Zegrini Nassar. *Experimental Analysis of Performance of VoIP in Optical Networks*. 2011. *Dissertation (Master Degree in Management of Telecommunication's Network)*. Pontifícia Universidade Católica de Campinas – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas 2011.

*The aim of this study was to evaluate experimentally a voice over IP (VoIP) streaming in opaque and all-optical networks. For this, we prepared an experimental setup to emulate the two types of networks. In particular, the experimental arrangement for opaque networks emulated packet loss and jitter; for all-optical networks the variation of the optical signal-to-noise ratio (OSNR) was emulated. The VoIP flow was generated by the G.711 and G.729 codecs, and the performance of these codecs in the emulated network was rated in terms of the R Factor, which is a computational tool developed by ITU-T and described by the Model E. The experimental results showed that G.711 codec has a better performance than the G.729 codec in opaque networks. On the other hand, the performance of G.729 was better in all-optical networks. Moreover, results for all-optical networks suggested that system performance depends not only on the OSNR, but also on the absolute value of the signal power. Results also showed that OSNRs higher than 14 dB did kept the factor R at its maximum.*

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de codificadores .....	26
Tabela 2 - Escala MOS .....	36
Tabela 3 - Conversão de Fator R para MOS.....	37
Tabela 4 - Tamanho do <i>Payload</i> .....	68

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sinal analógico.....	23
Figura 2 - Sinal Amostrado.....	23
Figura 3 - Quantização das amostras .....	24
Figura 4 - Amostras Codificadas .....	25
Figura 5 - Seqüência de bits .....	25
Figura 6 - Cabeçalho UDP .....	28
Figura 7 - Estudo de caso sobre portas .....	28
Figura 8 - Cabeçalho TCP .....	30
Figura 9 - Cabeçalho RTP .....	31
Figura 10 - Filas com Prioridades .....	40
Figura 11 - Desordenamento dos Pacotes.....	40
Figura 12 - Buffer para a retirada de jitter .....	41
Figura 13 - Atenuação na Fibra.....	43
Figura 14 - Cascata de Amplificadores .....	47
Figura 15 - Rede TON.....	49
Figura 16 - Nó óptico.....	50
Figura 17 - Arranjo experimental.....	51
Figura 18 - Emulação de rede opaca .....	52
Figura 19 - Emulação de TON .....	52
Figura 20 - Arranjo experimental detalhado .....	54
Figura 21 - Relação entre PLR e Fator R.....	55
Figura 22 – <i>Buffer</i> para retirada de <i>jitter</i> programado em 20 ms.....	56
Figura 23 - <i>Buffer</i> para retirada de <i>jitter</i> programado em 30 ms .....	57
Figura 24 - Espectro do Ruído .....	58
Figura 25 - Espectro com OSNR de 14 dB .....	59
Figura 26 - Espectro com OSNR de 8 dB .....	59
Figura 27 - Curvas com -34 dBm, -35.4 dBm e -39 dBm de ruído .....	60
Figura 28 - Influencia da relação sinal ruído elétrica.....	61
Figura 29 - Curvas com -22,2 dBm, -26 dBm e -31,6 dBm de ruído. ....	62
Figura 30 - Relação de Fator R com OSNR.....	63
Figura 31 - Relação de Fator R com OSNR.....	64
Figura 32 - Relação entre PLR e PER para o codec G.729.....	65

Figura 33 - Relação entre PLR e PER para o codec G.711 .....	65
Figura 34 - Relação entre PER e <i>Jitter</i> para o codec G.729 .....	66
Figura 35 - Relação entre PER e <i>Jitter</i> para o codec G.711 .....	66
Figura 36 - Comparação dos codecs G.711 e G.729 em TON's .....	67
Figura 37 - Eficiência de Rede .....	68

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1 Núcleo das Redes de Telecomunicações .....	14
1.2 Redes Ópticas Transparentes .....	15
1.3 Motivação .....	17
1.4 Objetivos .....	19
1.5 Trabalhos relacionados .....	19
1.6 Contribuições do Trabalho .....	20
1.7 Organização da Dissertação .....	21
2 VOZ SOBRE IP .....	22
2.1 Digitalização de sinais analógicos .....	22
2.2 Codec's para VoIP .....	25
2.3 Requisitos da camada de transporte para VoIP .....	27
3 QUALIDADE DE SERVIÇO EM VoIP .....	33
3.1 Mecanismos de QoS .....	33
3.2 Medidas da Qualidade da Voz .....	35
4 REDES ÓPTICAS .....	39
4.1 Redes Ópticas Opacas .....	39
4.2 Redes Ópticas Transparentes .....	47
5 DESCRIÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL .....	51
6 RESULTADOS .....	55
6.1 Redes Opacas .....	55
6.2 Redes Ópticas Transparentes .....	58
7 CONCLUSÕES .....	70
8 REFERÊNCIAS .....	72

## 1 INTRODUÇÃO

O número de usuários com conexão à Internet tem crescido rapidamente no Brasil e no mundo nos últimos anos. Segundo uma pesquisa do Ibope [Ibope, 2011], no último trimestre de 2010 havia cerca de 73,9 milhões de brasileiros conectados à Rede. Esse número é 9,6% superior ao constatado no mesmo período em 2009. Outro fato relevante é o aumento das conexões de Banda Larga, que em 2010 apresentou um crescimento de 71% [Telebrasil, 2011].

O crescimento da Internet e principalmente o aumento das taxas de dados disponibilizadas aos usuários impulsionam a utilização de aplicações com requisitos específicos de atrasos e taxas de dados. Um exemplo desses tipos de aplicações é o transporte de voz sobre a rede IP, chamado de voz sobre IP (*Voice Over IP*, VoIP).

Atualmente há uma enorme quantidade de aplicativos de VoIP disponíveis no mercado. Esses aplicativos permitem que usuários conectados à rede IP possam estabelecer chamadas telefônicas a um custo muito baixo ou até mesmo sem custo algum. Ainda sem nenhum custo, é possível adicionar vídeo a uma chamada e usufruir de facilidades como conferências, chamadas em espera, chamadas de Fax e Modem, *voicemail*, e redirecionamento de chamadas, [Karapantazis, Pavlidou, 2009], [Sat, Wah, 2009]. Dessa forma, VoIP tem revolucionado o mercado de telefonia e, segundo estimativas, empresas de voz sobre IP já tomaram 15% do mercado de voz das operadoras tradicionais, e continuam com ótimas perspectivas de crescimento, [Folha de S. Paulo, 2011]. Visando não perder mercado e com o objetivo de acompanhar a evolução tecnológica, as operadoras tradicionais também estão migrando suas redes de telefonia para VoIP.

### 1.1 Núcleo das Redes de Telecomunicações

Para atender a demanda por crescimento da Internet, considerando também as altas taxas disponibilizadas aos usuários, as operadoras precisam de uma infraestrutura de rede bem robusta. Essa infra-estrutura é conhecida como núcleo da rede. Em geral, o núcleo dessas redes é formado por vários nós interconectados por fibras ópticas. Esses nós são constituídos por *switches*, roteadores e

equipamentos ópticos de transmissão e recepção. Todo o processo de roteamento, inserção e retirada de dados é feito eletronicamente e, devido a isso, o sinal óptico que percorre a fibra deve ser convertido para elétrico em todos os nós da topologia.

A presença de roteadores eletrônicos no núcleo das redes pode afetar negativamente um fluxo de dados. Em determinadas condições, como no caso de congestionamentos, roteadores podem deixar pacotes em uma fila (*buffer*), enquanto tratam do encaminhamento de outros pacotes com prioridade maior. Isso pode fazer com que pacotes de um mesmo fluxo cheguem ao destino com variação de atraso. Em situações mais extremas, quando as filas lógicas estiverem com excesso de ocupação, os roteadores podem descartar determinados pacotes [Kurose, Ross, 2003]. Essas duas características podem individualmente, ou combinadas, degradar um fluxo de voz que trafega por essa rede.

Além disso, a tecnologia de processamento de dados disponível não permite que os equipamentos eletrônicos explorem de maneira eficiente a capacidade de banda oferecida pela rede óptica, mesmo quando os sistemas por multiplexação em divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*) são utilizados, [Mukherjee, 2006]. Esses fatores, aliados ao elevado custo desses equipamentos, em especial os conversores elétrico-ópticos e óptico-elétricos, e também à energia necessária para seu funcionamento, são uma barreira para a evolução da infra-estrutura das operadoras, [Pinart, 2008], [Baliga, Ayre *et al.*, 2009].

## **1.2 Redes Ópticas Transparentes**

Uma alternativa para solucionar esses problemas é manter o sinal no domínio óptico em toda a rede. Quando isso é feito, a rede em questão é chamada de rede totalmente óptica (*All-Optical Network, AON*) ou rede óptica transparente (*Transparent Optical Network, TON*). Neste tipo de rede, o roteamento, a inserção e a retirada de dados são realizados no domínio óptico, [Ramaswami, 2010].

Existem três maneiras principais para se implementar uma TON. Na primeira delas, ao receber um pedido de transmissão de dados entre 2 clientes, a gerência

da TON estabelece uma rota entre o nó de origem e o nó de destino, estipulando qual ou quais comprimentos de onda serão utilizados em cada enlace da rota. Como na maioria dos casos atuais as TONs não dispõem de dispositivos conversores de comprimento de onda, o usual é que o mesmo comprimento de onda seja utilizado ao longo de toda a rota. Nesta situação, os recursos alocados (fibras e comprimentos de onda de cada enlace) ficam permanentemente reservados para os usuários em questão, como ocorre no estabelecimento de uma conexão em uma comutação por circuitos. Tipicamente, cada conexão pode durar vários meses. O conjunto de todas as fibras e comprimentos de onda utilizados na conexão é chamado na literatura de caminho óptico (*lightpath*). Este primeiro tipo de TONs é chamado de redes com roteamento de comprimento de onda (*Wavelength Routing Networks, WRNs*), [Ramaswami, 2010].

A despeito de sua simplicidade, as WRNs possuem uma granularidade muito baixa. Uma maneira de resolver este problema seria a implementação de redes com comutação de pacotes ópticos (*Optical Packet Switching Networks, OPSNs*), [Bonani, Padua, *et al.*, 2004]. Neste tipo de rede, que constitui a segunda abordagem de TONs discutida neste trabalho, não há o estabelecimento de uma conexão entre os nós de origem e destino. Quando um cliente quer enviar dados para outro, ele simplesmente transmite pacotes de dados no domínio óptico para a OPSN. Os nós desta rede devem ser capazes de identificar o endereço de destino do pacote e encaminhá-lo para um próximo nó até que o destino seja atingido. Apesar de reproduzir a estratégia utilizada nas redes ópticas com roteamento eletrônico e de haver várias propostas para sua implementação, as OPSNs sofrem, ao menos, dois grandes problemas, [Blumenthal, Olsson *et al.*, 2000]. Primeiramente, a ausência de tecnologias eficazes para provimento de memórias ópticas dificulta o processo de armazenamento de pacotes nos nós das redes. O segundo problema é que as OPSNs estariam sujeitas a variações dinâmicas de tráfego. Como o ganho dos amplificadores ópticos depende do número de canais em utilização, estas variações causariam flutuações repentinas no ganho de cada canal WDM e isso afetaria a qualidade dos sinais que trafegam pelas OPSNs, [Oliveira, 2007], [Zang, Jue, *et al.*, 2001].

A terceira estratégia principal para se implementar uma TON consiste em utilizar uma abordagem intermediária entre as WRNs e as OPSNs, chamada de rede



com comutação de rajadas ópticas (*Optical Burst Switching Networks*, OBSNs), [Wong, Baliga, *et al.*, 2009]. Neste caso, a gerência de redes aguarda por um certo período, em um certo nó de ingresso, a chegada de pacotes que tenham um mesmo nó e, possivelmente, uma mesma classe de serviço de destino. Estes pacotes são, então, agregados em uma rajada que segue por uma conexão até o nó de egresso da OBSN. Quando a rajada atinge o nó de egresso, a conexão é desfeita. Esta abordagem elimina a necessidade de memória óptica em nós intermediários, mas ainda é afetada pelas flutuações de ganho nos amplificadores.

Devido aos problemas supra-citados, o único tipo de TON que opera e que vem sendo cada vez mais utilizado nos dias atuais é a WRN, [Ramaswami, 2010]. Por esta razão, as WRNs são o único tipo de TON considerado nesta dissertação e, de agora em diante, o termo TON será utilizado como sinônimo de WRN.

As vantagens citadas acima vêm motivando um número cada vez maior de operadoras a utilizar TONs em seu núcleo. Por um lado, esta utilização elimina os problemas de descarte e desordenamento de pacotes. Por outro, os sinais que trafegam pelas TONs estão mais sujeitos a ação degenerativa de impedimentos físicos como a inclusão de ruído, a dispersão e as não-linearidades que ocorrem no domínio óptico, [Mukherjee, 2006]. Isto ocorre porque a regeneração eletrônica feita em cada nó na abordagem de redes com comutação eletrônica deixa de ocorrer. De fato, existem várias pesquisas para a implantação de regeneradores totalmente ópticos, mas, até o momento, estes dispositivos ainda não são comerciais.

### **1.3 Motivação**

Neste cenário de migração de redes com comutação eletrônica, também chamadas de redes opacas, para redes ópticas transparentes, torna-se imprescindível avaliar como a qualidade de serviço (*Quality of Service*, QoS) é afetada pelas TONs [Pinart, 2008]. De fato, esta avaliação deve ser feita para cada serviço, pois cada um possui seus próprios requisitos de qualidade.

A principal métrica de QoS utilizada em redes ópticas é a monitoração da taxa de erro de bits (*Bit Error Rate*, BER), [Pinart, 2008]. Para isso é necessário acessar a

seqüência de bits transmitida, que só pode ser obtida convertendo-se o sinal óptico para elétrico. No entanto, em redes TON o sinal é elétrico apenas na origem e no destino final, permanecendo no meio óptico em todos os nós intermediários da rede, inviabilizando monitorações de BER nesses nós.

Nos nós intermediários das TON's só é possível obter medidas relacionadas a sinais ópticos. Neste contexto, a relação sinal ruído óptica (*Optical Signal-to-Noise Rate*, OSNR) mostra-se uma métrica bastante atrativa, pois ela pode ser avaliada de maneira não-intrusiva nestes nós, [Pinart, 2007], [Pinart, 2008]. De fato, medidas da OSNR podem ser feitas utilizando-se um *splitter* óptico que deixe a maior parte do sinal prosseguir por sua rota na rede e que derive uma pequena porcentagem deste sinal para algum equipamento capaz de monitorar os níveis de potência de sinal e de ruído, como um analisador de espectro óptico (*Optical Spectrum Analyzer*, OSA).

Uma boa estratégia para avaliar a QoS nessas redes é relacionar a OSNR com algum parâmetro chave que indique a qualidade de serviço de uma rede. Um exemplo desse tipo de parâmetro é a taxa de erro de pacotes, (*Packet Error Rate*, PER), que é proporcional à própria BER. De fato, a PER pode ser medida com equipamentos (computadores) cujo custo é muito menor que o daqueles utilizados para avaliar a BER (medidores de BER). Além disso, a proporcionalidade entre a PER e a BER pode ser afetada pelo desempenho dos protocolos que estão entre a camada de enlace de dados do Modelo OSI e a camada na qual a PER é medida. Por isso, ao se estimar diretamente a PER para um dado serviço, a avaliação torna-se mais próxima àquela que será percebida pelo cliente da rede.

A relação sinal-ruído mencionada acima é medida na camada física do Modelo OSI, ao passo que a PER é medida em alguma camada superior. Como o parâmetro de uma camada está influenciando em um parâmetro de outra camada, tem-se um efeito chamado *cross-layer*, [Teles, 2010]. Até o momento, este efeito é pouco estudado em redes ópticas. Esse trabalho levará em consideração esse efeito no estudo do desempenho de redes ópticas transparentes.

## 1.4 Objetivos

O objetivo desse trabalho foi avaliar experimentalmente o desempenho de VoIP em dois tipos de redes, as redes opacas e as redes ópticas transparentes. A qualidade do fluxo de voz foi avaliada computacionalmente, levando em consideração a PER, o tipo de codec e a variação do atraso entre pacotes que continham informações de voz. Foi feita também uma análise que levou em consideração características subjetivas relacionadas qualidade da voz. Essa última avaliação foi feita em termos do Fator R, descrito pela Modelo E do ITU-T [ITU-T, G107], que é um dos principais métodos computacionais não-intrusivos utilizados na avaliação da qualidade da voz. Os resultados obtidos com os experimentos foram comparados a fim de se obter uma equivalência entre parâmetros que podem degradar a qualidade da voz em cada tipo de rede.

## 1.5 Trabalhos relacionados

Na literatura, encontramos poucos trabalhos que abordam esse tema. Alguns deles [Pinart, 2007], [Pinart, 2008] apresentam relações entre a PER e a BER e entre a BER e a OSNR. Segundo eles a BER está relacionada com a OSNR através de:

$$BER_c = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{B_o}{2B_e} \frac{2OSNR_c}{\sqrt{4OSNR_c + 1} + 1}} \right) \quad (1)$$

na qual  $BER_c$  é a BER medida em um determinado comprimento de onda em um sistema WDM,  $OSNR_c$  é a relação sinal-ruído deste canal, obtida de maneira não intrusiva, e  $B_o$  e  $B_e$  são as bandas do sinal óptico e do filtro elétrico no receptor. A relação entre BER e PER tem como base a equação:

$$FER = 1 - (1 - BER)^n \quad (2)$$

na qual FER é a taxa de erros de quadros (*Frame Error Rate*, FER), e  $n$  representa o número de bits do quadro. A PER é proporcional a FER, e o que determina essa proporcionalidade é a quantidade de pacotes IP transportados por um quadro ethernet. Como exemplo, na situação em que um quadro ethernet transporta apenas um pacote IP, a PER é igual a FER.

Outro trabalho, [Teles, 2010], apresenta resultados experimentais mostrando que a PER de transmissões de vídeo em redes IP depende não só da OSNR, mas também do valor absoluto da potência do sinal e do ruído. Estes resultados contrariam (1), mas em [Teles, 2010] não há uma investigação sobre os motivos de tal discrepância.

Estes três trabalhos ([Pinart, 2007], [Pinart, 2008] e [Teles, 2010]) tiveram influência considerável sobre a análise de dados e as investigações realizadas nesta dissertação.

### **1.6 Contribuições do Trabalho**

Como mencionado em [Pinart, 2008], faltam na literatura trabalhos experimentais que relacionem a BER e/ou a PER com a OSNR. Neste sentido, uma primeira contribuição desta dissertação é prover este tipo de resultado para o serviço de VoIP. Ao apresentar valores críticos de OSNR, abaixo dos quais o Fator R indica que os fluxos de VoIP terão baixa qualidade, os resultados deste trabalho estabelecem um guia quantitativo que deve ser observado pelas operadoras que operam com redes opacas e pretendem migrar sua infra-estrutura para TONs. De fato, a relação entre o Fator R (relacionado à camada de aplicação do Modelo OSI) e a OSNR (camada física do modelo OSI) constitui uma contribuição experimental para a análise do efeito de *cross-layer* em TONs, que, até agora, é pouco analisado em trabalhos na literatura.

Além disso, os resultados obtidos neste trabalho sugerem que, ao contrário do que é indicado por equações freqüentemente utilizadas na literatura, a PER depende não apenas da OSNR, mas também do valor absoluto da potência do sinal (ou do ruído). Apesar de esta dependência já ter sido observada e relatada em [Teles, 2010], nosso trabalho vai além e apresenta uma discussão sobre as condições físicas que causam tal dependência. Por fim, observa-se que esta dependência implica que o procedimento não-intrusivo descrito na Seção 1.5 não é suficiente para monitorar a qualidade de sinal em TONs. Esta dependência com o valor absoluto da potência do sinal requer que, além da derivação do sinal para monitoração da OSNR, a potência do sinal que segue sua rota para o restante da TON também seja monitorada e relacionada com a OSNR medida.

## **1.7 Organização da Dissertação**

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta conceitos importantes de voz sobre IP, incluindo itens desde a digitalização da voz até os codecs utilizados em sua preparação para transmissão. No Capítulo 3 é feita uma breve explanação sobre a qualidade de serviço em VoIP e também sobre métodos para aferi-la. No Capítulo 4 descrevem-se os tipos de redes ópticas utilizadas atualmente, desde as redes opacas, com comutação eletrônica nos nós, até as redes ópticas transparentes, em que o sinal permanece no meio óptico em todo seu percurso. O Capítulo 5 descreve os arranjos experimentais utilizados nos experimentos deste trabalho para emular redes opacas e redes ópticas transparentes. O Capítulo 6 apresenta os resultados destes experimentos e, por fim, o Capítulo 7 aborda a conclusão do trabalho e perspectivas de continuidade.

## **2 VOZ SOBRE IP**

O objetivo deste capítulo é apresentar alguns conceitos importantes relacionados à tecnologia de voz sobre IP (*Voice Over IP*, VoIP). Para tanto, a Seção 2.1 descreve os processos relacionados à digitalização de sinais analógicos, a Seção 2.2 apresenta alguns dos principais codecs utilizados em VoIP e a Seção 2.3 aborda os protocolos da camada de transporte utilizados por essa tecnologia.

### **2.1 Digitalização de sinais analógicos**

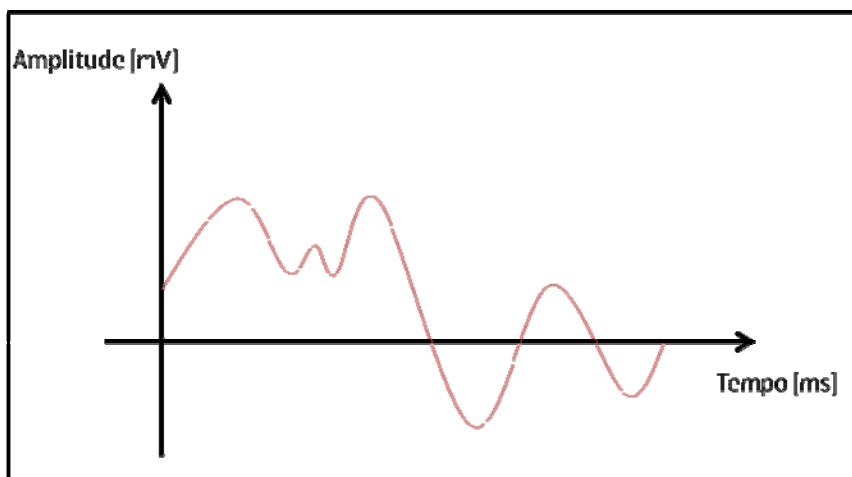
A voz é um sinal analógico e antes de transportá-la em uma rede IP é necessário digitalizá-la. O processo de digitalização é dividido em três passos:

- a. Amostragem
- b. Quantização
- c. Codificação

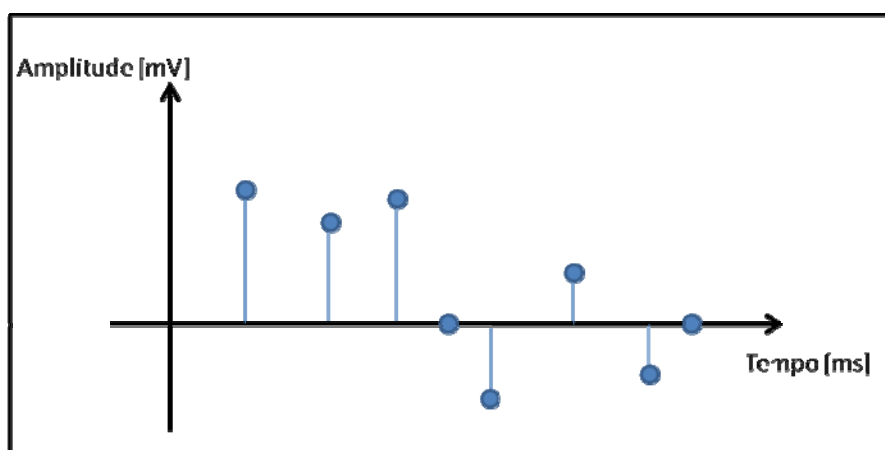
Esses passos serão discutidos a seguir.

#### **2.1.1 Amostragem**

Durante o processo de amostragem ocorre a aquisição periódica de medidas da amplitude de um sinal analógico a uma determinada frequência. Segundo o teorema de Nyquist, amostras retiradas a um taxa igual ou superior ao dobro da maior frequência presente no sinal analógico, contêm toda informação necessária para a posterior recuperação desse sinal [Haykin, 2000]. A Figura 1 ilustra um sinal analógico, contínuo em relação ao tempo e amplitude, e a Figura 2 mostra o mesmo sinal após a fase de amostragem, que agora é representado por um número discreto de amostras.



**Figura 1 – Sinal analógico**

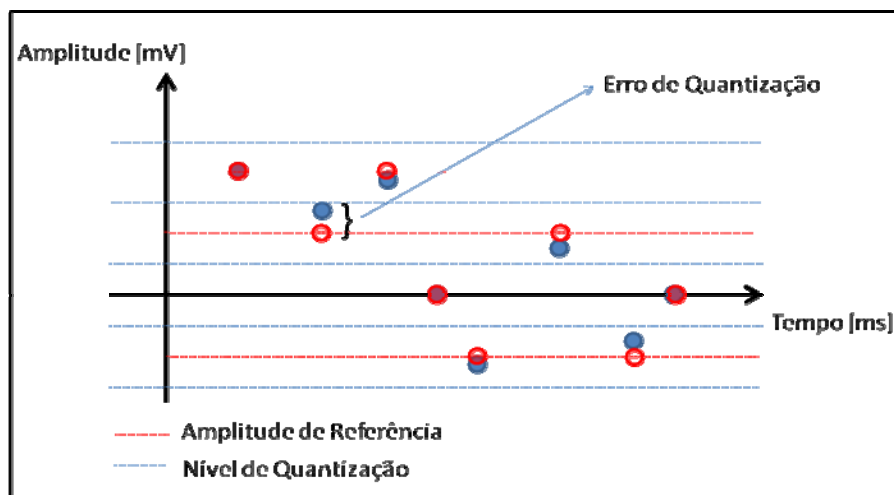


**Figura 2 - Sinal Amostrado**

No sistema telefônico apenas as informações presentes na faixa de 300 a 3400 Hz do sinal de voz são aproveitadas, [Haykin, 2000]. As componentes de frequência fora dessa faixa são filtradas. Assim, uma frequência de amostragem igual ou superior a 6800 Hz seria suficiente para retirar as amostras do sinal. Na prática é utilizada a frequência de 8000 Hz.

### 2.1.2 Quantização

As amostras obtidas por meio do processo descrito anteriormente são discretas em relação ao tempo, mas podem assumir infinitos valores de amplitudes. A quantização consiste em aproximar as amostras a valores de amplitude previamente estabelecidos tornando o sinal discreto também em amplitude, [Haykin, 2000].



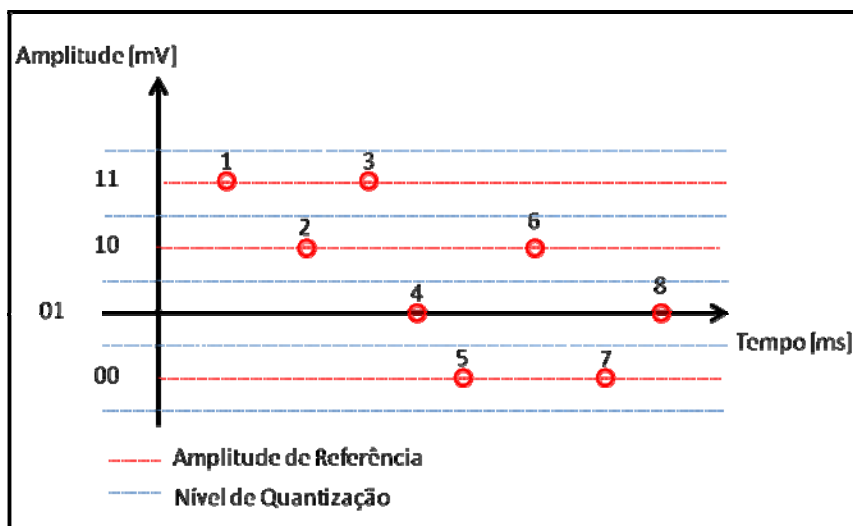
**Figura 3** - Quantização das amostras

A Figura 3 ilustra o procedimento de quantização. As amostras originais estão representadas pela cor azul e a cor vermelha representa as amostras quantizadas, que foram aproximadas ao nível de amplitude de referência. A Figura 3 também mostra a existência um erro que é inserido devido à aproximação das amostras, chamado erro ou ruído de quantização. Certamente, este erro influenciará o desempenho do sistema. Uma descrição matemática sobre esta influência está além do escopo deste trabalho, mas pode ser encontrada em [Lathi, 1998].

### 2.1.3 Codificação

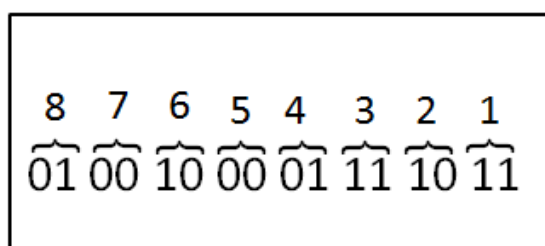
Após a quantização, cada amostra precisa ser associada a uma seqüência de símbolos que será transmitida por um canal até o receptor do conteúdo digitalizado. Em grande parte dos casos práticos, este processo é feito por meio de códigos binários, de tal maneira que cada amplitude quantizada é convertida em uma seqüência única de bits, como mostrado na Figura 4. Os bits são representados por pulsos, daí o nome de modulação por código de pulso (*Pulse Code Modulation, PCM*), [Haykin, 2000].





**Figura 4 - Amostras Codificadas**

A sequência de bits resultante desse processo de digitalização é mostrada na Figura 5.



**Figura 5 - Sequência de bits**

Essa sequência de bits ainda pode ser processada para que seja adequada ao transporte pela rede IP. Esse é o papel dos codecs para VoIP, assunto que será abordado na próxima seção.

## 2.2 Codec's para VoIP

Os codecs para VoIP comprimem o sinal de voz, retirando componentes que não afetam a sua inteligibilidade, reduzindo dessa forma, a taxa de dados necessária para transmissão desses sinais.

Os codecs podem ser divididos em três tipos: codificadores por forma de onda, codificadores paramétricos e híbridos. A grande diferença entre esses codificadores é o tipo de informação que enviam: o sinal e suas variações no caso de codificadores por forma de onda, parâmetros extraídos da manipulação do

sinal de voz no caso dos paramétricos, ou uma mistura dos dois no caso dos híbridos. A Tabela 1 mostra a taxa de bits obtida após a codificação para os três tipos de codificadores. Além disso, a tabela informa qual o nível de qualidade que pode ser obtida com a utilização de cada um deles.

**Tabela 1** - Tipos de codificadores

Tipo de codificador	Taxa de codificação	Qualidade
<b>Forma de Onda</b>	32 a 64 Kbits/seg	Boa – Excelente
<b>Paramétrico</b>	1 a 4 Kbits/seg	Ruim – Regular
<b>Híbrido</b>	3 a 12 Kbits/seg	Boa – Excelente

Atualmente os codecs mais utilizados pelos provedores de VoIP são o G.711 [ITU-T, G.711] e o G.729 [ITU-T, G.729] e, por essa razão, serão os únicos considerados nesse trabalho. A seção abaixo os descreve com mais detalhes.

### 2.2.1 G.711

O processo de codificação do G.711 é por forma de onda. Nesse caso, cada amostra é representada por oito bits. O processo de amostragem retira oito mil amostras por segundo o que leva a uma taxa final, após a codificação, de 64 kbps. O G.711 é o codec que apresenta a melhor qualidade e, em contrapartida, é o que ocupa a maior banda para transmissão.

Em VoIP ele é usado principalmente em chamadas de FAX, MODEM e DTMF (*Dual-Tone Multi-Frequency*, DTMF).

### 2.2.2 G.729

O G.729 é um codificador híbrido que usa a técnica CS-ACELP (*Conjugate Structure Algebraic Code-Excited Linear Prediction*, CS-ACELP) e sua principal vantagem é o baixo consumo de banda, cerca de 8 kbps. Em contrapartida, esse baixo consumo reduz a qualidade da voz, em comparação ao codec G.711, e também aumenta o processamento exigido para a codificação.

Mesmo sendo inferior ao G.711, a qualidade da voz obtida com o G.729 pode ser satisfatória, e por essa razão ele é largamente utilizado em VoIP. Entretanto, devido a características do processo de codificação, ele não é adequado para transporte de DTMF, e também no caso de chamadas de FAX e MODEM.

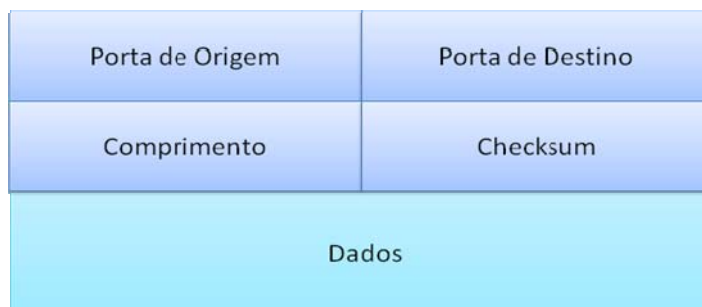
Geralmente os *gateways* iniciam as chamadas utilizando o codec G.729 e quando detectam sinais de FAX ou MODEM, eles automaticamente trocam o codec para G.711.

Para que a voz codificada chegue ao destino, os codecs necessitam de serviços específicos dos protocolos da camada de transporte. Esse tema será abordado na seção seguinte.

### **2.3 Requisitos da camada de transporte para VoIP**

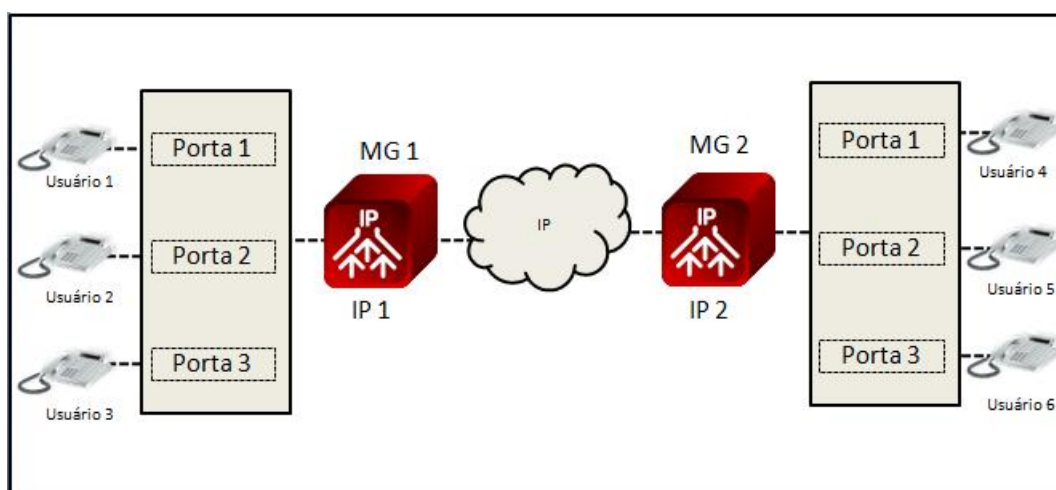
A rede IP possibilita a troca de informações entre *hosts* distantes entre si por milhares de quilômetros. Assim sendo, é possível estabelecer uma conexão entre dois computadores e iniciar a transferência de pacotes que contenham informações de voz. O tráfego de voz possui uma vantagem em relação a todos os outros, pois seu destino final, que no caso é o cérebro humano, tem uma grande capacidade de recuperar possíveis falhas geradas pela rede. A falta de uma palavra pode ser suprida pelo entendimento do contexto da conversa, ou quando isso não for possível, os interlocutores podem solicitar a repetição de toda a frase. Isso substitui os mais complexos algoritmos de correção de erros e retransmissão de dados disponíveis, o que por sua vez simplifica o protocolo da camada de transporte utilizado para transportar informação de voz.

O UDP (*User Datagram Protocol*, UDP) [IETF, 1980] é um dos protocolos mais utilizados pela camada de transporte. O UDP é um protocolo não orientado a conexão e, por isso, não há a negociação de parâmetros a serem utilizados durante a transmissão, [Tanenbaum, 2003]. Dessa forma, uma aplicação apenas envia dados para outra aplicação, sem garantias de que eles chegarão ao destino. Não é necessário estabelecer, gerenciar e fechar conexões. A Figura 6 mostra o cabeçalho do UDP.



**Figura 6** - Cabeçalho UDP

O cabeçalho do UDP é formado pelo campo Dados, que pode ser variável, e, por isso, o campo Comprimento informa o tamanho do campo Dados. Os campos Portas Origem e Destino identificam as portas utilizadas em uma interação. A função dessas portas é fornecer mecanismos que ajudem o *host* a distinguir para qual usuário/processo interno é destinada uma mensagem. Isso é necessário porque normalmente o *host* possui apenas um endereço IP, e várias aplicações utilizam esse mesmo endereço para estabelecer suas conexões com outras máquinas, enviando e recebendo informações. O estudo de caso ilustrado pela Figura 7 ajuda a esclarecer o conceito de portas.



**Figura 7** - Estudo de caso sobre portas

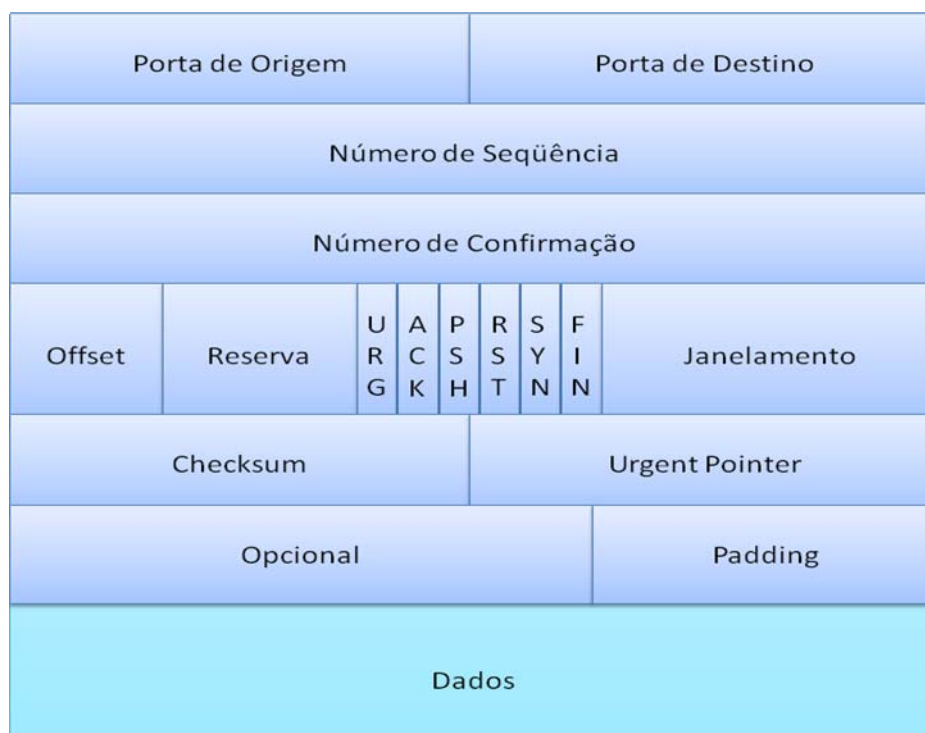
Na figura acima, os usuários estão associados aos *Media Gateways* (MG) e compartilham o mesmo endereço IP, IP1 no caso do MG1 e IP2 para MG2. Sob o ponto de vista do MG a diferença entre esses usuários é a porta associada a cada um deles. Então, até a camada de rede as mensagens recebidas pelo MG1 e originada de MG2 são iguais, ou seja, mesmo endereços IP de origem e destino.

É na camada de transporte que começam a aparecer as diferenças. Cada usuário possui uma identificação única, que aqui é representada pela porta. O cabeçalho UDP da mensagem recebida possui a informação das portas origem e destino. Pela análise da porta destino a camada de transporte identifica para qual usuário deve ser entregue a mensagem. É dessa forma que a camada de transporte, nesse caso usando o protocolo UDP, faz a distinção interna de usuários. Esse serviço permite criar várias conexões usando apenas um endereço IP, o que é largamente utilizado em VoIP.

Em uma rede IP os pacotes de um mesmo fluxo são independentes e podem trafegar por caminhos diferentes até o destino. Isso pode fazer com que as mensagens cheguem fora de ordem. A ordenação correta de mensagens é um serviço prestado pela camada de transporte. Entretanto, o UDP não provê mecanismos para ordenação das mensagens aos usuários finais. O efeito provocado pela desordem dos pacotes, no caso de tráfego de voz, é de degradação de sua qualidade. Isso inviabiliza a utilização do protocolo UDP em VoIP. Uma alternativa seria utilizar o protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*, TCP), descrito pela RFC 793 [IETF, 1981], pois este garante a entrega dos pacotes na ordem que eles foram enviados.

O TCP oferece serviço de transporte confiável, já que é orientado a conexão. Antes de enviar dados, um protocolo orientado a conexão negocia parâmetros a serem usados durante a transmissão, como por exemplo, o tamanho máximo das mensagens, a qualidade de serviço exigida, quantidade de mensagens enviadas sem confirmação, entre outras coisas, [Tanenbaum, 2003]. Essa conexão prévia possibilita verificar se mensagens chegarão corretamente ao destino.

A utilização do TCP traria outros ganhos em relação ao UDP, pois além de reordenar os pacotes ele também é capaz de retransmitir pacotes perdidos, descartar pacotes duplicados e controlar o fluxo de dados. Para isso, ele utiliza alguns bits do cabeçalho, campo Número de Sequência, para a numeração dos pacotes. A Figura 8 ilustra o cabeçalho do TCP.



**Figura 8** - Cabeçalho TCP

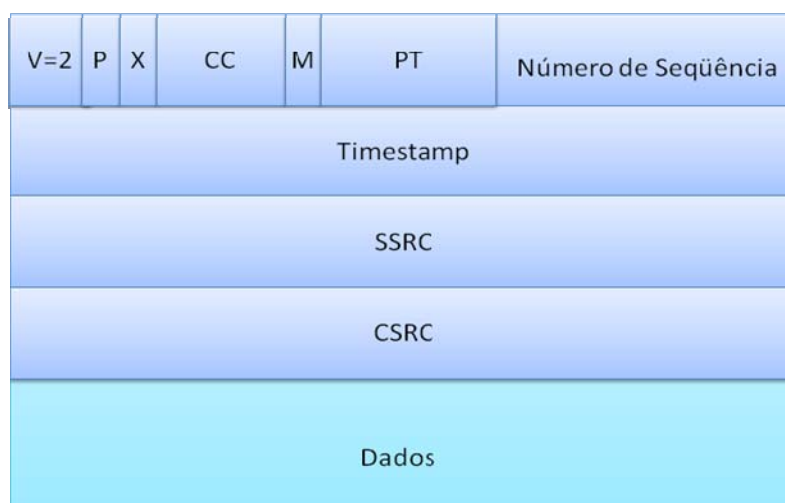
A função dos campos Porta Origem e Porta Destino são as mesmas do cabeçalho UDP. Adicionalmente, o cabeçalho TCP possui os campos Número de Sequência e Número de Confirmação, que são responsáveis pela garantia de entregas das mensagens. Os demais campos não estão no foco desse trabalho e por isso não serão descritos.

Utilizando o TCP, os pacotes que transportam informações de voz só seriam enviados após a fase de estabelecimento da conexão. Esse atraso poderia degradar o início da conversação o que é considerado um fator contrário a utilização do TCP.

Outros itens que são contrários ao TCP, especificamente para transportar voz sobre IP, são os processos de confirmação e retransmissão de pacotes, o que gera tráfego adicional na rede. Quando o TCP detecta que um pacote foi perdido, ele não confirma o seu recebimento e aguarda a sua retransmissão para depois passar os dados para as camadas superiores. Além de inserir um atraso adicional ao fluxo de dados, confirmações e retransmissões são desnecessárias em tráfegos em tempo real, pois os pacotes retransmitidos provavelmente chegariam tarde demais para serem úteis.

Contudo, a utilização do TCP com transporte dos dados de voz traria o benefício da ordenação dos pacotes, mas iria inserir outros problemas que degradariam a qualidade da voz. Por essa razão sua utilização no transporte de voz não foi amplamente adotada.

Então, como solução para a deficiência de ordenação dos pacotes do UDP, foi utilizado o protocolo de transporte em tempo real (*Real-Time Transport Protocol*, RTP), descrito pela RFC 1889 [IETF, 2003]. O RTP é um protocolo de transporte em tempo real genérico, que pode ser utilizado por várias aplicações que utilizam a rede IP, tais como VoIP, rádio, vídeo conferência, vídeo e música sob demanda e outras aplicações multimídia [Tanenbaum, 2003]. O cabeçalho do RTP é mostrado pela Figura 9.



**Figura 9** - Cabeçalho RTP

Cada pacote enviado em um fluxo RTP recebe um número de seqüência, campo Número de Sequência do cabeçalho, uma unidade maior do que a do último pacote enviado. Essa numeração permite ao destino descobrir se algum pacote foi perdido e também possibilita ordená-los corretamente. O campo *Timestamp* indica o tempo em que ocorreu a amostragem e é utilizado para sequenciar os pacotes no destino. O *payload* do RTP será preenchido pela voz codificada, por exemplo, pelos codecs G.711 e G.729.

O protocolo RTP supre uma das deficiências do UDP para tráfego multimídia que é a ordenação de mensagem. Assim, a dupla RTP/UDP passa a ser largamente utilizada para o transporte de tráfego em tempo real.

Inicialmente, a filosofia por trás da rede IP é de que todos os pacotes são tratados da mesma maneira e que não há garantias de que eles chegarão ao destino. Durante seu trajeto alguns pacotes podem passar por roteadores congestionados, que podem descartá-los ou deixá-los em uma fila para que sejam tratados posteriormente, inserindo um atraso adicional que, por sua vez, pode afetar o tráfego de voz sobre IP. As degradações impostas por essas características das redes podem ser medidas subjetivamente e objetivamente. Os métodos utilizados para avaliar a qualidade da voz em redes IP serão apresentados no próximo capítulo.



### 3 QUALIDADE DE SERVIÇO EM VoIP

Esse capítulo apresentará conceitos de Qualidade de Serviço (*Quality of Service*, QoS) em VoIP e também métodos e ferramentas utilizadas para aferir esta qualidade. Para tanto a Seção 3.1 introduzirá conceitos iniciais de QoS e a Seção 3.2 apresentará algumas das principais metodologias utilizadas para avaliá-la.

#### 3.1 Mecanismos de QoS

Pela rede IP trafegam inúmeros fluxos de dados, cada um com características específicas, mas todos eles compartilhando os mesmos recursos. Um fluxo de dados representa a troca de informações entre dois aplicativos instalados em máquinas distantes uma da outra e, o tipo de aplicação, irá definir quais são os requisitos de desempenho que cada um desses fluxos irá exigir da rede [Tanenbaum, 2003].

Uma aplicação em tempo real, como VoIP, exige que seus pacotes cheguem ao destino com um atraso constante e baixo. Esta aplicação é tolerante a pequenas perdas, pois os codecs e até mesmo o cérebro humano podem compensar a falta de informação [Kurose, Ross 2003]. Já aplicações que utilizam transferências de arquivos não são tolerantes a perda de dados, mas podem tolerar altos valores de atrasos. Com base nas características dos fluxos de dados é possível estabelecer regras para aperfeiçoar a utilização dos recursos de uma rede. Como exemplo, os gerentes podem priorizar o tratamento do tráfego de VoIP, em relação a tráfego de dados, já que ele é mais sensível ao atraso. Esses conjuntos de regras definem a Qualidade de Serviço oferecida por uma rede.

Os primeiros modelos de QoS para a Internet que surgiram foram os serviços integrados (*Integrated Services*, IntServ) [IETF, 1994], os serviços diferenciados (*Differentiated Services*, DiffServ) [IETF, 1998] e, posteriormente a comutação de rótulo multi-protocolo (*Multiprotocol Label Switching*, MPLS) [IETF, 2001], que está se tornando a principal ferramenta de QoS utilizada pelas operadoras. Nas sub-seções seguintes serão apresentadas as características dessas três tecnologias.

### 3.1.1 IntServ

O modelo IntServ fornece garantias de QoS fim-a-fim específicas para cada fluxo de dados e, para que isso seja possível, é necessário reservar recursos nos elementos de rede responsáveis pela transmissão desses fluxos. A reserva de recursos é feita utilizando o protocolo de reserva de recursos (*Resource Reservation Protocol, RSPV*), [IETF, 1997]. Portanto, para estabelecer uma conexão IntServ entre dois pontos, o aplicativo do usuário questiona ao roteador se ele possui recursos necessários para um bom desempenho da aplicação naquele momento. Este roteador irá questionar o próximo até chegar ao destino. Caso todos os roteadores possuam recursos para atender as necessidades da aplicação durante toda sua utilização, a conexão é estabelecida. Do contrário não é feita a conexão IntServ.

O IntServ não funciona bem em redes grandes pois nenhum roteador é capaz de armazenar tabelas com conexões IntServ e a comparar a cada pacote IP. Além disso, todos os equipamentos da rede devem suportar a reserva de recursos e, para isso, seria necessário substituir vários desses roteadores, o que elevaria o custo dessas redes.

### 3.1.2 DiffServ

Diferentemente do IntServ, o DiffServ não analisa um fluxo específico, mas cada pacote individualmente. Os pacotes IP de um domínio DiffServ possuem uma marcação no campo ToS (*Type of Service, ToS*) do IPv4. Esse campo possui oito bits, que são analisados pelos roteadores para definir que tratamento dar aos pacotes. Quando um pacote chega ao roteador ele é analisado pelo classificador e, dependendo do conteúdo do ToS, será encaminhado para uma fila. Os roteadores deixam de ter filas únicas do tipo FIFO (*First in, First out, FIFO*), e passam a ter diversas filas que recebem os pacotes de acordo com sua marcação. Essas filas possuem prioridades diferentes entre si e, quanto maior a prioridade da fila, mais rápido será o tratamento dado ao pacote. Normalmente pacotes IP que transportam RTP possuem uma marcação que os colocam em filas de alta prioridade.

Não é obrigatório que todos os roteadores de uma rede suportem o DiffServ, pois os roteadores que são habilitados a verificar as marcações dos pacotes irão colocá-los em uma única fila do tipo FIFO. Embora o DiffServ não garanta 100% de qualidade é um sistema muito fácil, prático e barato de se implementar.

### **3.1.3 MPLS**

O MPLS é uma tecnologia de encaminhamento de pacotes baseada em rótulos. Os rótulos são adicionados aos pacotes pelos roteadores de borda na entrada da rede MPLS. Todo o encaminhamento de pacotes da rede MPLS é feito com base nesses rótulos e, as regras de criação desses rótulos definem a QoS da rede.

## **3.2 Medidas da Qualidade da Voz**

Com qualquer um dos protocolos listados na seção anterior é possível projetar redes que ofereçam condições adequadas para cada tipo de aplicação. Ainda assim, essas redes podem apresentar problemas de QoS devido a falhas na programação de roteadores, sub-dimensionamento de enlaces, falhas físicas e sobre-carga nos roteadores.

Os requisitos de QoS fazem parte do contrato assinado pelos clientes. Esse contrato é conhecido como acordo de nível de serviço, (*Service Level Agreement*, SLA), [Fawaz, Daheb, et al., 2004] O SLA é a definição formal dos níveis de prestação de serviço aos usuários, e contém informações do tipo: métricas de desempenho, gerenciamento de falhas, garantias, responsabilidades de ambas as partes, medidas emergenciais, confidencialidade, relatório de monitoramento, etc.

Para fazer valer o que foi acordado no SLA, as métricas de desempenho da rede precisam ser constantemente monitoradas, e comparadas aos valores pré-estabelecidos. No caso específico de VoIP essa comparação não é simples, pois a medida da qualidade da voz é subjetiva e pode variar de acordo com a percepção de cada usuário. Uma perda de pacotes de 1% pode ser insuportável para um usuário e ao mesmo tempo aceitável para outro. Para solucionar esse problema foram desenvolvidas técnicas para avaliar a qualidade da voz. Essas técnicas serão descritas a seguir.

O ITU-T desenvolveu um padrão numérico para avaliar a qualidade de voz, o *MOS*, (*Mean Opinion Score*, *MOS*), [ITU-T, P.800]. O valor da escala *MOS* varia de um, que representa uma má qualidade da voz, a cinco, pontuação atribuída a uma transmissão com ótima qualidade de voz. A escala *MOS* foi obtida em experimentos presenciais, nos quais um grupo de pessoas foi submetido a alguns segundos de fala sob condições controladas de degradação, [ITU-T, P800]. As opiniões sobre a qualidade percebida pelo grupo foram subsídios para formação da escala, que é apresentada pela Tabela 2.

**Tabela 2 - Escala MOS**

Qualidade	Pontuação
<b>Excelente</b>	5
<b>Boa</b>	4
<b>Razoável</b>	3
<b>Ruim</b>	2
<b>Péssima</b>	1

A Tabela 2 mostra a conversão da percepção de qualidade da voz para um valor numérico. O *MOS* é a principal referência de *QoS* utilizadas pelas operadoras para avaliar suas redes *VoIP*. Entretanto, obter a pontuação referente à escala *MOS* em uma rede não é um trabalho trivial, já que seria necessário coletar as opiniões de vários usuários que estejam submetidos às mesmas condições de desempenho da rede. Como nesse caso o ambiente não é controlado, pois depende da rede de acesso e da própria rede do cliente, que pode variar para cada usuário, não é possível garantir a premissa de mesmas condições, o que inviabiliza a utilização desse método.

Por essa razão foram desenvolvidos métodos computacionais e não subjetivos para avaliar a qualidade da voz em redes *VoIP*. Nesta dissertação utiliza-se o método conhecido como Modelo E, desenvolvido pelo ITU-T e descrito pela recomendação G.107 [ITU-T, G.107].

O Modelo E descreve parâmetros a serem avaliados em um fluxo de voz, tais como degradações impostas pelos codecs, atrasos, variação de atrasos, perdas e eco. Cada parâmetro é avaliado individualmente e o resultado de todas essas avaliações é somado, gerando um número que varia de 0 a 100, sendo que 0 é

considerado péssimo e 100 é avaliado como excelente. Esse número é chamado de Fator R. O cálculo do Fator R é feito com base na equação:

$$\text{Fator } R = R_0 - I_s - I_d - I_e + A \quad (3)$$

Na fórmula acima,  $R_0$  representa a relação sinal-ruído elétrica. Dentre a parcela do ruído é considerado o ruído gerado naturalmente pelo ambiente onde estão os receptores e transmissores e também a soma de todo ruído gerado pelos equipamentos eletrônicos envolvidos. O parâmetro  $I_s$  representa a soma de fatores genéricos que degradam uma chamada telefônica, como por exemplo, distorções causadas pela quantização e o eco.  $I_d$  é a parcela que representa efeitos provocados pelo atraso, e o parâmetro  $I_e$  representa os efeitos provocados pelos equipamentos utilizados na transmissão de voz, como tipo de codec e período empacotamento. Um parâmetro que influencia fortemente o  $I_e$  é a perda de pacotes uniformemente distribuída e, principalmente, a perda de pacotes em rajadas. O parâmetro A é um fator de ajuste e seu valor varia de acordo com o tipo de chamada. Todos esses parâmetros estão descritos com detalhes na recomendação ITU-T G.107.

Mesmo com novos métodos, o MOS continua sendo a principal referência na medida da qualidade da voz. Por essa razão o ITU-T desenvolveu uma equação que converte um valor de Fator R para uma pontuação na escala MOS.

**Tabela 3** - Conversão de Fator R para MOS

Fator-R	Qualidade
$90 \leq R < 100$	Excelente
$80 \leq R < 90$	Boa
$70 \leq R < 80$	Razoável
$60 \leq R < 70$	Ruim
$50 \leq R < 60$	Péssima

A Tabela 3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a conversão de Fator R para MOS gerada por essa equação. Observa-se nesta tabela que uma pontuação inferior a 70 seria suficiente para que a maioria das pessoas tivesse a

opinião de que a chamada telefônica está com uma qualidade ruim. A equação que gerou a tabela também está descrita na recomendação ITU-T G.107.

Então, para que uma operadora avalie a qualidade de uma chamada que utiliza a voz sobre IP basta que ela capture o fluxo RTP dessa chamada e aplique a metodologia descrita pelo Modelo E. Não é necessário inserir tráfego adicional na rede, pois a chamada capturada pode ser real, feita pelos próprios clientes. A captura do fluxo RTP pode ser feita por um *sniffer* e, atualmente, existem ferramentas que funcionam como *sniffer* e implementam o Modelo E. Nesse trabalho será utilizada a ferramenta Hammer Call Analyzer [Empirix, 2011]. Com ela é possível capturar o tráfego de voz, e ter um relatório completo do nível de qualidade obtida por esse fluxo em termos de Fator R e MOS.

Essa dissertação avaliou o desempenho de voz sobre IP em Redes Ópticas. O próximo capítulo apresenta uma revisão teórica sobre essas redes.

## 4 REDES ÓPTICAS

O objetivo desse capítulo é apresentar uma revisão teórica sobre as redes ópticas. O capítulo está dividido em duas partes, a primeira, seção 4.1, abordará os conceitos de redes ópticas opacas e a segunda parte, seção 4.2, apresentará conceitos das redes ópticas transparentes.

### 4.1 Redes Ópticas Opacas

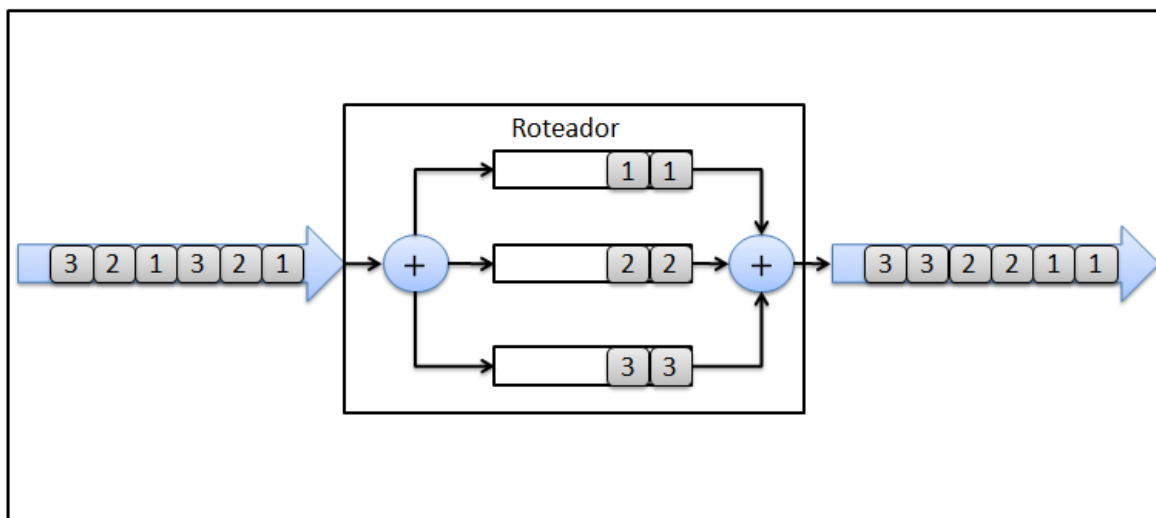
Os núcleos das redes ópticas opacas são formados por nós interligados por fibras ópticas. Como já foi dito, esses nós são constituídos por roteadores, *switches* e conversores óptico-elétricos e elétrico-ópticos. O roteamento dos pacotes é feito eletronicamente e, por isso, o fluxo de dados está sujeito a degradações que podem ocorrer devido a esse processo, [Kurose, Ross, 2003]. Além disso, essas redes também estão sujeitas a degradações impostas pelo processo de transmissão do sinal óptico pela fibra, [Ribeiro, 1999]. Esses dois efeitos são independentes e podem ser analisados separadamente. Assim a sub-seção 4.1.1 apresentará os efeitos causados pelos equipamentos eletrônicos e a sub-seção 4.1.2 abordará aspectos da transmissão do sinal óptico pela fibra.

#### 4.1.1 Redes com roteamento eletrônico

Ao receber pacotes, os roteadores os armazenam em uma fila lógica para depois analisar o cabeçalho IP e encaminhá-los por uma de suas interfaces de saída. Essas filas possuem um tamanho finito e, caso sejam ocupadas por completo, novos pacotes recebidos serão descartados, [Kurose, Ross, 2003]. O descarte de pacotes provocado pelo congestionamento nas filas dos roteadores influencia diretamente e fortemente a qualidade de VoIP.

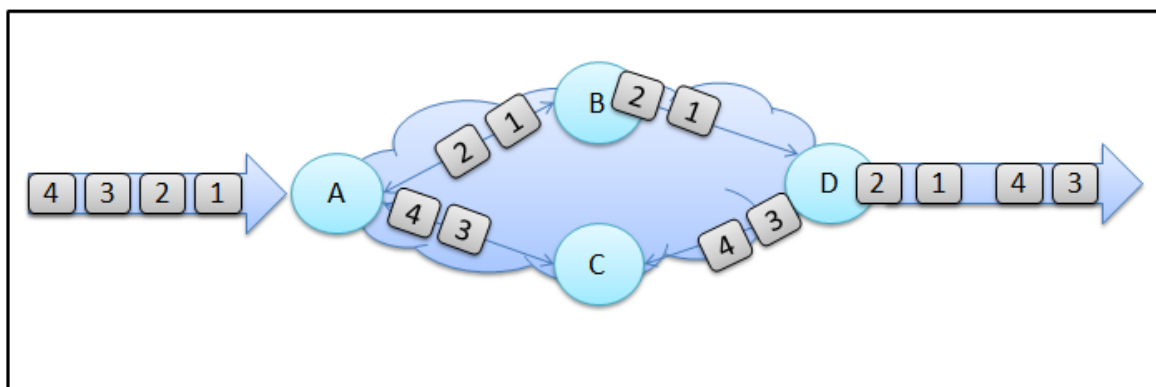
Os roteadores também podem tratar os pacotes recebidos com diferentes prioridades. Para isso eles são configurados com várias filas lógicas, como mostrado na Figura 10. Nesse exemplo a maior prioridade é 1 e a menor é 3. Como é possível notar, o roteador insere um atraso adicional aos pacotes de prioridade 2 e 3. Esse atraso pode ser variável, pois depende da ocupação de filas de prioridade superior. Filas de menor prioridade só terão seus pacotes tratados depois que filas com prioridades maiores tiverem sua ocupação abaixo

de limiares pré-estabelecidos. A ocupação das filas depende da intensidade momentânea de tráfego, que por sua vez pode variar. Então, como a taxa de ocupação das filas também pode ser variável, independente de sua prioridade, o tempo que os pacotes das filas de menores prioridades precisam aguardar também pode variar. A variação do atraso é comumente conhecida como *jitter* e influencia diretamente na qualidade de VoIP.



**Figura 10** - Filas com Prioridades

Outro problema que pode ocorrer nessas redes é o desordenamento de pacotes. Na Figura 11, o roteador A recebe um fluxo de dados e faz um particionamento de carga entre os roteadores B e C. No Exemplo, o roteador B está sobrecarregado e demora um tempo maior para tratar os pacotes. Assim, os pacotes chegam até o roteador D desordenados, o que também pode degradar a qualidade do fluxo de dados.



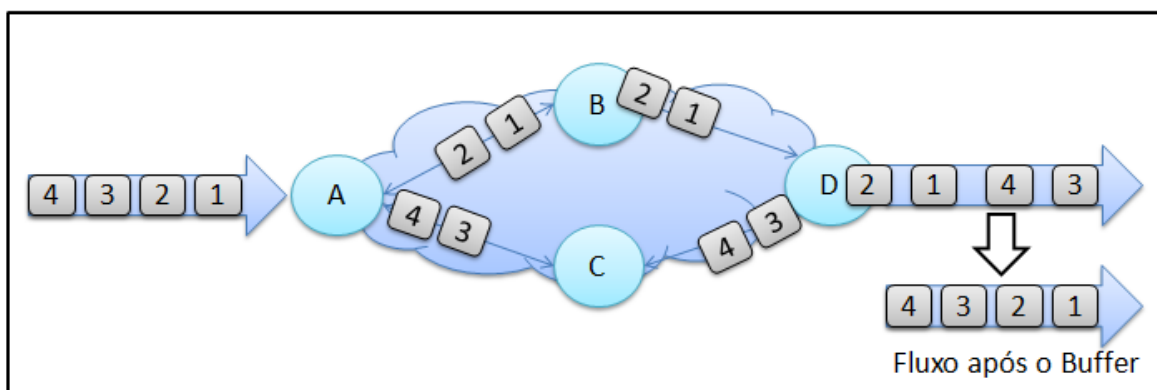
**Figura 11** - Desordenamento dos Pacotes



O desordenamento de pacotes e o jitter poderiam isoladamente, ou combinados, deteriorar uma chamada telefônica que utilizasse VoIP. Entretanto, foram desenvolvidas técnicas com o intuito de minimizar o efeito final desses problemas. Uma delas é a utilização de *buffers* para retirada de *jitter* (variações de atraso).

Os gateways VoIP enviam pacotes RTP sempre com a mesma cadência. O intervalo de tempo entre pacotes consecutivos é chamado de período de empacotamento e, define entre outras coisas, o tamanho do *payload* de um pacote RTP. Em condições normais, os *gateways* utilizam um período de empacotamento de 20 ms, que por sua vez gera *payloads* de 160 bytes para o G.711, [ITU-T, G.711] e de 20 bytes para o G.729, [ITU-T, G.729].

A Figura 12 mostra o exemplo de um fluxo de pacotes RTP submetido a *jitter* e desordenamento de pacotes que é reorganizado na recepção com o auxílio do *buffer*.



**Figura 12** - Buffer para a retirada de jitter

Para reorganizar os pacotes RTP, a camada de transporte não os envia imediatamente para as camadas superiores. Ao invés disso, os pacotes são armazenados em uma fila por um breve intervalo de tempo. Durante esse período outros pacotes desse fluxo chegam e também são armazenados. Em um instante  $t$  essa fila mostrada pela Figura 12 contém 4 pacotes que podem ter chegado desordenados e com atrasos distintos. Processos presentes na camada de transporte analisam a fila formada e tentam, através do número de seqüência dos pacotes, reorganizá-los. Além disso, esses processos enviam os pacotes para as camadas superiores com um atraso constante, igual ao período de empacotamento. O tempo que a camada de transporte aguarda para enviar os

pacotes não pode ser muito grande, pois poderia aumentar o atraso fim-a-fim, que por sua vez poderia afetar a qualidade da voz.

Em geral, os gateways conseguem recuperar fluxos com pequenos valores de *jitter* e com pacotes fora de ordem. Entretanto, a perda de um pacote ainda é fortemente percebida pelos usuários, [Merazka, 2010]. Para amenizá-la pode-se utilizar a correção adiantada de erros (*Forward error correction*, FEC). Basicamente mecanismos de FEC introduzem informações adicionais ao fluxo de dados na transmissão. Nos receptores, essas informações adicionais podem ser utilizadas para recuperar possíveis pacotes perdidos. A utilização de FEC pode melhorar a QoS de um fluxo de dados submetido a uma rede com índices razoáveis de perda de pacotes (*Packet Loss Rate*, PLR), [Merazka, 2010]. Entretanto, esse trabalho não considerou FEC em seus experimentos.

Observa-se aqui que pela primeira vez nesse trabalho foi utilizado o termo PLR. Nesta dissertação, o acrônimo PLR será utilizado quando o descarte de um pacote for devido à falta de espaço nas filas, ou indisponibilidade de processamento nos roteadores. Por outro lado, PER será utilizado em situações em que há recursos disponíveis para tratamentos dos pacotes, mas estes estão corrompidos e descartados no receptor, devido a verificação de erro no *checksum*.

O que foi descrito até o momento são características exclusivas de redes opacas. O item que segue apresenta uma revisão teórica do processo de transmissão do sinal óptico pela fibra.

#### **4.1.2 Enlaces ópticos**

A fibra óptica é um meio que provê largura de banda elevada e baixa atenuação em relação a outros meios [Ribeiro, 1999]. Os sistemas de comunicações atuais procuram aproveitar ao máximo esta capacidade elevada e, eventualmente, chegam a condições que vários efeitos de degradação tornam-se relevantes. A seguir, apresentaremos alguns dos principais destes efeitos em fibras monomodo, que são o único tipo considerado neste trabalho. Observa-se que esta apresentação é qualitativa e restringe-se a explicar pontos importantes para este

trabalho. Outros detalhes e abordagens quantitativas podem ser encontrados na literatura, [Agrawal, 2001], [Marcuse, 1980], [Agrawal, 1989], [Ramasmami, 2010]

### Atenuação e Perdas Ópticas

À medida que se propagam pelas fibras, os sinais ópticos interagem com este meio e perdem potência. Esta atenuação depende da frequência,  $f$ , ou do comprimento de onda,  $\lambda = c/f$ , na qual  $c$  é a velocidade da luz, [Ribeiro, 1999]. A Figura 13 ilustra esta dependência. Um fator muito importante é que, apesar desta dependência, a atenuação se mantém constante em determinadas regiões espectrais chamadas janelas. As três janelas utilizadas em telecomunicações, situadas nas faixas de 850, 1310 e 1550 nm também estão indicadas na Figura 13. A atenuação destas janelas é de, respectivamente,  $\sim 1$ , 0,25 e 0,2 dB/km. Considerando-se uma variação de atenuação tolerada de, por exemplo, 5%, é possível estimar a largura de banda de cada uma destas janelas. Por exemplo, para a janela de 1550 nm, também chamada de 3ª janela, a atenuação varia de 5% entre  $\sim 1465$  e 1580 nm. Convertendo estes valores para frequências e tomando o módulo da diferença entre os valores convertidos, obtém-se uma banda de  $\sim 15$  THz. De forma análoga, pode-se determinar que as bandas da janela de 850 nm, também chamada de 1ª janela, e de 1310 nm, conhecida por 2ª janela, são de, respectivamente,  $\sim 12,7$  e 25 THz.

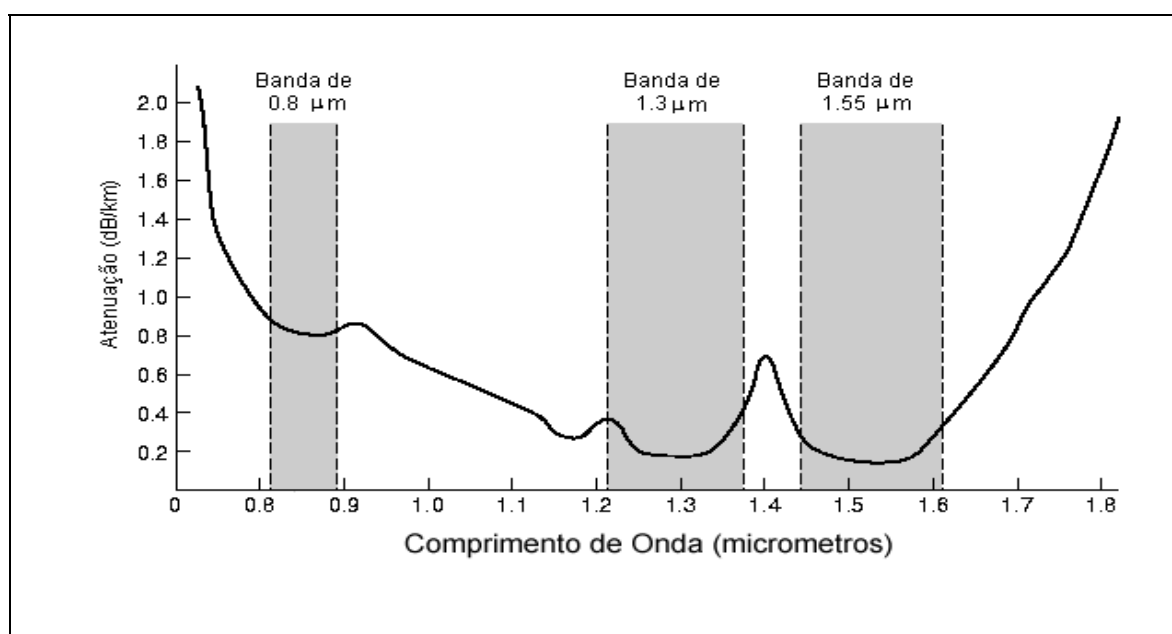


Figura 13 - Atenuação na Fibra

A atenuação pode ser compensada utilizando-se equipamentos chamados amplificadores ópticos, [Ramawsami, 2010]. Os efeitos causados por estes amplificadores serão apresentados ainda nesta seção. No entanto, por ora, é importante notar que só existem amplificadores comerciais para a 3ª janela, [Oliveira, 2007]. Por esta razão, esta janela é a única utilizada em sistemas de telecomunicações de longa distância (tipicamente superiores a 50 km) e será a única considerada neste trabalho. A 2ª janela é bastante utilizada em sistemas de TV a Cabo, podendo também ser empregada em redes locais (*Local Area Networks*, LANs) de computadores ou em outros sistemas que não requeiram amplificação. Por possuir uma atenuação maior, a 1ª janela é essencialmente utilizada em LANs, [Ramaswami, 2010].

Além da atenuação, sinais ópticos também estão sujeitos a perdas quando, por exemplo, o raio de curvatura da fibra é menor que um valor crítico, quando existem conectores entre diferentes segmentos de fibra ou entre um segmento e um equipamento e quando existem emendas ópticas [Ribeiro, 1999]. As perdas nestes dois últimos casos são de, respectivamente,  $\sim 0,5$  dB e  $\sim 0,05$  dB e, obviamente, também podem ser compensadas por amplificadores ópticos.

### **Dispersão cromática**

As fibras ópticas monomodo utilizadas em telecomunicações são essencialmente constituídas de sílica. O índice de refração deste material, assim como o de muitos outros, apresenta uma dependência expressiva com a frequência. Dessa maneira, cada componente de frequência propaga-se com sua própria velocidade em uma fibra óptica, [Ribeiro, 1999]. Dependendo do comprimento da fibra e da largura de linha da fonte utilizada, esta diferença de velocidades pode fazer com que componentes de um mesmo sinal óptico cheguem a seu destino em instantes de tempo significativamente distintos. Como resultado, este efeito conhecido como dispersão cromática, causa um alargamento espectral do sinal no receptor. No domínio do tempo, isto implica em uma distorção do sinal óptico. As fibras padrão (*Standard*, STD), que são as fibras monomodo de menor custo e mais instaladas no mundo, possuem a maior dispersão,  $\sim 16$  ps/nm/km, na região de 1550 nm. Portanto, apesar de a amplificação óptica comercial só ocorrer na 3ª janela, sinais propagados por fibras padrão nesta janela estarão sujeitos a

distorções relativamente severas. Por se tratar de um efeito linear, a dispersão pode ser compensada por equipamentos que serão apresentados ainda nesta seção.

### **Efeitos não-lineares**

Existem vários efeitos cuja influência depende da potência incidente na fibra e, portanto, são não-lineares. (Observa-se aqui que na literatura da área a linearidade é relativa à amplitude do campo elétrico das ondas envolvidas. Como a potência é proporcional ao quadrado desta amplitude, os efeitos que dependem dela são não-lineares). Entre estes efeitos citamos:

- a) a auto modulação de fase, que faz com que a fase de um sinal seja influenciada pela potência do mesmo,
- b) a modulação cruzada de fase, que faz com que a fase de um sinal dependa da potência de um sinal em outra frequência,
- c) a mistura de quatro ondas, que faz com que três sinais em frequências distintas interajam entre si e gerem um sinal em uma quarta frequência e
- d) o retro-espalhamento Brillouin que, a partir de um certo limite, tipicamente de alguns mW, faz com que parte da potência do sinal incidente na fibra retorne na direção do transmissor.

Estes e outros efeitos, como o espalhamento Raman e a instabilidade modulacional não serão relevantes para este trabalho, uma vez que sempre consideraremos potências bem inferiores às necessárias para a manifestação dos mesmos. Por essa razão, um aprofundamento deste tema está além do escopo de nosso trabalho e indicamos as seguintes referências para os leitores interessados, [Ipen, Shank, Gustafson, 1974], [Naka, Saito, 1992], [Su, Zhu, Sibbett, 1993], [Hasegawa, Brinkman, 1980]. Destacamos, entretanto que ao contrário dos efeitos lineares, não é possível compensar efeitos não-lineares.

Além da propagação por fibras, os sinais que trafegam por um enlace óptico também são transmitidos por alguns equipamentos como amplificadores ópticos e compensadores de dispersão.

## Amplificadores ópticos

A função básica dos amplificadores ópticos é aumentar a potência do sinal recebido em sua entrada. Atualmente, os amplificadores comerciais mais utilizados são os amplificadores de fibra dopada com érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*, EDFA).

Nestes equipamentos a potência de entrada,  $P_{in}$ , está relacionada com a potência de saída,  $P_{out}$  e o ganho do amplificador,  $G$  por meio de:

$$P_{out} = GP_{in} \quad (4)$$

Além de conferirem um ganho ao sinal, os amplificadores introduzem um ruído adicional ao sinal de entrada. No caso dos EDFAs, esse ruído é conhecido por ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission*, ASE) e pode ser calculado por meio de:

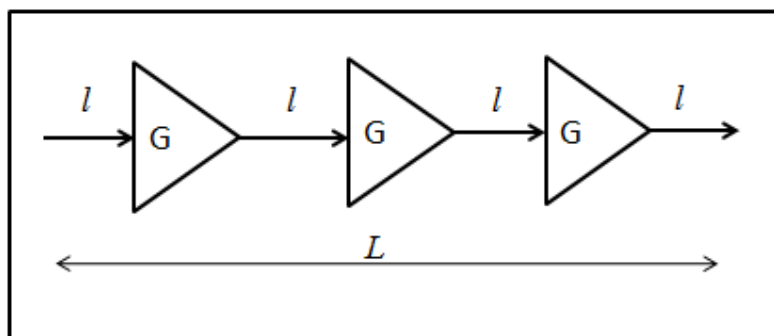
$$P_N = n_{sp} h f_c (G - 1) B_o \quad (5)$$

na qual  $n_{sp}$  é a uma constante chamada fator de emissão espontânea, e seu valor varia de 2 a 5 para a maioria dos amplificadores,  $B_o$  é a banda do sinal óptico,  $h$  é a constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  Js) e  $f_c$  é a frequência da portadora do sinal óptico.

Em uma rede óptica com amplificadores em cascata, como mostrado pela Figura 14, o ruído gerado por um amplificador é amplificado pelo próximo. O ruído total, gerado por amplificadores em cascata é dado por:

$$P_{tot} = 2n_{sp} h f_c B_o (G - 1) \frac{L}{l} \quad (6)$$

na qual  $L$  é o comprimento total do enlace e  $l$  é o comprimento de fibra entre os amplificadores.



**Figura 14** - Cascata de Amplificadores

### **Compensadores de Dispersão**

Como mencionado anteriormente, a distorção causada pela dispersão cromática ocorre porque algumas componentes de um dado sinal chegam ao receptor antes que outras. Portanto, o princípio da compensação consiste em propagar o sinal por algum meio que faça com que as componentes que viajaram mais rapidamente nas fibras trafeguem de maneira mais lenta que as demais. [Ramaswami, 2010]. Isto pode ser conseguido em fibras com dispersão negativa, como as fibras de compensação de dispersão (*Dispersion Compensating Fiber*, DCF) ou em outros módulos como grades de Bragg com *chirping*. Em geral, apesar de reduzir (idealmente anular) a influência da dispersão, estes equipamentos introduzirão perdas que precisarão ser compensadas pelos amplificadores. Os elementos compensadores de dispersão podem ser colocados antes, após ou ao longo dos enlaces ópticos.

### **4.2 Redes Ópticas Transparentes**

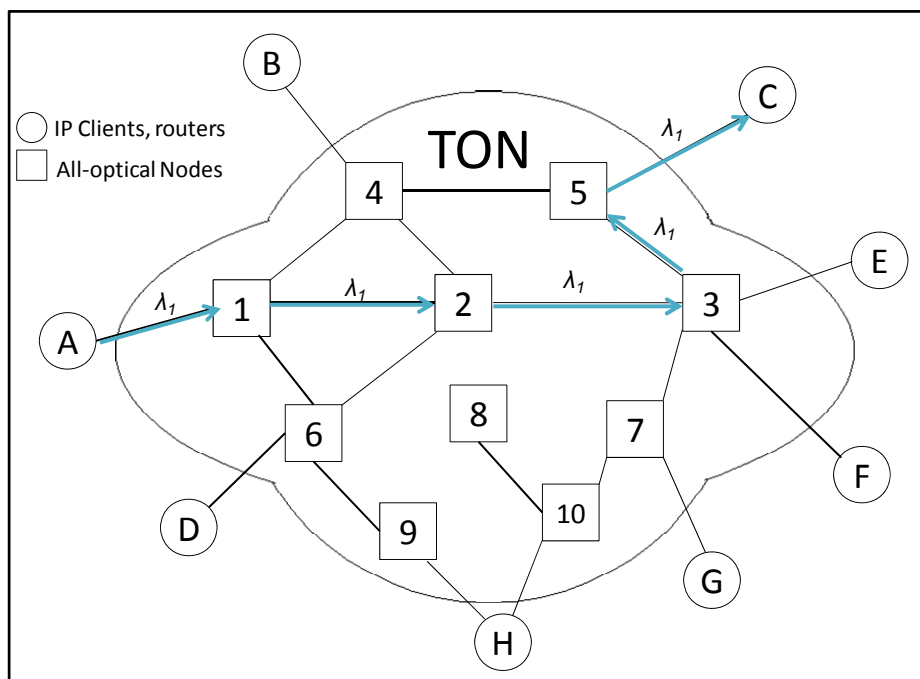
Em redes ópticas transparentes o sinal permanece no meio óptico desde a origem até o destino. Os processos de amplificação e roteamento são realizados opticamente, o que elimina os custos com equipamentos eletrônicos utilizados para esse fim. Nessas redes, a principal técnica de multiplexação utilizada é a multiplexação por comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM), [Mukherjee, 2006].

Atualmente, existem várias maneiras de implementar uma rede óptica transparente, (*Transparent Optical Network*, TON). Nesse trabalho iremos apresentar as três principais, que são roteamento de comprimento de onda (*Wavelength Routing Networks*, WRNs), [Ramaswami, 2010], redes com comutação de pacotes ópticos (*Optical Packet Switching Networks*, OPSNs), [Blumenthal, Olsson et al.,2000], e por fim, redes com comutação de rajadas ópticas (*Optical Burst Switching Networks*, OBSNs), [Wong, Baliga, et al., 2009].

Em redes WRNs, os clientes solicitam uma conexão para os gerentes da rede e estes estabelecem o *lightpath* entre a origem e o destino. Nesse trabalho não foi considerado conversões de comprimento de ondas nos nós ópticos da rede. Portanto o *lightpath* estabelecido possui o mesmo comprimento de onda em todos os seus enlaces. Para leitores interessados em redes com conversões de comprimento de onda a referência [Teles, 2010] é recomendada.

A Figura 15 mostra um *lightpath* entre os usuários A e C. A conexão completa é feita através dos nós: 1, 2, 3 e 5. No exemplo, a conexão foi feita utilizando um comprimento de onda  $\lambda_1$ . Após estabelecer essa conexão a utilização desse comprimento de onda fica indisponível nos enlaces entre os nós 1-2, 2-3 e 3-5 até que o cliente solicite a desconexão. O *lightpath* estabelecido é dedicado, e fica estabelecido mesmo na ausência de tráfego por parte dos clientes. Então, caso o cliente B solicite uma conexão com o cliente E, utilizando o comprimento de onda  $\lambda_1$ , o gerente de rede não poderá utilizar os enlaces 2-3 e 5-3, pois eles já estão ocupados. Caso o gerente não encontre outros enlaces disponíveis, o pedido de conexão será negado.





**Figura 15 - Rede TON**

A Figura 16 é uma representação em blocos de uma possível configuração de nó de uma rede totalmente óptica. Nesse exemplo a rede opera com multiplexação por comprimento de onda, WDM, e cada fibra transporta quatro comprimentos de onda. Devido a efeitos já mencionados nesse trabalho o sinal que chega até o nó está com uma potência baixa e os sob o efeito de dispersões cromáticas. Por essa razão, antes de entrar no sistema de comutação óptica o sinal passa por um trecho de fibra especial, para compensar a dispersão. Essas fibras especiais estão representadas pelos blocos DCF1, DCF2 e DCF3. Depois, o sinal é enviado para um amplificador, representado pelos blocos G. A saída dos amplificadores está conectada a demultiplexadores, representados pelos blocos M1, M2 e M3. Os demultiplexadores possuem quatro saídas, uma para cada comprimento de onda e, cada saída, está conectada a um comutador óptico, representado por S1, S2, S3 e S4. Os comutadores possuem quatro entradas e quatro saídas, e cada um deles trabalha com apenas um comprimento de onda. As entradas dos comutadores estão conectadas aos três demultiplexadores, D1, D2 e D3, e uma delas, está disponível para receber tráfego originado pelo nó. Na figura, essa entrada é representada por A. A configuração de saída dos comutadores é semelhante à configuração de entrada, uma de suas saídas, representada por D, é utilizada para escoar o tráfego destinado ao nó, e as outras saídas são

conectadas a multiplexadores representados por D1, D2 e D3. A saída dos multiplexadores é amplificada e o sinal é enviado para os próximos nós.

Quando o sistema ainda não possui nenhuma conexão ativa, qualquer comprimento de onda da entrada pode sair por qualquer multiplexador de saída. Por exemplo, o gerente de rede pode definir que o comprimento de onda representado pela cor azul escura sairá por D2. Se D1, D2 e D3 enviassem sinais para destinos diferentes, o nó que recebesse sinais de D2 passaria a ter o comprimento de onda azul escuro ocupado. Então se outro cliente, com esse mesmo comprimento de onda, mas agora originado de M2, desejasse uma conexão com o destino que está conectado a D2, ele teria seu pedido negado.

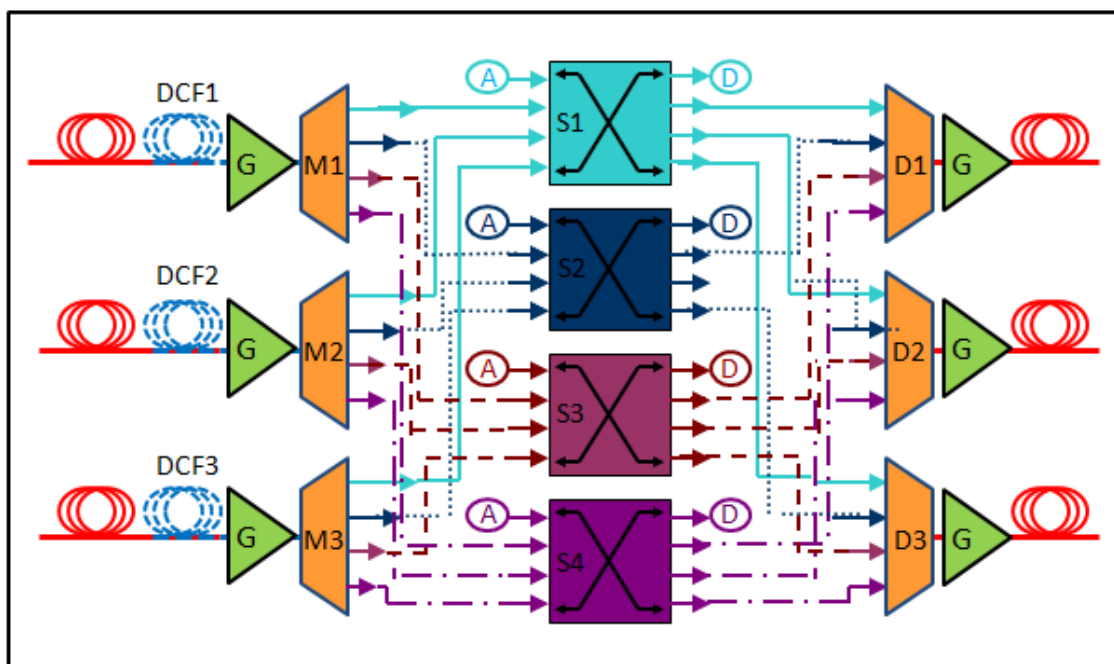


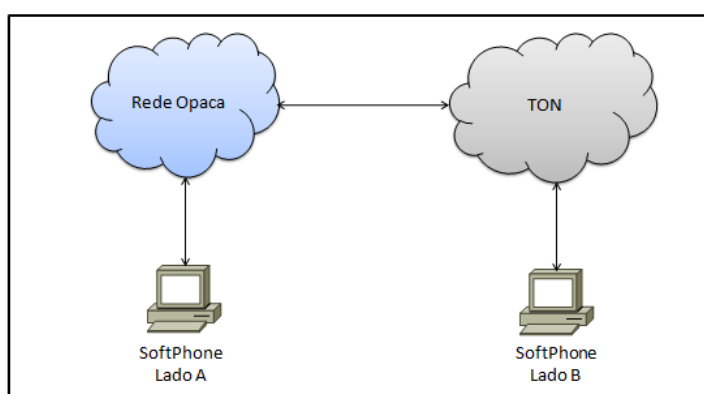
Figura 16 - Nó óptico

## 5 DESCRIÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi avaliado experimentalmente o desempenho do fluxo de VoIP gerado pelos codecs G.711 e G.729 em redes opacas e redes ópticas transparentes. Nas redes opacas o fluxo de VoIP foi submetido a variações da taxa de perda de pacotes e do atraso. Esses dois efeitos podem ser causados pela presença de equipamentos eletrônicos, como *switches* e roteadores, nos nós dessas redes. Em redes ópticas transparentes, o fluxo de VoIP foi submetido a uma variação da OSNR. Essa OSNR pode ser provocada principalmente pelo ruído do tipo ASE, provocado por amplificadores ópticos em cascata.

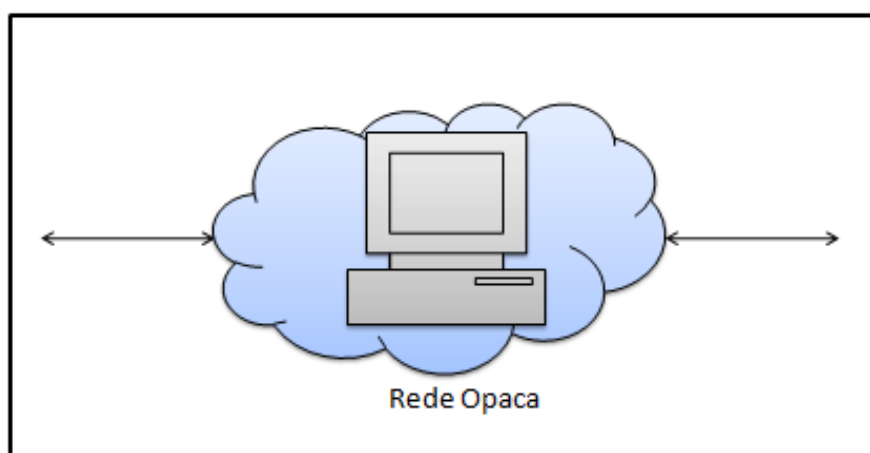
A realização de experimentos em redes comerciais é de difícil execução e pode ter interesse prático limitado, uma vez que não seria viável alterar intencionalmente os parâmetros que afetam o desempenho destas redes. Por esta razão, neste trabalho optamos por emular em laboratório os dois tipos de redes supracitados. O cenário de emulação foi dividido em duas partes: um arranjo experimental representando os efeitos causados por equipamentos eletrônicos em redes opacas e outro representando os efeitos de degradação introduzidos por TONs.

A Figura 17 mostra uma visão geral do experimento. A geração das chamadas é feita através de *SoftPhones* instalados nos dois computadores ilustrados nesta figura. Esses computadores estão configurados com um processador Intel Pentium 4 com 2 GB de memória RAM e utilizam o Windows XP como sistema operacional.



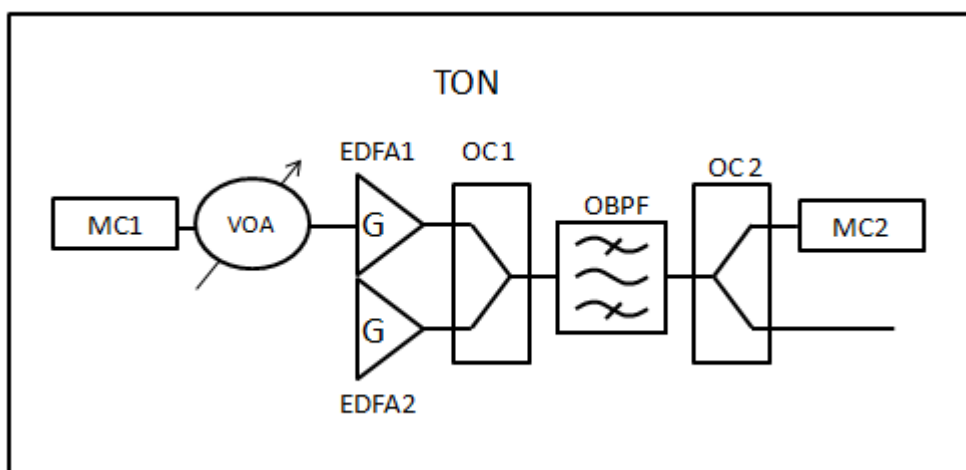
**Figura 17** - Arranjo experimental

A nuvem relativa à rede opaca foi emulada por um único computador, mostrado na Figura 18. Esse computador possui uma configuração de hardware semelhante aos anteriores, com a diferença de possuir duas placas de rede. Essa configuração permite que ele funcione como um roteador. Seu sistema operacional é baseado em Linux, e a distribuição utilizada foi o Ubuntu, [Ubuntu, 2011], versão 11.04. Em particular, este sistema é interessante por possuir uma ferramenta chamada Netem, [Netem, 2011], que permite configurar uma interface de saída do computador para descartar ou inserir atrasos, constantes ou variados, ao fluxo de pacotes. Dessa forma, é possível configurar a PLR bem como o valor do atraso desejado para o experimento.



**Figura 18** - Emulação de rede opaca

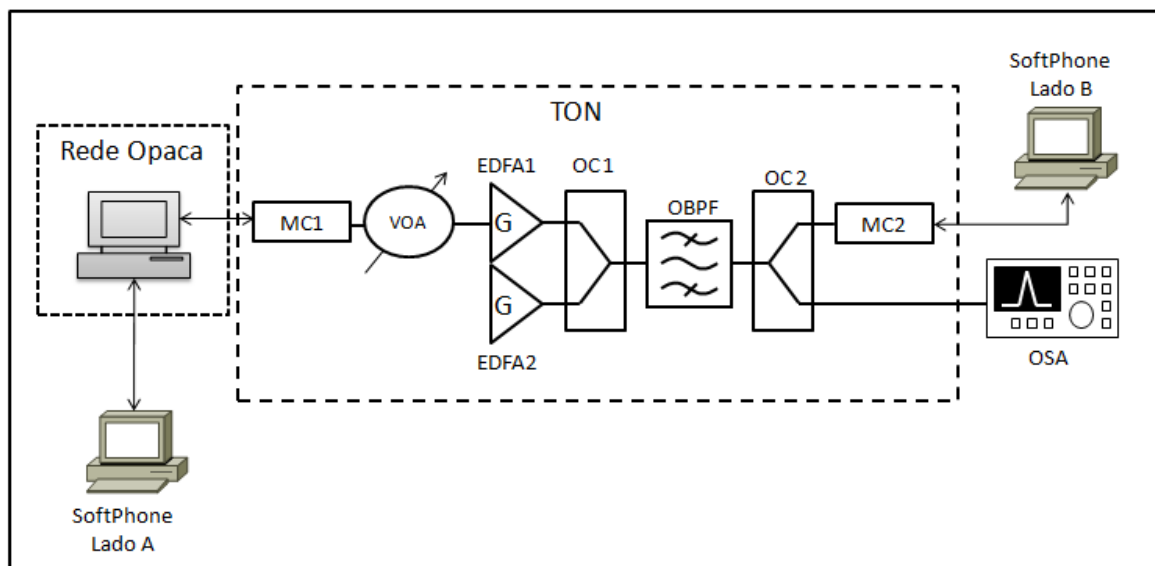
A nuvem com o nome TON mostrada pela Figura 17 emula efeitos causados em redes ópticas transparentes e está detalhada na Figura 19.



**Figura 19** - Emulação de TON

O bloco MC1 representa um conversor de mídia. Ele é responsável por converter o sinal originado no meio elétrico para o meio óptico. Um lado do MC1 foi conectado ao bloco que representa a rede opaca e o outro foi conectado a um atenuador óptico variável, representado por VOA. O objetivo desse bloco foi simular a atenuação provocada pela fibra durante o percurso da origem até o destino. O bloco VOA foi conectado a um amplificador, representado por EDFA1. Esse amplificador foi utilizado para compensar a atenuação, que nesse caso é simulada pelo bloco VOA. A saída de EDFA1 foi conectada a um acoplador óptico, OC1. Ao acoplador OC1 foi conectado outro amplificador, EDFA2. A entrada do EDFA2 foi deixada em aberto para que o ruído gerado por essa condição fosse amplificado e acoplado a sinal obtido na saída de EDFA1. O ruído gerado por EDFA2 emula o ruído ASE gerado pela cascata de amplificadores ópticos em uma TON. A saída do acoplador OC1 foi conectada a um filtro passa faixa, OBPF, centrado no comprimento de onda gerado por MC1. O sinal filtrado foi conectado a outro acoplador, representado por OC2. A função desse acoplador era dividir o sinal em duas porções, uma conectada ao conversor de mídia MC2 e a outra conectada ao analisador de espectro óptico, OSA. O objetivo de MC2 foi converter o sinal de óptico para elétrico e entregá-lo para o computador onde estava o lado B do *SoftPhone*. A parte do sinal destinada ao analisador óptico permitiu capturar os espectros gerados pelos experimentos e também monitorar a OSNR.

Esse arranjo experimental permitiu fixar a potência do ruído e variar a potência do sinal a fim de se obter medidas da qualidade de voz em vários valores de OSNR. A determinação da potência do ruído no valor desejado para cada curva foi configurada variando o ganho do amplificador EDFA2. A potência do sinal foi ajustada com auxílio do atenuador VOA. Esse processo foi repetido para as seguintes potências de ruído: -22.2, -26, -31.6, -34, -35.4 e -39 dBm. As seis curvas obtidas mostraram o desempenho de VoIP em função da OSNR, mas em diferentes faixas de potências de sinal e ruído. A Figura 20 mostra o arranjo experimental detalhado. Nela, estão mostrados juntos, os componentes que emulam a rede opaca e a TON.



**Figura 20** - Arranjo experimental detalhado

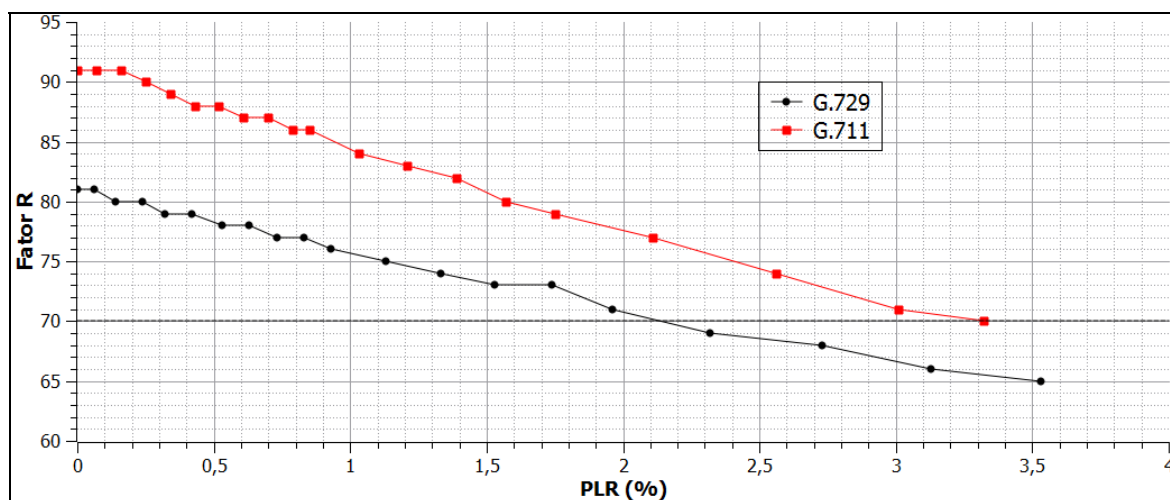
Os experimentos nos dois *setups* consistiram em efetuar chamadas utilizando os codecs G.711 e G.729 e avaliar o seu desempenho computacionalmente. Essa avaliação foi feita em termos da PLR (redes opacas), PER e OSNR (TONs) e do Fator R (ambas as redes). A análise do fluxo RTP foi feita com auxílio de *sniffers*, que são softwares capazes de monitorar uma interface de rede de um computador e capturar todos os dados que trafegam por ela. Nesse trabalho foi utilizado o *Hammer Call Analyzer*, que além de capturar o fluxo de dados de uma interface, também implementa o Modelo E, atribuindo uma nota referente ao Fator R a chamada. As capturas dos dados foram feitas no computador que representava o lado B de uma chamada, mostrado na Figura 20.

## 6 RESULTADOS

Os resultados dos experimentos serão apresentados em duas seções. A seção 6.1 apresentará os resultados referentes a experimentos com redes opacas e a seção 6.2 apresentará os resultados obtidos com experimentos em redes ópticas transparentes.

### 6.1 Redes Opacas

O primeiro experimento realizado avaliou um fluxo RTP submetido a uma rede que emula perda de pacotes. O objetivo desse teste foi identificar qual a taxa de perda de pacotes que, segundo o Modelo E, apresentaria uma má qualidade. A Tabela 3 mostra uma relação entre a escala MOS e a pontuação em termos de Fator R. De acordo com a tabela um Fator R inferior a 70 seria suficiente para que a maioria dos usuários considerassem a chamada com uma qualidade ruim. A Figura 21 apresenta o resultado do experimento.

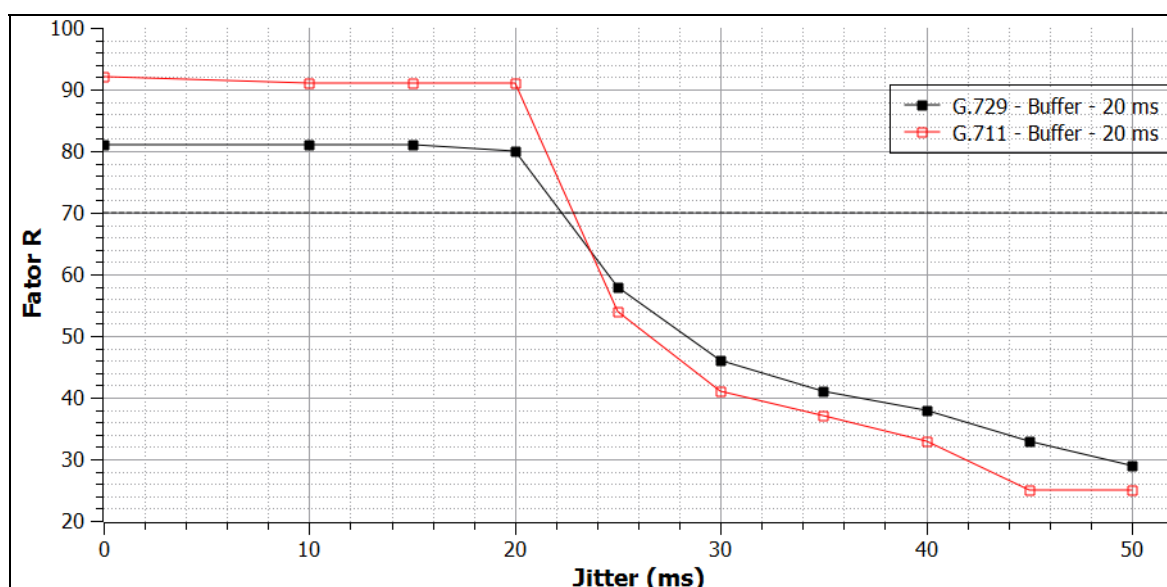


**Figura 21** - Relação entre PLR e Fator R

Utilizando o cenário mostrado pela Figura 18 a taxa de perda de pacotes foi variada de 0 a aproximadamente 3,5%, utilizando uma distribuição uniforme. De acordo com a Figura 21, em condições ideais de desempenho de rede, o codec G.711 já apresenta um melhor desempenho em termos de Fator R do que o codec G.729, pois com PLR de zero o codec G.711 apresenta uma pontuação em média 10 pontos superior a do codec G.729. Para o codec G.729 uma PLR

superior a aproximadamente 2,1% geraria um Fator R inferior a 70 pontos e, para o G.711, seria necessário uma PLR superior a 3,32%.

O segundo experimento em redes opacas, também utilizando o cenário mostrado pela Figura 18 avaliou o desempenho dos codecs em uma rede com variação de atraso (*jitter*). A emulação de rede opaca nesse experimento gerou atrasos variando nos intervalos de 0 a 10, 0 a 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 ms. A variação do atraso em cada intervalo seguiu uma distribuição uniforme. Para esse experimento, o *buffer* para a retirada de *jitter* foi configurado em 20 ms. O resultado do experimento é mostrado pela Figura 22.



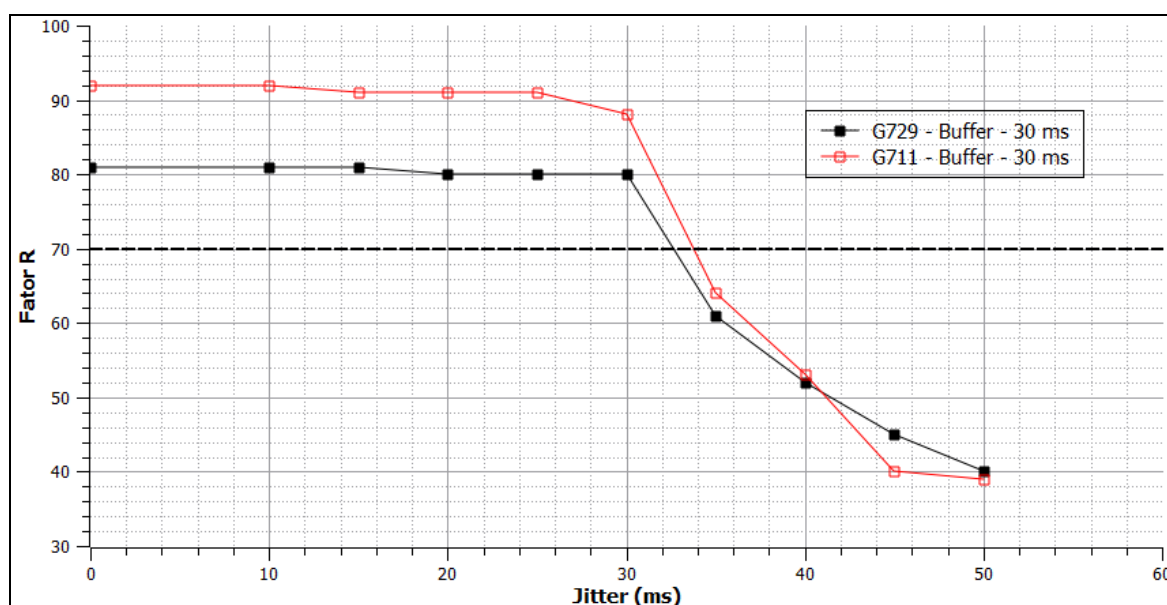
**Figura 22** – *Buffer* para retirada de *jitter* programado em 20 ms

A figura acima mostra que a curva gerada pelos dois codecs começa a decair a partir de 20 ms. Ou seja, o *buffer* para retirada de *jitter* consegue recuperar a variação de atraso no intervalo de 0 a 20 ms. Depois desse limiar a qualidade da voz é fortemente afetada. Uma forma de melhorar o desempenho do fluxo de voz submetido a altos índices de variação de atraso seria aumentar o valor do *buffer* para retirada de *jitter*. Em alguns gateways esses *buffers* são ajustados dinamicamente, de acordo com a variação de atraso medida na rede. Entretanto, os *buffers* não podem ser programados com um valor muito alto, pois podem afetar a qualidade final da voz. Isso porque os *buffers* atrasam todos os pacotes, pelo tempo configurado, nesse caso 20 ms. Esse atraso é necessário para que o *gateway* possa equalizar o tempo entre pacotes que serão enviados para a



aplicação. O estudo do máximo valor possível para o tamanho desses *buffers* não é foco desse trabalho.

Para mostrar a melhoria que poderia ser obtida aumentando valor o *buffer* de retirada de *jitter*, o mesmo fluxo RTP que gerou as curvas da Figura 22 foi decodificado com o *buffer* para retirada de *jitter* programado em 30 ms. A Figura 23 mostra a avaliação da voz nessas condições.



**Figura 23** - *Buffer* para retirada de *jitter* programado em 30 ms

Com a nova configuração, a qualidade da voz começa a ser degradada a partir de uma variação de atraso superior a 30 ms. Teoricamente, aumentando o valor do *buffer*, o fluxo de voz teria uma avaliação melhor. Como já foi dito, esse valor não pode ser muito alto, pois poderia prejudicar a qualidade final da voz.

O codec G.711 suporta uma variação de atraso maior do que o codec G.729. De maneira semelhante ao que ocorreu com relação a PLR, as curvas dos dois codecs decaem praticamente a uma mesma taxa, e o codec G.711 se beneficia de partir de uma avaliação inicial melhor.

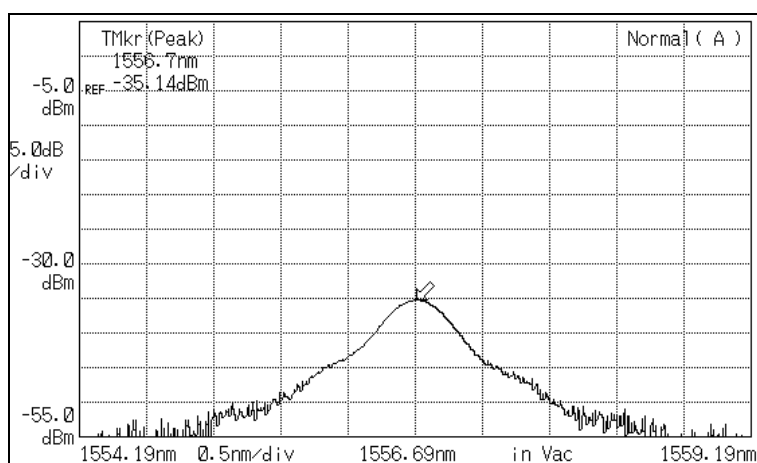
Também se observa nas Figuras 21, 22 e 23 que o melhor desempenho obtido pelos codecs G.711 e G.729 corresponde a fatores R de, respectivamente, 92 e 81. Estes valores foram obtidos na ausência de degradações e estão em acordo com os máximos indicados em [ITU-T, G107].

A próxima seção apresenta os resultados obtidos com os experimentos realizados em redes ópticas transparentes.

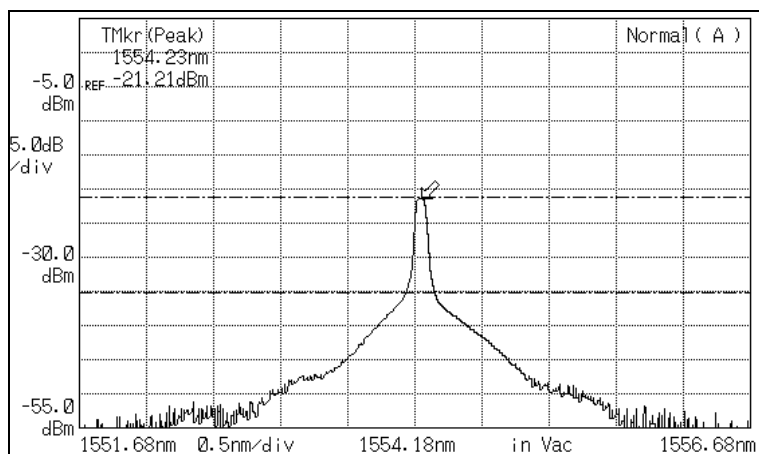
## 6.2 Redes Ópticas Transparentes

Nesta seção apresentamos os resultados obtidos para a emulação da TON. Observamos que, em nossos testes, cada pacote RTP foi encapsulado em um único pacote IP que, por sua vez, foi encapsulado em um único quadro Ethernet. Portanto é correto considerar que a PER dos pacotes RTP é a mesma que a FER. De agora em diante, utilizaremos o termo PER para nos referirmos à PER dos pacotes UDP.

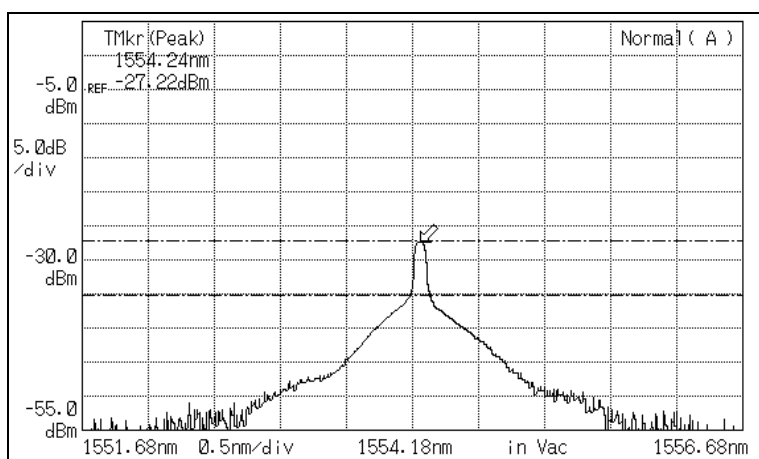
As figuras 24, 25 e 26 mostram espectros obtidos com os experimentos a uma potencia de ruído de -35,14 dBm. A Figura 24 mostra o espectro do ruído e a Figura 25 mostra uma OSNR de ~14 dB e, nessa condição, não há perda de pacotes por parte dos codecs G.711 e G.729. A Figura 26 mostra uma OSNR de ~8 dB e, nesse caso, há perda de pacotes para os dois codecs. Todas as OSNRs deste trabalho foram medidas em 0,05 nm.



**Figura 24 - Espectro do Ruído**



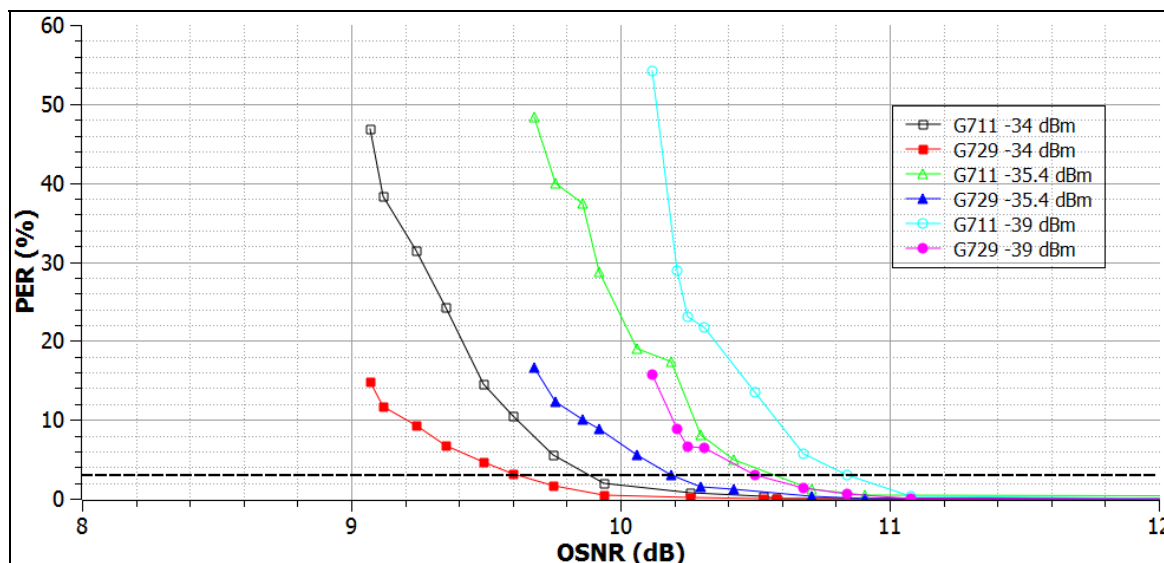
**Figura 25 - Espectro com OSNR de 14 dB**



**Figura 26 - Espectro com OSNR de 8 dB**

Os experimentos realizados em TON's geraram seis curvas para cada codec, retratando o desempenho do fluxo de voz em diferentes valores de OSNR. Para facilitar a compreensão destes resultados, essas curvas serão mostradas em duas figuras distintas.

A Figura 27 mostra as curvas que foram geradas para os três menores valores de potência de ruído considerados em nossos experimentos, -39, -35.4 e -34 dBm. Essas curvas apresentam uma característica em comum, à medida que a potência do ruído aumenta, a OSNR necessária para atingir uma dada PER diminui.



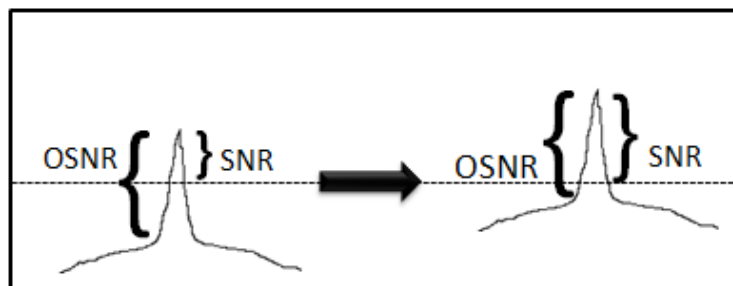
**Figura 27** - Curvas com -34 dBm, -35.4 dBm e -39 dBm de ruído

A linha tracejada mostrada pela Figura 27 indica o valor em que cada curva que atinge uma PER de 3%. Como exemplo, a curva gerada pelo codec G.711, a uma potência de ruído de -39 dBm, gerou a PER de 3% em uma OSNR de aproximadamente 10,9 dB. Nessa condição a potência do sinal estava em torno de -28,1 dBm. A mesma PER foi gerada por outra curva, obtida pelo mesmo codec, a uma potência de ruído de -34 dBm e OSNR de aproximadamente 9,9 dB. A potência do sinal nesse caso estava em -24,1 dBm. De uma curva para outra, a potência do ruído aumentou em 5 dB e, para manter a mesma PER, bastou aumentar a potência do sinal em aproximadamente 4 dB.

A Figura 28 mostra uma possível explicação para esse comportamento. A linha tracejada representa o ruído elétrico provocado pelo processo de foto detecção dos receptores ópticos. Admite-se que a potência deste ruído elétrico seja superior à potência do ruído óptico (após a foto-deteção do mesmo). Portanto, nesta situação, a potência do ruído elétrico é mais significativa na composição da parcela do ruído que será levada em consideração na medida da relação sinal ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) elétrico. De fato, uma vez que todos sinais são convertidos para o domínio elétrico para serem interpretados, observa-se que é a SNR e não a OSNR que vai determinar a qualidade final do sinal.

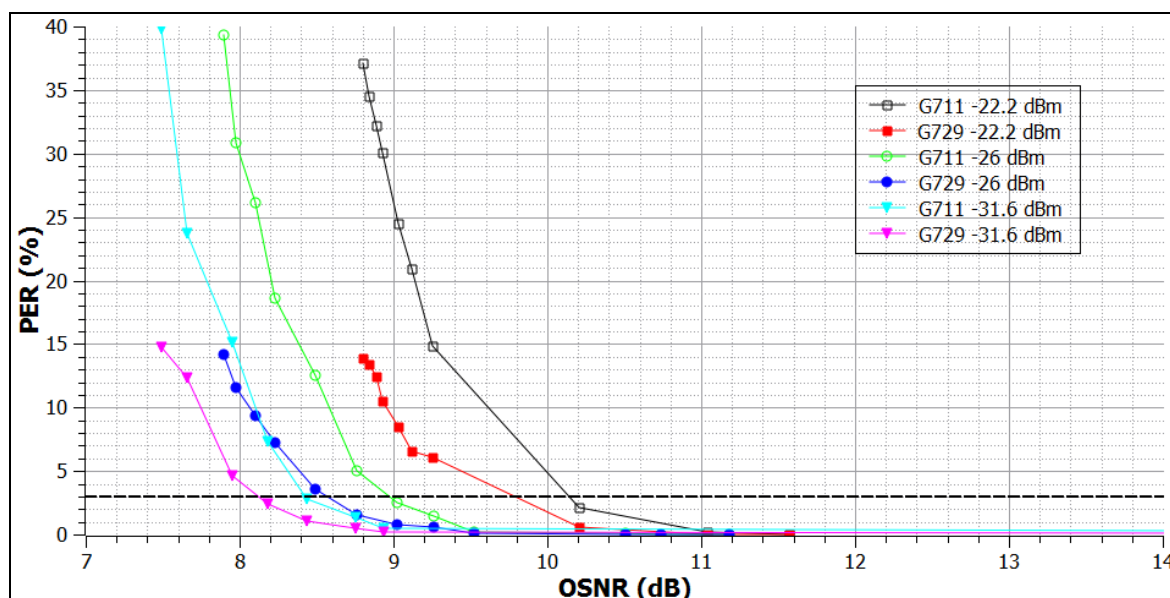
Assim, como ilustrado na Figura 28, o efeito de aumentar a potência do ruído óptico e conseqüentemente a potência do sinal, para manter a OSNR, faz com

que a relação sinal ruído elétrica aumente, melhorando o desempenho de VoIP. A partir do momento em que a potência do ruído óptico, ultrapassa o valor da potência do ruído elétrico, ela passa a ser mais significativa na composição do ruído final.



**Figura 28** - Influência da relação sinal ruído elétrica

A Figura 29 mostra as curvas que foram geradas para os três maiores valores de potência de ruído considerados em nosso experimento, -31,6, -26 e -22,2 dBm. As curvas desta figura possuem um comportamento contrário ao que foi apresentado anteriormente, pois já estão em uma faixa de potência em que a potência do ruído óptico supera a do ruído elétrico. Nesse caso, à medida que a potência do ruído aumenta, é necessária uma maior OSNR para manter a mesma PER. Como exemplo, a curva gerada pelo codec G.711 com potência de ruído de -31,6 dBm mostrou uma perda de pacotes de 3% a uma OSNR de aproximadamente 8,4 dB. Para outra curva, gerada por esse mesmo codec, mas com potência de ruído de -22,2 dBm, a mesma PER de 3% foi gerada a uma OSNR de aproximadamente 10,1 dB. A potência do ruído foi aumentada em 9,4 dB e, para manter a mesma PER, foi necessário aumentar a potência do sinal em aproximadamente 11,1 dB. A razão para este comportamento ainda está sendo investigada.



**Figura 29** - Curvas com -22,2 dBm, -26 dBm e -31,6 dBm de ruído.

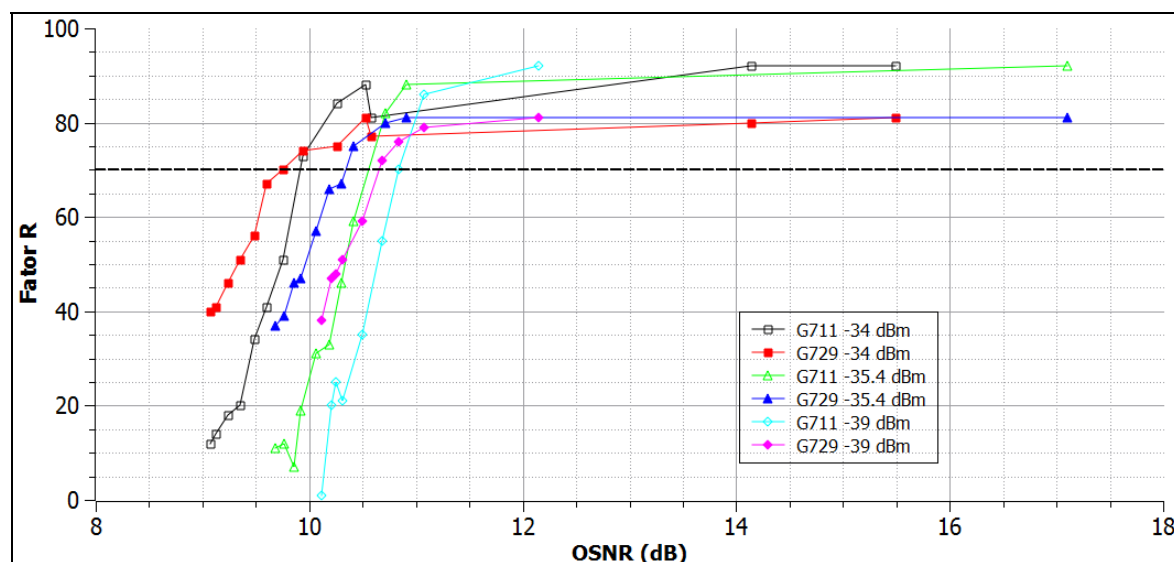
Os resultados mostrados nas Figuras 27 e 29 mostram que o desempenho do sistema VoIP depende não só da OSNR, mas também do valor absoluto da potência de ruído (ou, para uma mesma OSNR, do valor absoluto da potência do sinal). Em princípio, esta dependência, que já foi observada em [Teles, 2010] para sinais de vídeo, não é prevista por (1). De fato, observa-se que na dedução de (1), cujos princípios estão elencados em [Ramaswami, 2010], é pressuposto que a potência do ruído térmico seja desprezível. Conforme explicação anterior (Figura 28), este não parece ser o caso das curvas obtidas para potências de ruído óptico menores que -31.6 dBm (Figura 27).

Outro ponto importante é que, conforme indicado nos espectros desta seção, a OSNR medida nestes experimentos, assim como a que é considerada no procedimento de monitoramento da qualidade de sinais em TONs, corresponde a medidas de pico-a-pico. Isto é, esta OSNR é obtida a partir da divisão da potência da componente de frequência do sinal com maior potência pela potência da componente de frequência do ruído que também apresenta maior potência. Por outro lado, em (1), a OSNR corresponde à divisão da potência total do sinal pela potência total do ruído.

Em termos práticos, estes resultados causam uma implicação importante sobre a forma como o desempenho de TONs é monitorado. Segundo [Pinart, 2007] e [Pinart, 2008] esta monitoração é feita por um *splitter* óptico que deixa a maior

parte do sinal prosseguir por sua rota na rede e que deriva uma pequena porcentagem da potência deste sinal para algum equipamento capaz de monitorar a OSNR (de fato, a OSNR pico-a-pico). No entanto, devido a dependência entre a PER e o valor absoluto da potência de ruído (ou de seu valor de pico), apenas a monitoração da OSNR não é suficiente e deve ser complementada pela monitoração da potência do sinal no ramo do *splitter* que conduz o sinal à sua rota pela rede. Esta monitoração pode ser facilmente implementada utilizando-se um monitor de potência óptica *inline*.

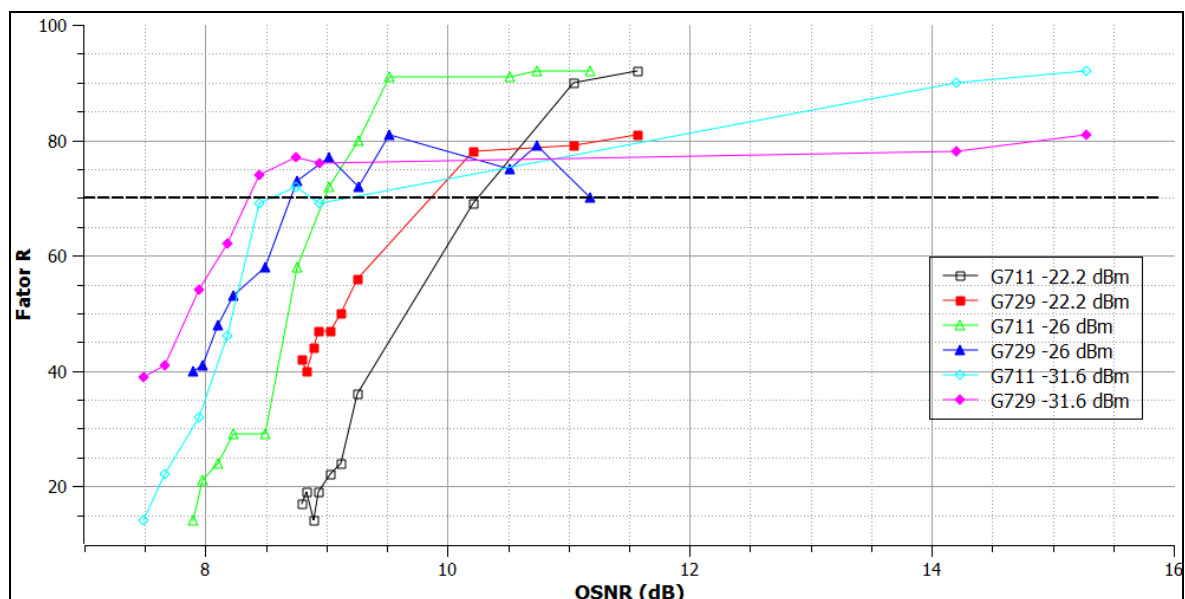
Para analisar a influência da OSNR sobre a percepção de qualidade dos usuários, pode-se relacionar o Fator R com esta grandeza. Para isso foram geradas as Figura 30 e Figura 31. A Figura 30 mostra os resultados dessa relação para curvas que foram geradas para a potência de ruído variando de -34 dBm a -39 dBm. Tomando como exemplo, a curva do codec G.711 a uma potência de ruído de -39 dBm possui uma pontuação acima de 70 na escala do Fator R a partir de uma OSNR de aproximadamente 10.9 dB, enquanto que outra curva, a uma potência de ruído 5 dB superior atinge a pontuação acima de 70 a uma OSNR de aproximadamente 9.9 dB.



**Figura 30** - Relação de Fator R com OSNR

A Figura 31 mostra que a curva gerada pelo codec G.711 a uma potência de ruído de -31.6 dBm possui uma pontuação superior a 70 pontos quando sua OSNR atinge aproximadamente 8,53 dB. Outra curva com o codec G.711 a uma potência

de ruído de  $-22.2$  dBm chega aos 70 pontos a uma OSNR de aproximadamente  $10,23$  dB.



**Figura 31** - Relação de Fator R com OSNR

De forma geral, para que os codecs G.711 e G.729 apresentem um fator R superior a 70, a OSNR deve ser maior que, respectivamente,  $10,9$  (Figura 31) e  $10,4$  dB (Figura 30). A partir de uma  $OSNR = OSNR_{th} \sim 14$  dB o Fator R dos dois codecs analisados torna-se praticamente constante e próximo a seu valor máximo. Portanto, não é necessário operar com valores superiores a  $OSNR_{th}$ . Como no caso da avaliação para as redes opacas, o Fator R observado para o codec G.711 é sempre inferior a 91, ao passo que este valor cai para 82 para o G.729

A Figura 32 e a Figura 33 relacionam a PER obtida na rede totalmente óptica com a PLR obtida na rede opaca. Essa relação é em termos do Fator R. Nas duas figuras foi inserida uma curva de referência indicando a situação em que valores de PER iguais a PLR geraram uma mesma pontuação em termos de Fator R. As outras curvas representam medidas de PER em diferentes faixas ruído. Em geral, as curvas mostram que para um mesmo valor absoluto de PER e PLR, a PLR possui uma avaliação melhor em termos de Fator R.

A explicação para esse comportamento é que no caso da PLR o descarte de pacotes foi uniformemente distribuído. Ao contrario da PLR, a distribuição do



descarte de pacotes na PER foi aleatória, que por sua vez gerou rajadas de pacotes descartados devido a erros no *checksum*. As rajadas de pacotes descartados são consideradas pelo Modelo E e impactam negativamente na pontuação final do Fator R.

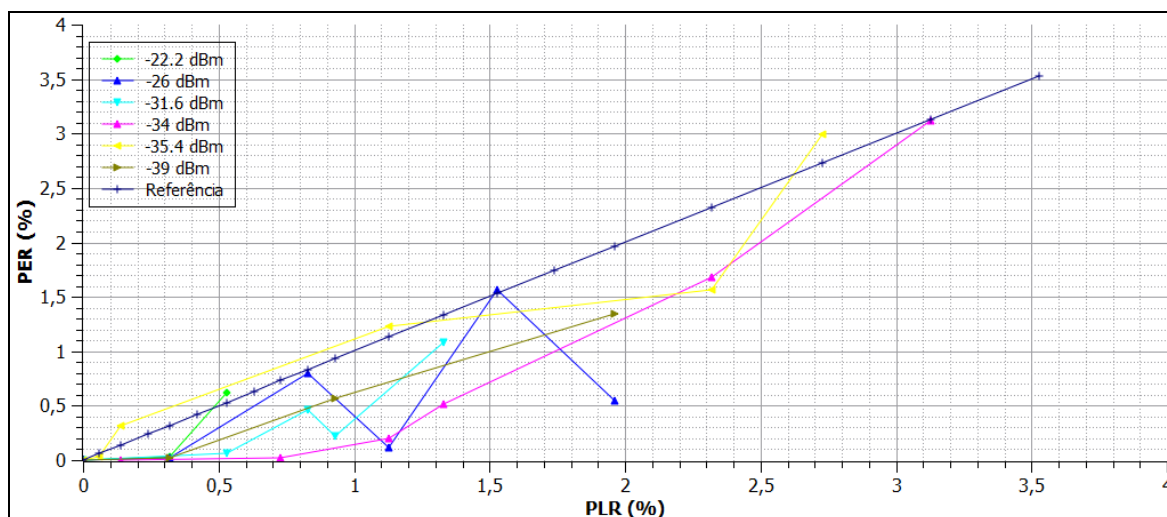


Figura 32 - Relação entre PLR e PER para o codec G.729

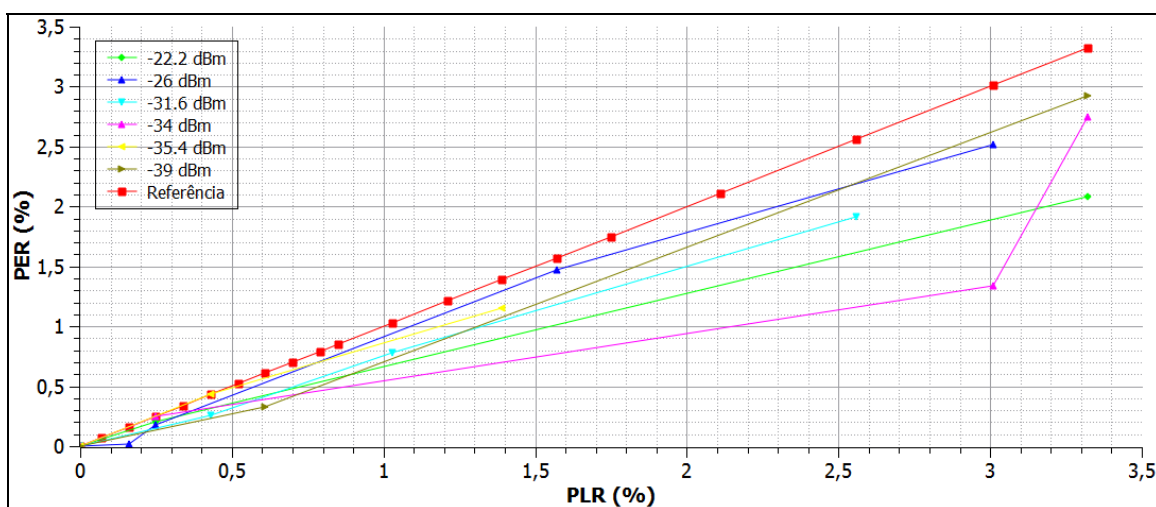
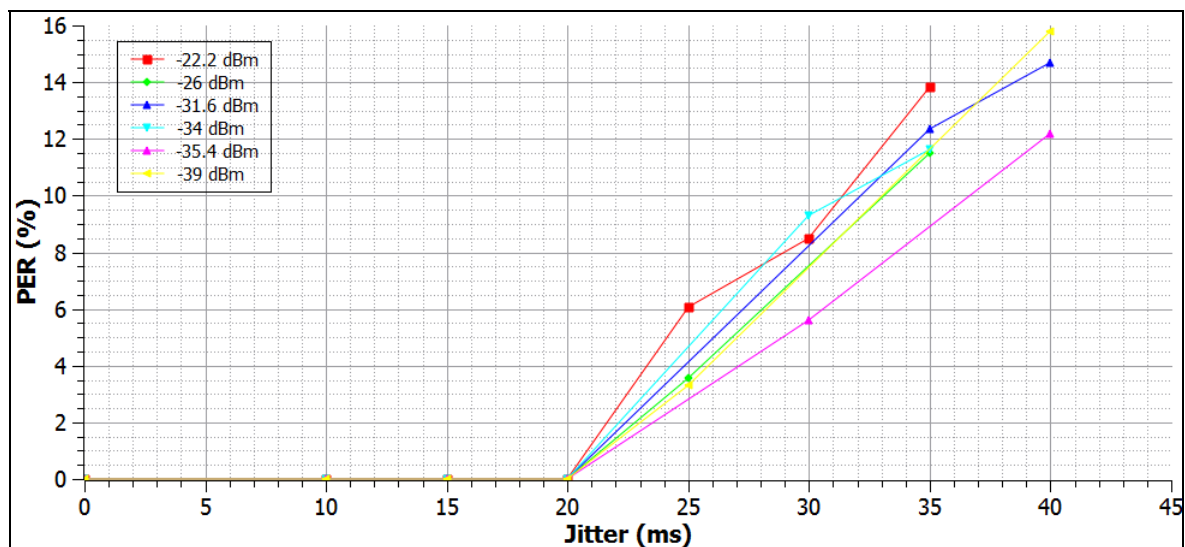
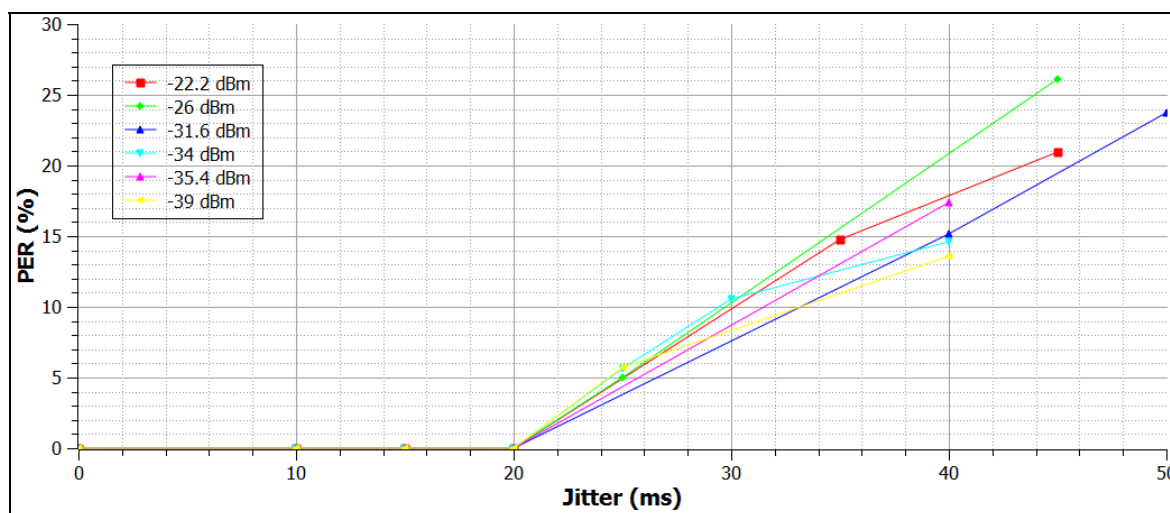


Figura 33 - Relação entre PLR e PER para o codec G.711

A Figura 34 e a Figura 35 mostram a relação entre a PER e o *jitter* em termos de Fator R. Nas duas figuras valores de *jitter* inferiores a 20 ms equivalem a uma PER zero. Isso é devido ao *buffer* para a retirada de *jitter*, que nesse caso está configurado em 20 ms. Para exemplificar o significado destas figuras, notamos (Figura 35) que, por exemplo, um *jitter* de 35 ms em uma rede opaca equivalerá a uma PER de 15% em TONs.

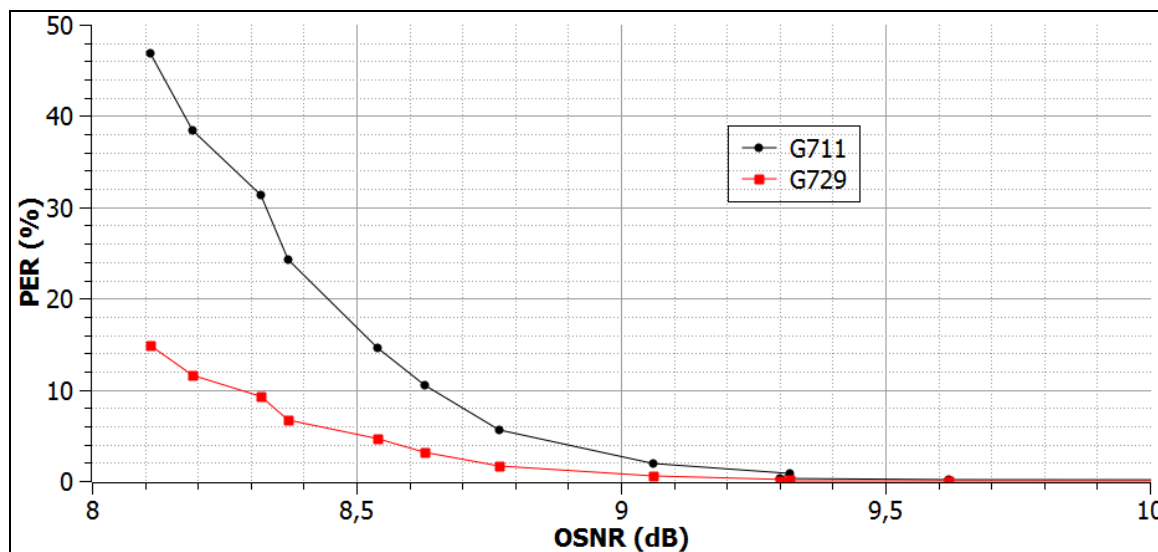


**Figura 34** - Relação entre PER e *Jitter* para o codec G.729



**Figura 35** - Relação entre PER e *Jitter* para o codec G.711

Os comportamentos descritos acima são comuns aos codecs G.711 e G.729. Entretanto há diferenças entre as curvas dos dois codecs para uma mesma potência de ruído. A Figura 36 mostra curvas dos dois codecs submetidos a uma potência de ruído de -34 dBm.



**Figura 36** - Comparação dos codecs G.711 e G.729 em TON's

Os resultados da seção 6.1 mostraram que PERs superiores a 2,14% para o codec G.729 e 3,32% para o codec G.711 gerariam pontuações na escala do Fator R inferiores a 70, significando uma má qualidade da voz. No caso do G.729 uma OSNR de aproximadamente 8,72 dB seria suficiente para gerar tal PER. O codec G.711 teria que ser submetido a uma rede com OSNR de aproximadamente 8,9 dB para gerar 3,32% de PER. Nesse experimento o G.729 apresentou um desempenho ligeiramente melhor do que o G.711, pois o limiar para uma boa qualidade de voz seria obtido a uma OSNR mínima de 8,72 dB para o codec G.729. À essa OSNR o codec G.711 já apresentaria uma PER de aproximadamente 7,2% que praticamente inviabilizaria a utilização de VoIP. O melhor desempenho do G.729 se deve ao tamanho do pacote RTP gerado. A diferença entre os pacotes gerados pelos dois codecs está no tamanho do *payload*. O G.711 possui 160 bytes de *payload*, enquanto que o G.729 possui apenas 20 bytes, considerando um período de empacotamento de 20 ms. Como já foi dito, esse trabalho não considerou nenhum mecanismo de FEC, então erros em qualquer bit pertencente ao pacote provocaria o descarte do mesmo. Assim, quanto maior o tamanho do pacote, maior a probabilidade de haver um bit afetado pelo ruído ao ponto de ser decodificado erroneamente.

Uma forma de melhorar o desempenho desses codecs em redes TON, seria reduzir o período de empacotamento, que por sua vez reduz o tamanho do *payload* que, conseqüentemente reduziria o tamanho do pacote, como mostrado

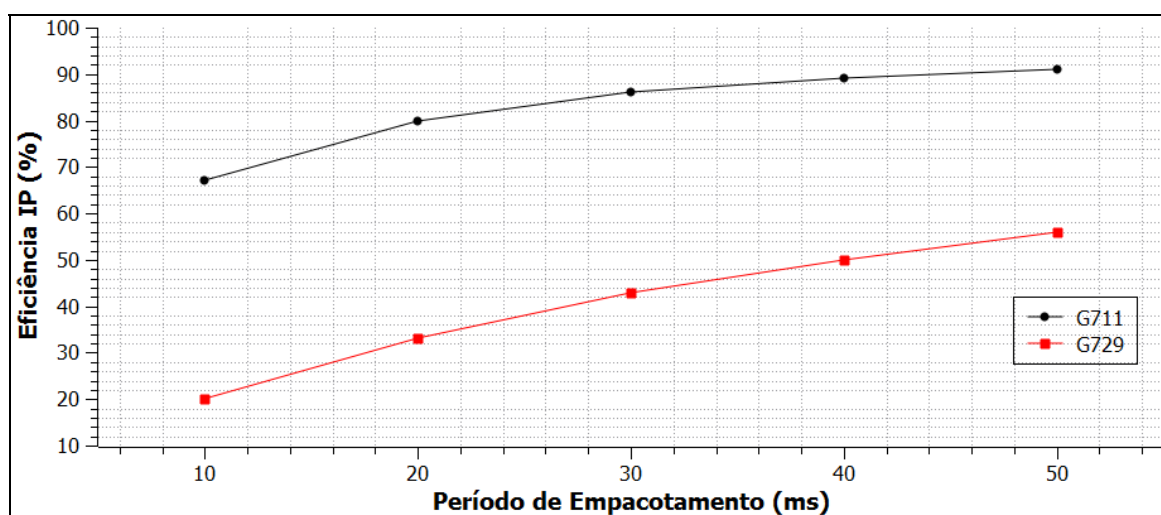
pela Tabela 4. A Tabela 4 mostra os tamanhos do *payload* para os períodos de empacotamento de 10, 20, 30, 40 e 50ms.

**Tabela 4 - Tamanho do *Payload***

Período de Empacotamento	G.711	G.729
10	80	10
20	160	20
30	240	30
40	320	40
50	400	50

No entanto, essa alteração também reduziria a eficiência da rede como mostra a Figura 37. O cálculo da eficiência da rede mostrada pela figura acima leva em consideração os cabeçalhos gerados pelo protocolo IP, 20 bytes, protocolo UDP, 8 bytes e RTP 12 bytes. A soma de todos os cabeçalhos chega a 40 bytes e esse valor é fixo independentemente do tamanho do *payload*.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Payload RTP(Bytes)}}{(\text{Cabeçalho IP} + \text{Cabeçalho UDP} + \text{Cabeçalho RTP} + \text{Payload RTP})\text{Bytes}} \quad (7)$$



**Figura 37 - Eficiência de Rede**

A redução do período de empacotamento de 20 ms para 10 ms, por exemplo, reduziria a eficiência da utilização da rede em 13% para os dois codecs, pois com o mesmo cabeçalho o pacote IP transportaria um *payload* menor. Em se tratando

de redes TON, isso não seria um fator impactante devido a sua grande disponibilidade de banda. Então, essa solução poderia ser adotada.

Os experimentos deste trabalho foram realizados com um par de conversores multimídia cuja frequência do laser não está na grade de canais WDM do ITU. De fato, ao longo dos experimentos, observou-se que esta frequência variava com o tempo. Foi necessário manter a temperatura em  $\sim 17^{\circ}\text{C}$  para evitar essas variações e permitir que as medidas fossem confiáveis. Uma possibilidade para continuar este trabalho seria refazer as medidas colocando-se um transponder na saída do conversor de mídia conectado ao servidor VoIP (isso fixaria a frequência do laser na grade WDM do ITU) e substituir o filtro utilizado por um multiplexador óptico normalmente utilizado em TONs.

## 7 CONCLUSÕES

O trabalho avaliou experimentalmente o comportamento de dois codecs utilizados em VoIP, em redes opacas e redes ópticas transparentes. Os codecs utilizados foram o G.711 e o G.729.

A avaliação foi feita utilizando o Modelo E, desenvolvido pelo ITU-T. De acordo com o Modelo E, uma avaliação do fluxo RTP em termos do Fator R inferior a 70 pontos, indicaria uma má qualidade da voz. Em redes opacas foi emulada uma situação de perda de pacotes, e o codec G.711 suportou uma perda 1,2% superior ao codec G.729, mantendo a pontuação em termos de Fator R superior a 70 pontos. Na emulação de redes com variação de atraso, os dois codecs apresentam um comportamento semelhante, sendo fortemente afetados para variações de atraso superiores ao valor do *buffer* para retirada de *jitter*.

No caso de redes ópticas transparentes foi observado um comportamento curioso. Para a faixa de potência entre -39 a -34 dBm o aumento da potência do sinal e do ruído, resultaram em uma OSNR menor para manter uma qualidade aceitável de voz, o que significa uma avaliação acima de 70 pontos em termos de Fator R. Esse experimento demonstrou que nessa faixa de potência não é a OSNR que influencia na qualidade final do fluxo de voz, sendo a SNR (relação sinal ruído elétrica), após o processo de foto-detecção, quem determinará a qualidade final da voz.

Para a faixa de potência de -31.6 a -22.2 dBm o comportamento foi contrário, ou seja ao aumentar a potência do ruído e do sinal foi necessário aumentar a OSNR para manter uma avaliação superior a 70 pontos. Esse comportamento será estudado em trabalhos futuros.

Nos dois casos relacionados com redes ópticas transparentes citados acima, o codec G.729 apresenta um desempenho ligeiramente superior ao G.711, pois ele mantém uma pontuação superior a 70 pontos a uma OSNR 0,2 dB inferior a obtida com o codec G.711. O melhor desempenho do G.729 se deve ao tamanho do seu *payload*, que é inferior ao codec G.711. Como nesse caso a diferença entre os dois codecs é pequena, e considerando o melhor desempenho do codec G.711 na rede opaca, seria interessante utilizar o codec G.711 em redes ópticas

transparentes, mas com um *payload* menor. Para isso, é necessário configurar os *gateways* para utilizar um período de empacotamento menor.

O trabalho também apresentou uma relação entre os parâmetros que degradam o fluxo de VoIP nas duas redes, opacas e totalmente ópticas. Essa relação é importante para que os gerentes de redes planejem a migração das redes opacas para as redes ópticas transparentes. Além disso, o trabalho mostrou que a QoS de TON's precisa levar em conta a OSNR e, ao contrário do que sugerem outros trabalhos, o valor absoluto da potência do sinal (ou do ruído). Esta parece ser uma contribuição importante deste trabalho.

## 8 REFERÊNCIAS

Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics. 3<sup>o</sup> Ed. New York. Academic Press. 2001.

Agrawal, GP. Supercontinuum Laser Source, R.R. Alfano, Ed. Springer-Verlag, Heidelberg. 1989.

Baliga, J., Ayre, R., *et at.* Energy Consumption in Optical IP Networks. Journal of Lightwave Technology. Vol. 27. N<sup>o</sup> 13. 2009.

Blumenthal, D. J., Olsson, B. E., *et al.* All-Optical Label Swapping Networks and Technologies. Journal of Lightwave Technology. Vol. 18. N<sup>o</sup> 12. 2000.

Bonani, L. H., Padua, F. J. L., Barbosa, F. R., Moschim, E. Optical Packet Switching Access Networks Using Time and Space Contention Resolution Schemes. Lecture Notes in Computer Science, Berlin, v. 3124, p. 272-281, 2004.

Fawaz, W., Daheb. B., *et al.* Service Level Agreement and Provisioning in Optical Networks. IEEE Communications Magazine. 2004.

Hasegawa, A., Brinkman, W. F. "Tunable coherent ir and fir sources utilizing modulational instability," IEEE J. of Quantum Electron., vol. QE-16, no 7, pp. 694-697, Jul. 1980.

Haykin, S. Communications Systems.4<sup>a</sup> Ed. New York: Wiley, 2000. 816p.

IETF. RFC 768 1980.

IETF. RFC 793, 1981.

IETF, RFC 1633, 1994.

IETF. RFC 1889, 1996.

IETF, RFC 2205, 1997.

IETF RFC 2475, 1998.

IETF. RFC 2933, 2000.

IETF RFC 3032, 2001.



Ippen, I. P., Shank, C. V., Gustafson, T. K., "Self-phase modulation of picosecond pulses in optical fibers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no 4, pp. 190-192, Feb. 1974.

ITU-T G.107. ITU-T Rec. G.107 The E-Model, a computational model for use in transmission planning. 2005.

ITU-T G.711. ITU-T Rec. G.711 Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies, 1972.

ITU-T G.729. ITU-T Rec. G.729 Coding of Speech at 8 kbit/s Using Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear Prediction (CS-ACELP). 1996.

ITU-T P.800. ITU-T Rec. P.800 Methods for subjective determination of transmission quality. 1996.

Karapantazis, S., Pavlidou F-N. VoIP: A comprehensive survey on a promising technology. *Computer Network – Elsevier*. 2009.

Kurose, J. F., Ross, K. W. *Redes de Computadores e a Internet*. 3ª Ed. São Paulo: Pearson Education, 2003. 548p.

Lathi, B. P. *Signal Processing And Linear Systems*. 1ª Ed. Oxford USA Trade, 1998. 860p

Marcuse, D. "Pulse distortion in single-mode fibers," *Appl. Opt.*, vol. 19, no 10, pp. 1653- 1660, May. 1980.

Matéria sobre crescimento da Banda Larga. In: *Telebrasil – Associação Brasileira de Telecomunicações*, 2011, Brasília. Disponível em : [http://www.telebrasil.org.br/artigos/outros\\_artigos.asp?m=1068](http://www.telebrasil.org.br/artigos/outros_artigos.asp?m=1068). Acessado em 04/04/2011.

Matéria sobre crescimento de VoIP. In: *Jornal Folha de S. Paulo*, 2001, São Paulo. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/889936-agencia-defende-embratel-contra-skype.shtml>. Acessado em 06/04/2011.

Merazka, F. Forward Error Correction Concealment Method for CELP-Based Coders in Packet Networks. *World Congress on Engineering*. 2010.

Mukherjee, B. Optical WDM Networks. New York. Springer. 2006.

Naka, A., Saito, S. "A noise-loading method for evaluating in-line amplifier systems," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no 8, pp. 925-927, Aug. 1992.

Netem. <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/netem>. Acessado em 15/5/2011.

Oliveira, J. C. R. F. Amplificadores Ópticos com Controle Automático de Ganho para Aplicação em Redes Ópticas Reconfiguráveis. 2007. 173f Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas – Unicamp.

Pinart, Carolina. Alternatives for in-service BER estimation in all-optical networks: towards minimum intrusion. Journal of Computers. Vol. 2. Nº 3. 2007.

Pinart, Carolina. Relation of OSNR and PLR for nonintrusive fault detection in all-optical IP-Ethernet-WDM. Journal of Optical Networking. Vol 7. Nº 4. 2008.

Pesquisa Ibope sobre acesso à internet. In: Ibope – Instituto Brasileiro de Opinião Pública e Estatística, 2011, São Paulo. Disponível em: <http://www.ibope.com.br/calandraWeb/servlet/CalandraRedirect?temp=5&proj=PortalIBOPE&pub=T&db=caldb&comp=Noticias&docid=EA0526673CE1740D832578570054B23B>. Acessado em 04/04/2011.

Ramaswami, R., Sivarajan. K. N., Sasaki. G. H. Optical Network: A Pratical Perspective. 3<sup>a</sup> Ed. Morgan Kaufmann. 2010. 928p.

Ribeiro, J. A. J. Características da Propagação em Fibras Ópticas. Revista Telecomunicações – Inatel. Março de 1999.

Sat , A. e Wah, W. B. Analyzing Voice Quality in Popular VoIP Applications. IEEE Computer Society, 2009.

Su, Z., Zhu, X., Sibbett, W. "Conversion of femtosecond pulses from the 1.5- to the 1.3 region by self-phase-modulation mediated four-wave mixing," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 10, no 6, pp. 1051-1053, Jun. 1993.

Tanenbaum, A.S. Redes de computadores. 4<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003. 950p.

Teles, V. I. Análise experimental da degradação imposta por sistemas ópticos a aplicações IP. 2010. 73f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Ubuntu. <http://www.ubuntu-br.org/>. Acessado em 15/5/2011.

Wong, E. W. M., Baliga, J., *et al.* A New Method for Blocking Probability Evaluation in OBS/OPS Networks With Deflection Routing. *Journal of Lightwave Technology*. Vol. 27. Nº 23. 2009.

Zang, H. Jue, J. P., *et al.* Dynamic Lightpath Establishment in Wavelength-Routed WDM Networks. *IEEE Communications Magazine*. 2001.