

Análise de Redes Ópticas WDM/OCDM

Fábio Renan Durand e Edson Moschim

Resumo— Este trabalho apresenta a análise de redes ópticas com multiplexação por divisão de comprimento de onda e multiplexação por divisão de códigos ópticos (WDM/OCDM). Como principais resultados da análise observou-se que o emprego de conversores de códigos ópticos aumenta a desempenho da rede quando comparado ao emprego de conversores de comprimento de onda.

Palavras-Chave— Redes Ópticas, Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM), Multiplexação por Divisão de Códigos Ópticos (OCDM).

Abstract—This work presents an analysis about optical networks with wavelength division multiplexing and optical code-division multiplexing (WDM/OCDM). The main results show that the impact of optical code converters in the network performance is better when compared with optical wavelength converters.

Index Terms—Optical Networks, Wavelength Division Multiplexing (WDM), Optical Code-Division Multiplexing (OCDM).

I. INTRODUÇÃO

O crescimento rápido e global de tráfego em função da explosão da popularidade da Internet está acelerando o desenvolvimento e a implementação da tecnologia de multiplexação por divisão de comprimentos de onda WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) como uma forma de explorar a elevada capacidade de transmissão das fibras ópticas [1]. Esta tecnologia evoluiu de meio físico de conexão ponto-a-ponto e passou a ser utilizada como camada de transporte [1][2]. As redes ópticas que empregam a tecnologia da camada de transporte WDM estabelecem caminhos ópticos (*lightpaths*) entre os nós por meio de *crossconnects* ópticos, e desta forma, obtém-se transparência, elevada capacidade de transmissão e escalabilidade [1]. Um aspecto importante neste tipo de rede é o gerenciamento do estabelecimento das *lightpaths*, pois os comprimentos de onda consistem de um elemento limitado. Nas redes WAN (*Wide Area Network*) se observa que a limitação do número de comprimentos de onda ocorre em função da estabilidade das fontes ópticas que

limitam o espaçamento entre os canais na região de amplificação dos amplificadores EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) [3]. Por outro lado, nas redes MANs (*Metropolitan Area Network*) e, principalmente em LANs (*Local Area Network*), a principal limitação é o fato do número de comprimentos de onda ser limitado a aproximadamente ao número de nós da rede [4]. Uma alternativa no caso de redes LAN e MAN é o emprego da tecnologia de acesso múltiplo por divisão de código OCDMA (*Optical Code-Division Multiple Access*). Na tecnologia OCDMA cada bit é dividido em n períodos de tempo denominados *chips* e uma seqüência de *chips* forma uma assinatura denominada *codeword*, onde cada usuário da rede OCDMA possui uma assinatura distinta, desta forma todos os bits “1” a serem transmitidos são codificados no formato da assinatura e os bits “0” não são transmitidos. O sinal codificado é transmitido para todos os nós da rede e o *crosstalk* entre os usuários ocorre principalmente pela interferência de acesso múltiplo MAI (*Multiple-Access Interference*) [5]. O OCDMA pode operar de forma assíncrona, sem controle centralizado, sem colisões, com baixo tempo de atraso e existe a possibilidade de oferecer QoS (*Quality of Service*) na camada física. Porém, mesmo tendo em vista o constante desenvolvimento de redes OCDMA, a tecnologia de multiplexação por divisão de código OCDM (*Optical Code-Division Multiplexing*) empregada como rede de transporte não está sendo largamente explorada [4]. Uma alternativa é a utilização de redes híbridas WDM/OCDM. Nestas redes a camada de transporte é composta por caminhos ópticos virtuais baseados em comprimento de onda e códigos ópticos. Neste contexto realiza-se neste trabalho uma análise de redes ópticas híbridas que empregam as tecnologias WDM e OCDM, onde o principal objetivo é ilustrar como o emprego destas tecnologias pode aumentar a capacidade e a versatilidade das redes ópticas. Também será investigado o impacto do uso de conversores de comprimento de onda e conversores de códigos ópticos nestas redes. O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II ilustra a evolução e a arquitetura das redes ópticas híbridas WDM/OCDM. Na Seção III apresenta-se a metodologia utilizada na análise do desempenho das redes. Na Seção IV são ilustrados os principais resultados e finalmente, na Seção V são discutidas as principais conclusões obtidas no trabalho.

Fábio Renan Durand e Edson Moschim, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, Brasil, E-mails: durand@dsif.fee.unicamp.br, moschim@dsif.fee.unicamp.br.

II. REDES WDM/OCDM

A. Evolução Histórica

As primeiras aplicações de redes ópticas WDM/OCDM foram inicialmente propostas e analisadas em [4]. Neste trabalho investigou-se a utilização de caminhos ópticos virtuais baseados em códigos ópticos bipolares. No estabelecimento destes caminhos ópticos realizava-se a conversão de códigos ópticos, porém a restrição da conversão de comprimento de onda era mantida. O foco desta análise estava relacionado com o desempenho dos conversores de códigos ópticos bipolares adicionados aos *crossconnects*. Assim, as principais investigações foram com relação ao número de códigos ópticos disponíveis na rede e a interferência causada entre códigos ópticos de diferentes comprimentos de onda. Em [6] foi proposta a utilização de roteamento de redes ópticas de pacotes WDM baseado em códigos ópticos ortogonais OOC (*Optical Orthogonal Code*). Porém, somente considerações sobre a possibilidade da implementação foram discutidas juntamente com possíveis soluções teóricas. Já em [7] foi proposta a utilização de códigos ópticos bipolares como *labels* ópticos para o roteamento de protocolo IP mapeado diretamente sobre a camada óptica. Nesta configuração utilizava-se a correlação óptica dos códigos para efetuar o roteamento por meio de comutadores ópticos de *labels* PLSR (*Photonic Label Switching Router*). Estes roteadores eram compostos por processadores e conversores de *labels* ópticos. O emprego de roteamento por *labels* passou a ser apontado como uma forma de aumentar a capacidade de comutação dos roteadores, pois nesta tecnologia a informação transmitida se mantém totalmente no domínio óptico e só o *label* é processado eletronicamente ou opticamente [1]. Outra vantagem da utilização de *labels* é a possibilidade de integração entre o plano de controle IP e a camada óptica WDM por meio do GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) [3][8]. Seguindo a tendência do emprego de códigos ópticos como *labels* foi proposto em [9] uma arquitetura OMPLS (*Optical MPLS*) onde os *labels* eram compostos de códigos ópticos OOC e comprimentos de onda. Nesta arquitetura todo o processamento dos *labels* é realizado no domínio óptico. Em [10] foi proposta e analisada uma arquitetura de roteamento baseada em *labels* compostos por códigos ópticos bipolares. Nesta arquitetura o sistema de comutação pode ser na forma de pacotes, rajadas ou circuitos. A principal vantagem desta arquitetura é que o processamento dos *labels* é realizado no domínio óptico e sua velocidade de processamento é limitada somente pelo tempo de propagação no correlator óptico. Portanto, analisando os trabalhos que englobam redes WDM/OCDM se observa que ainda não foi focado o desempenho destas redes em função de parâmetros como o número de conversores de comprimentos de onda e o número de conversores de códigos ópticos que é o objetivo deste trabalho.

B. Arquitetura

Nesta seção será ilustrada uma arquitetura generalizada das redes WDM/OCDM discutidas acima, desta forma não será aprofundada a forma como os códigos ópticos são processados, pois depende do tipo de código escolhido. A

Fig. 1 ilustra a estrutura básica de um roteador óptico, nele os comprimentos de onda são demultiplexados e encaminhados até o núcleo de comutação (R_i) do roteador onde o sinal é processado e encaminhado até a interface de saída.

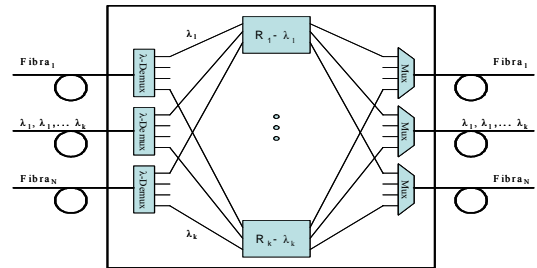


Fig. 1. Comutador Óptico

Na Fig. 2. ilustra-se o núcleo do roteador (R_i) onde o sinal é decodificado por meio de códigos ópticos.

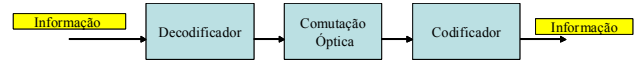


Fig. 2. Núcleo do Comutador (R_i)

Nesta arquitetura o sinal óptico multiplexado em códigos ópticos é decodificado e o destino da informação é determinado pela configuração do comutador óptico. Na Fig. 3. ilustra-se o núcleo do roteador (R_i) para redes WDM/OCDM onde o roteamento é realizado por meio do processamento de *labels*.

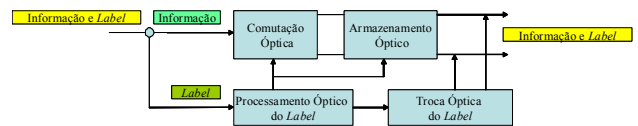


Fig. 3. Núcleo do Comutador (R_i)

Nesta arquitetura a informação e o *label* são separados e somente o *label* é processado preferencialmente no domínio óptico. Após o ajuste do comutador óptico em função do processamento do *label* ocorre a troca de *label*. Este processo é necessário em função de cada *label* ser definido unicamente entre dois roteadores. O *label* define o caminho comutado LSP (*Label Switched Path*) entre dois roteadores [3].

C. Códigos Ópticos

Em geral, os esquemas de codificação OCDM são classificados em coerentes e não coerentes, dependendo do grau de coerência da fonte de luz empregada [4][9]. Porém, a principal diferença entre estes sistemas é que nos sistemas não coerentes empregam-se códigos ópticos unipolares que são obtidos por modulação em intensidade, já nos sistemas coerentes empregam-se códigos ópticos bipolares que são obtidos por modulação por mudança de fase. Assim, os códigos unipolares apresentam uma pseudo-ortogonalidade e possuem uma relação sinal/ruído de interferência SIR (*signal-to-interference noise ratio*) menor que os códigos bipolares

empregados em sistemas coerentes. Esta característica fornece um ganho muito alto de processamento aos sistemas coerentes, porém as dificuldades de implementação ainda dificultam sua utilização [10]. A Tabela I resume as principais diferenças dos códigos ópticos coerentes e incoerentes.

TABELA I
COMPARAÇÃO DOS CÓDIGOS ÓPTICOS OCDM

	Incoerente	Coerente
Tipo de Código	Unipolar	Bipolar
Modulação	Intensidade	Fase
Ortogonalidade	Pseudo-Ortogonal	Ortogonal
SINR	\sim Chip	\sim Chip ²

III. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Neste trabalho a análise de desempenho das redes ópticas WDM/OCDM emprega o modelo analítico proposto em [11] para redes totalmente ópticas e estendido para o caso de redes empregando roteamento por códigos OOC e comprimento de onda [9]. Este modelo foi escolhido em função da sua simplicidade e precisão nos resultados quando comparado com outros métodos analíticos descritos por Birmam [12], Kovačević [13] e Subramaniam [14]. Posteriormente serão empregados métodos numéricos de cálculo de probabilidade de bloqueio. Nas análises que seguem foi considerada uma rede com N comprimentos de onda e C códigos ópticos por comprimento de onda, desta forma existem em cada link $N \times C$ canais e assume-se que cada link possua um tráfego uniforme ρ . A análise do número máximo de códigos ópticos OOC que podem ser utilizados por comprimento de onda foi realizada baseando-se em [15]. Desta forma, a probabilidade de erro de conversão de código, também denominada taxa de erro de conversão de código é dada por seus limites superior e inferior que corresponde ao caso síncrono e assíncrono do *chip*, respectivamente:

$$P_{Sup} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{Th - (C-1) \frac{W^2}{2L}}{\sqrt{2 \left[\sigma_r^2 + (C+1) \frac{W^2}{2L} \left(1 - \frac{W^2}{2L} \right) \right]}} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{W + (C-1) \frac{W^2}{2L} - Th}{\sqrt{2 \left[\sigma_r^2 + (C-1) \frac{W^2}{2L} \left(1 - \frac{W^2}{2L} \right) \right]}} \right) \quad (1)$$

$$P_{Inf} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{Th - (C-1) \frac{W^2}{2L}}{\sqrt{2 \left[\sigma_r^2 + (C-1) \frac{W^2}{2L} \left(\frac{1}{3} - \frac{W^2}{4L} \right) \right]}} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{W + (C-1) \frac{W^2}{2L} - Th}{\sqrt{2 \left[\sigma_r^2 + (C-1) \frac{W^2}{2L} \left(\frac{1}{3} - \frac{W^2}{4L} \right) \right]}} \right) \quad (2)$$

onde Th é o valor de limiar de decisão do decodificador, W é o peso do código, L é o comprimento do código e σ_r é a variância da interferência do sinal. Esta formulação pode ser empregada para conversores de códigos ópticos OOC baseados em conversores SOA (*Semiconductors Optical Amplifiers*) nas configurações TOAD (*TeraHertz Optical Asymmetric Demultiplexer*) e SMZ (*Symmetric Mach-Zehnder*) [9].

IV. RESULTADOS

A análise de resultados tem início com o cálculo da probabilidade de erro de conversão de código para determinar o número máximo de códigos ópticos por comprimento de onda. Na Fig. 4. ilustra-se a taxa de erro de conversão de código em função do limiar de detecção entre bits 0 e 1. Os códigos ópticos ilustrados possuem peso 10 e comprimento 1500. Foi analisada a taxa de erro de conversão para um sistema com um número de códigos OOC igual a 7 e 16 códigos.

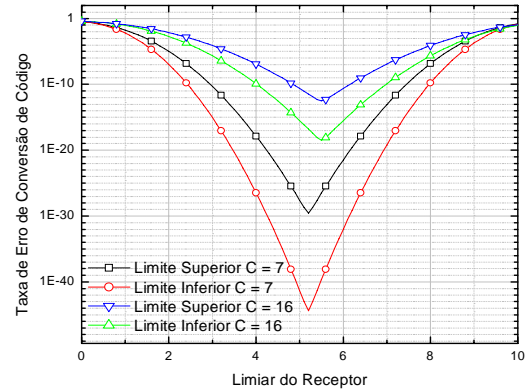


Fig. 4. Taxa de erro de conversão de código em função do limiar de detecção

Por meio desta figura se observa que a maior taxa de erro de conversão de código ocorre para o limite superior, tanto para uma quantidade de códigos igual a 7 como igual a 16. Outra observação é que ocorre o aumento da taxa de erro de conversão em função do aumento do número de códigos. Esta análise é estendida na Fig. 5. onde ilustra-se a taxa de erro de conversão de código em função do número de códigos presentes em cada comprimento de onda do sistema.

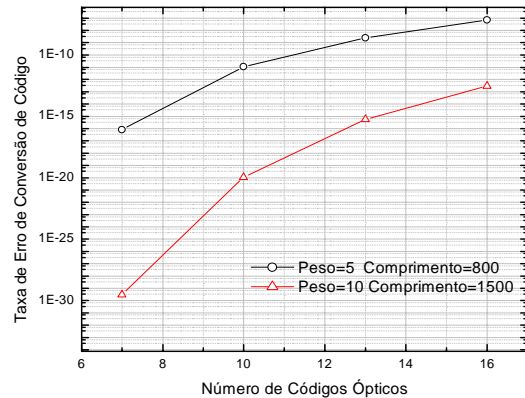


Fig. 5. Taxa de erro de conversão de código em função do número de códigos

Na Fig. 5. foram analisadas duas configurações de código ópticos OOC. Uma configuração com peso 5 e comprimento 800 e outra com peso 10 e comprimento 1500. Estas configurações de códigos foram escolhidas para análise por terem sido descritas em [9]. Neste trabalho será considerado um número máximo de códigos por comprimento de onda igual a 12, assim é possível obter uma baixa taxa de erro de conversão de código, por exemplo, 10^{-9} para códigos com peso 5 e comprimento 800, sem comprometer o aumento da capacidade do sistema. O aumento da taxa de erro de

conversão de código observado nas Fig. 4. e 5. ocorre neste caso em função da interferência de múltiplo acesso MAI (*Multiple Access Interference*) e ruído quântico [9][15]. A seguir se avalia o desempenho de redes ópticas WDM/OCDM em função do número de códigos ópticos, número de comprimentos de onda disponíveis, capacidade de conversão de códigos ópticos e capacidade de conversão de comprimento de onda. Inicialmente será considerada somente a conversão de códigos ópticos e será respeitada a restrição da continuidade de comprimento de onda. A Fig. 6. ilustra este estudo por meio do cálculo da probabilidade de bloqueio em função da carga do link para uma rede com 16 nós e 4 comprimentos de onda, onde todos os nós efetuam a conversão de código óptico.

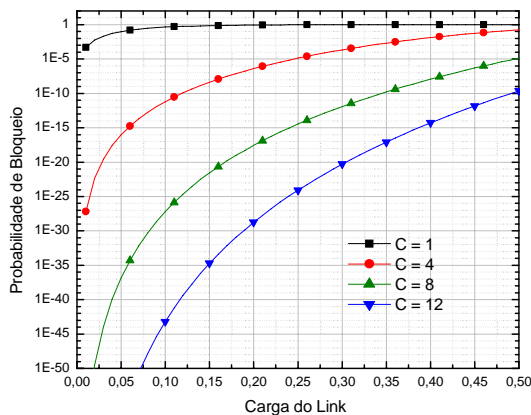


Fig. 6. Probabilidade de bloqueio em função da carga do link considerando somente a conversão de códigos ópticos

Nesta figura se observa que o aumento do número de códigos melhora a desempenho da rede. Por exemplo, considerando uma carga de link igual a 0,3 se observa que a probabilidade de bloqueio cai de 10^{-12} para 10^{-20} com o aumento do número de códigos OOC de 8 para 12. Assim, o emprego de multiplexação OCDM representa uma alternativa ao aumento do número de comprimentos de onda para o aumento da capacidade de utilização das redes ópticas. Para melhor ilustrar este conceito é ilustrado na Fig. 7 a probabilidade de bloqueio em função do número de códigos ópticos para uma rede com 16 nós com uma carga de link de 0,3.

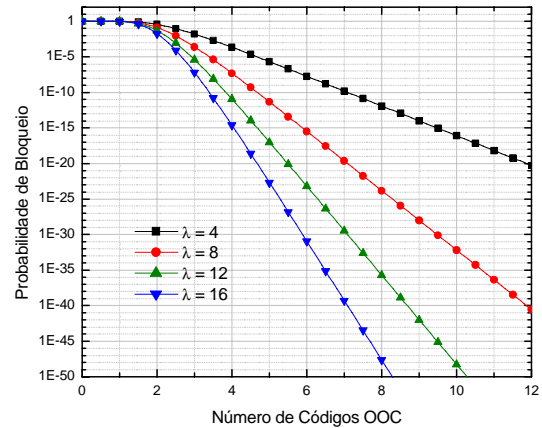


Fig. 7. Probabilidade de bloqueio em função do número de códigos ópticos para uma rede com 16 nós e uma carga de 0,3

Observando a Fig. 7 verifica-se que a probabilidade de bloqueio decresce rapidamente a partir da utilização de 2 códigos OOC. Para efeito comparativo, uma rede óptica com 16 nós e 16 comprimentos de onda que possua capacidade de conversão de comprimento de onda em todos os nós da rede apresenta uma probabilidade de bloqueio de 10^{-6} [11]. Esta mesma probabilidade de bloqueio poderia ser obtida segundo a Fig. 7. utilizando 4 comprimentos de onda e 6 códigos OOC ou 16 comprimento de onda e 3 códigos OOC. A principal vantagem é que não seriam utilizados conversores de comprimento de onda na rede.

Os resultados obtidos anteriormente consideram que todos os nós da rede possuem a capacidade de conversão de códigos ópticos. Um parâmetro que ilustra o efeito dos conversores de códigos ópticos numa rede é o ganho de conversão. O ganho de conversão foi proposto inicialmente em [11] para observar o impacto do emprego de conversores de comprimento de onda na rede. Neste trabalho estende-se o conceito de ganho de conversão para o caso de conversão de códigos ópticos, assim, consideram-se os dois tipos de ganho separadamente. O ganho de conversão de códigos está relacionado somente com a capacidade de conversão de códigos ópticos. Por outro lado, o ganho de conversão de comprimento de onda está relacionado somente com a conversão de comprimento de onda. Para estudar os ganhos de conversão será definido o Fator de Conversão. Este fator considera que os conversores estejam uniformemente distribuídos ao longo da rede. O fator de conversão é dado por:

$$\text{Fator de Conversão} = \frac{K-1}{H-1} \quad (3)$$

onde K representa o número de nós com capacidade de conversão de códigos ópticos para a análise do ganho de conversão de códigos ópticos ou representa o número de nós com capacidade de conversão de comprimento de onda para a análise do ganho de conversão de comprimento de onda e H é o número total de nós da rede. A Fig. 8 ilustra o ganho de conversão de código ópticos em função da carga do link para uma rede com 16 nós, 4 comprimentos de onda e 12 códigos ópticos.

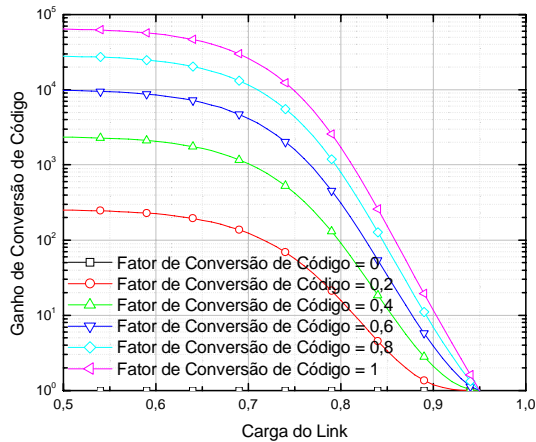


Fig. 8. Ganho de conversão de código em função da carga do link

Por meio da Fig. 8 se observa que o ganho de conversão de código aumenta a capacidade de uso da rede WDM/OCDM. Desta forma, o emprego da tecnologia OCDM em redes WDM já existentes pode ser utilizado como uma forma de aumentar a capacidade da rede. Porém, a forma mais convencional de aumentar a desempenho das redes WDM é distribuição de conversores de comprimento de onda ao longo da rede [11]-[14]. Assim, é mostrada na Fig. 9. a probabilidade de bloqueio em função da carga do link para uma rede WDM/OCDM de 16 nós, 4 comprimentos de onda e 4 códigos ópticos. Foram analisadas as redes sem capacidade de conversão de comprimento de onda e com Fator de Conversão de comprimento de onda iguais a 0,2 e 0,8.

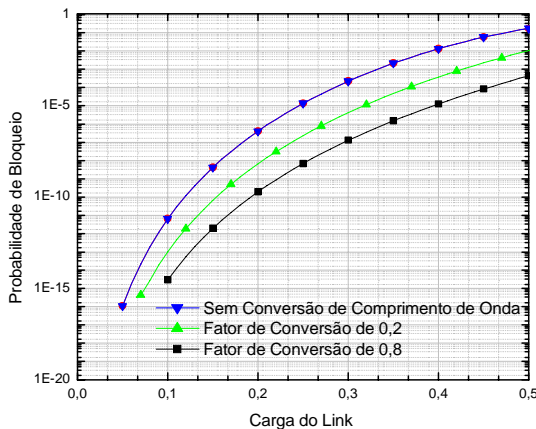


Fig.9. Probabilidade de bloqueio em função da carga do link

O resultado obtido na Fig. 9. ilustra que o emprego de conversores de comprimento de onda melhora o desempenho das redes ópticas como também já foi ilustrado por [11][14]. Para melhor analisar o impacto dos conversores de comprimento de onda em redes WDM/OCDM ilustra-se na Fig. 10. a probabilidade de bloqueio em função do fator de conversão de comprimento de onda considerando uma rede com 16 nós e 4 comprimentos de onda.

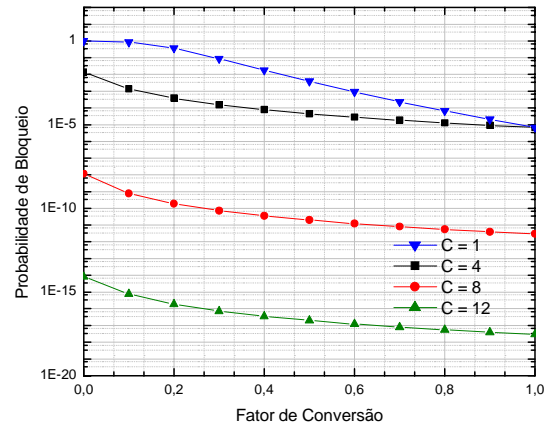


Fig. 10. Probabilidade de bloqueio em função do fator de conversão para valores distintos de códigos ópticos

A Fig. 10 mostra que o aumento do fator de conversão de comprimento de onda diminui a probabilidade de bloqueio, porém, também se deve observar que o aumento do número de códigos ópticos OOC possui um o impacto maior na diminuição da probabilidade de bloqueio. Por exemplo, observe que uma rede com 4 códigos OOC e fator de conversão igual a 1 apresenta uma probabilidade de bloqueio de 10^{-5} , por outro lado, se a rede possuir 8 códigos OOC e fator de conversão igual a zero a probabilidade de bloqueio alcançada é de 10^{-8} . Portanto, considerando que o custo de conversores de comprimento de onda é superior ao custo de conversores de códigos ópticos [9], verifica-se que o emprego de redes ópticas híbridas WDM/OCDM surge como uma alternativa para expandir a capacidade das redes ópticas com um custo menor. Na Fig. 11. ilustra-se o ganho de conversão de comprimento de onda para uma rede de 16 nós, 4 comprimentos de onda e 12 códigos ópticos.

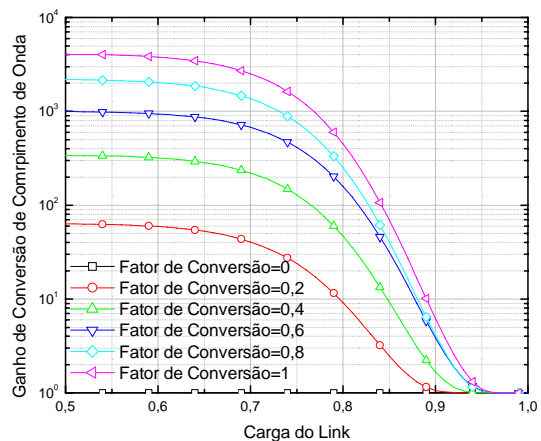


Fig.11. Ganho de conversão de comprimento de onda em função da carga do link

Por meio da Fig. 11. se observa que para a mesma configuração de rede o ganho de conversão de código óptico (Fig. 8.) foi maior que o ganho de conversão de comprimento de onda. Para comparar o ganho de conversão de códigos ópticos e comprimento de onda ilustra-se na Fig. 12. o ganho de conversão em função do número de comprimentos de onda

disponíveis nos links de uma rede. A rede estudada possui 16 nós e uma probabilidade de bloqueio de 10^{-5} . Esta rede efetua a conversão de códigos ópticos ou a conversão de comprimentos de onda. Foi considerada um Fator de Conversão de 0,5, tanto para conversão de códigos ópticos como para conversão de comprimentos de onda.

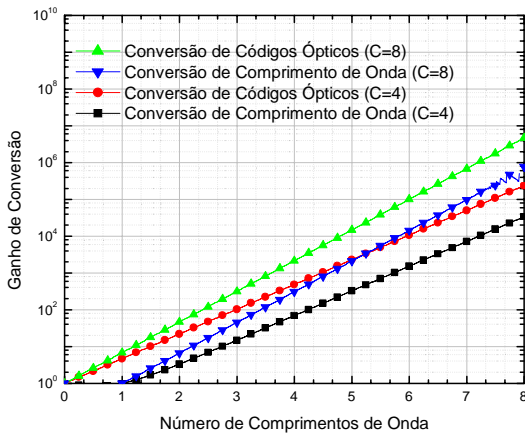


Fig. 12. Ganho de conversão em função do número de comprimentos de onda nos links da rede

Pode-se observar na Fig.12. que o ganho de conversão de códigos é maior que o ganho de conversão de comprimento de onda mesmo quando ocorre o aumento do número de comprimentos de onda disponíveis. Desta forma, a conversão de códigos ópticos aumenta a capacidade da rede e possui um impacto maior do que a conversão de comprimento de onda mesmo quando o número de comprimentos de onda disponíveis aumenta.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a análise de redes ópticas híbridas com multiplexação por divisão de comprimento de onda e multiplexação por divisão de códigos ópticos (WDM/OCDM). Com os resultados obtidos ilustrou-se que para garantir uma baixa taxa de erro de conversão de códigos ópticos deve-se empregar um número máximo de 12 códigos ópticos ortogonais (OOC) por comprimento de onda. Também se observou que o aumento do número de códigos ópticos influencia na queda da probabilidade de bloqueio na rede. Por outro lado, as análises realizadas mostraram que o emprego de conversores de códigos ópticos possui um impacto maior no aumento da capacidade de utilização da rede quando comparado ao emprego de conversores de comprimento de onda.

REFERÊNCIAS

- [1] C. S. Ram Murthy and M. Gurusamy, *WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [2] K. Liu, C. Liu, J. Pastor, A. Roy and J. Wei, "Performance and Testbed Study of Topology Reconfiguration in IP over Optical Networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, n. 10, outubro de 2002.
- [3] Ayan Banerjee et al, "Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements", *IEEE Communications Magazine*, pp. 144 – 150, janeiro de 2001.
- [4] K Kitayama, "Code Division Multiplexing Lightwave Networks Based upon Optical Code Conversion", *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, Vol. 16, n. 7, pp. 1309 – 1319, setembro de 1998.
- [5] A. Stok and E. Sargent, "Lighting the Local Area: Optical Code-Division Multiple Access and Quality of Service Provisioning", *IEEE Network*, pp. 42 – 46, dezembro de 2000.
- [6] X. Zhang, Y. Ji and X. Chen, "Code Routing Technique in Optical Network", *APCC/OECC*, Beijing, China, outubro de 1999.
- [7] K. Kitayama, N. Wada and H. Sotobayashi, "Architectural Considerations for Photonic IP Router Based upon Optical Code Relation", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, n. 12, pp. 1834 – 1844, dezembro de 2000.
- [8] Nisir Ghani, Sudhir Dixit and Ti-Shiang Wang, "On IP-WDM Integration: A Retrospective", *IEEE Communications Magazine*, pp. 42 – 45, setembro de 2003
- [9] Y. G. Wen, Y. Zhang and L. K. Chen, "On Architecture and Limitation of Optical Multiprotocol Label Switching (MPLS) Networks Using Optical-Orthogonal-Code (OOC)/Wavelength Label", *Optical Fiber Technology*, vol. 8, pp. 43 – 70, 2002.
- [10] K. Kitayama and M. Murata, "Versatile Optical Code-Based MPLS for Circuit, Burst, and Packet Switchings", *Journal Of Lightwave Technology*, vol. 21, n. 11, pp. 2753 – 2764, novembro de 2003.
- [11] R. Barry and P. Humblet, "Model of Blocking Probability in All-Optical Network with and without Wavelength Charges", *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 14, pp. 858 - 868, 1996.
- [12] A. Birman, "Computing Approximate Blocking Probabilities for a Class of All-Optical Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 14, n. 5, pp. 852 - 857, junho de 1996.
- [13] M. Kovačević and A. Acampora, "Electronic Wavelength Translation in All-Optical Clear-Channel Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 14, n. 5, pp. 1161 – 1169, junho de 1996.
- [14] S. Subramaniam, M. Azizoğlu and A. Somani, "All-Optical Networks with Sparse Wavelength Conversion", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, n. 4, pp. 544 – 557, agosto de 1996.
- [15] F. Chung, J. Salehi and V. Wei, "Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 35, n. 3, maio de 1989.