

X Simpósio Brasileiro
de Microondas
e Optoeletrônica

Recife

12 a 16 de agosto Mar Hotel

Microondas e Optoeletrônica: Evolução, Tendências e Perspectivas

PROMOÇÃO

Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica

REALIZAÇÃO

Grupo de Fotônica
Dep. de Eletrônica e Sistemas
Universidade Federal de Pernambuco

EDITORES

Eduardo Fontana
Antonio Jerônimo Belfort de Oliveira

Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica

Campus do Instituto Mauá de Tecnologia - IMT

Praça Mauá I, São Caetano do Sul - São Paulo 09.580-900

Tel/Fax: +5511-42388988

E-mail: sbmo@netabc.com.br

<http://www.ufpa.br/sbmo>

Grupo de Fotônica, Dep. de Eletrônica e Sistemas

Universidade Federal de Pernambuco

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n

Cidade Universitária, Recife - Pernambuco 50.740-530

Tel/Fax: +5581-32718995

E-mail: fotonica@npd.ufpe.br

<http://www.fotonica.ufpe.br>

**Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica. 10. :
S612a 2002, Recife.**

Anais / X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife, 12-16 de agosto de 2002 ; editado por Eduardo Fontana e Antonio Jerônimo Belfort de Oliveira. – Recife : Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica, 2002.

758 p.

1. Microondas (Engenharia eletrônica) – Congressos.
2. Optoeletrônica – Congressos. – I. Fontana, Eduardo, ed. - II. Oliveira, Antonio Jerônimo Belfort de, ed. - III. Título.

621.3813 - CDD 21.ed.

621.38152 - CDD 21.ed.

UFPE-CTG /2002

Recife, Pernambuco, Brasil

12 de agosto de 2002

Análise de Redes Ópticas sem Comutação Usando o Método do Tráfego Aleatório Equivalente

C 186 a

José Augusto Ferraz de Campos¹ e Amílcar Careli César²

¹ Universidade de Marília, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Tecnologia, C. P. 54, 17525-902, Marília, SP.

² Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Depto. de Engenharia Elétrica, C.P. 359, CEP 13560-250, São Carlos, SP.

Resumo — O método do tráfego aleatório equivalente é utilizado para analisar e dimensionar redes ópticas sem comutação para arquitetura de nível único. Uma modelagem analítica que possibilita otimizar os parâmetros da rede considerando padrões mínimos de desempenho é descrita. Resultados numéricos são apresentados e discutidos.

Palavras-chave — redes ópticas sem comutação, dimensionamento de redes, método do tráfego aleatório equivalente.

I. INTRODUÇÃO

A instalação e manutenção de um sistema de comunicação via cabos ópticos, cuja finalidade é atender clientes distribuídos em uma área geográfica, geralmente envolve custos elevados. A implantação ou ampliação exige tempo relativamente longo e a abrangência e capilaridade em ruas e estradas ficam sujeitas a danos e defeitos. Por outro lado, as empresas de telecomunicações precisam manter um equilíbrio entre a qualidade do serviço oferecido ao cliente e o custo devido à forte concorrência existente. Diante disso, é de extrema importância projetar um sistema de comunicação com a melhor configuração possível.

Para tanto, métodos precisos de análise e dimensionamento de redes ópticas adquirem fundamental importância para os projetos, especialmente para as redes totalmente ópticas que estão sendo propostas.

Os sistemas de comunicações ópticas estão evoluindo de sistemas fixos entre dois pontos, que ainda são instalados, para redes ópticas com roteamento em comprimento de onda. Uma das propostas em estudo consiste de uma plataforma de rede de nível único para conexões ópticas ponto a ponto, habilitada para atender a um grande número de terminais em uma vasta área geográfica [1]-[3]. Tal estrutura, denominada rede óptica sem comutação, é baseada em apenas um nó que executa funções de roteamento passivo [4]-[7]. Esse nó atua também controlandoativamente a conversão de comprimentos de onda em um sistema secundário de recursos, utilizado quando as conexões primárias necessárias estiverem ocupadas [8]. Neste esquema é utilizado um sistema híbrido WDM-TDM [1]-[3]. Um terminal é conectado ao nó roteador passivo por intermédio de um conjunto de comprimentos de onda, cada qual suportando um fluxo TDM. Uma conexão entre dois terminais é estabelecida pela seleção de um canal TDM contido no comprimento de onda que é roteado corretamente através do nó passivo, entre os dois terminais. O termo "sem

comutação" é usado pelo fato de não haver necessidade de comutação eletrônica nessa rede, tampouco de *cross-connects* ópticos, a não ser para o nó roteador de comprimentos de onda [3].

Para tal estrutura, é fundamental que existam modelos analíticos confiáveis para permitir o correto dimensionamento de seus parâmetros.

Neste artigo é descrita a modelagem analítica para o dimensionamento das redes sem comutação para arquitetura óptica de nível único com o objetivo de otimizar os seus parâmetros, para diminuir custos, considerando padrões mínimos de desempenho.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. A teoria de tráfego em sistemas de telecomunicações, bem como a modelagem desenvolvida para aplicação nas redes em estudo é apresentada na Seção II. Por meio dessa modelagem são obtidos resultados que são relatados e discutidos na Seção III. As principais conclusões estão resumidas na Seção IV.

II. TEORIA

Nesta seção é apresentada a teoria de tráfego em sistemas de telecomunicações, envolvendo compartilhamento de recursos, fórmula Erlang B, extravasamento de tráfego, e o método aleatório equivalente. A seguir, é desenvolvida a modelagem analítica para ser aplicada ao dimensionamento da estrutura das redes sem comutação.

A. Compartilhamento de recursos

A característica comum em situações de compartilhamento de recursos é que, tanto os instantes em que são feitas as solicitações de serviços por clientes, como as durações dos intervalos de tempo de ocupação dos recursos, só podem ser previstos e analisados estatisticamente.

Os modelos de compartilhamento de recursos podem ser definidos em termos de três características: processo de entrada (chegada da solicitação), mecanismo de serviço e disciplina de fila [9].

O processo de entrada descreve a seqüência de solicitações de serviço. O mecanismo de serviço trata de peculiaridades como o número de recursos e os intervalos de tempo em que os clientes ocupam os recursos. A disciplina de fila especifica a decisão a ser tomada em relação aos clientes que encontram todos os recursos ocupados. Eles poderão ter que deixar o sistema imediatamente ou poderão esperar pelo serviço em uma fila.

José A. F. de Campos, jfcampos@mii.zaz.com.br, Tel. 14-4214021;
Amílcar C. César, amilcar@sel.eesc.sc.usp.br, Tel. 16-2739356; Homepage
<http://www.sel.eesc.sc.usp.br/tele/>.

1257279
290802

B. Fórmula Erlang B

Consideremos a situação em que clientes de uma central telefônica compartilhem um conjunto de s troncos telefônicos quando precisarem se conectar com assinantes de uma outra central. Suponhamos que a disciplina de fila seja tal que as chamadas que encontram todos os troncos ocupados sejam imediatamente eliminadas do sistema. Deseja-se determinar qual é a proporção de chamadas perdidas.

Se o processo de entrada ocorre de acordo com um processo de Poisson, a proporção P_s de solicitações de serviço (chamadas) que encontram todos os troncos ocupados, sendo portanto eliminadas dos sistema, é dada por [9], [10]:

$$P_s = \frac{a^s}{s!} \left/ \sum_{k=0}^s \frac{a^k}{k!} \right. \quad (1)$$

O lado direito de (1) pode ser indicado pela probabilidade de bloqueio de Erlang, $B(s, a)$, onde s é o número de recursos (troncos telefônicos) e a é a carga de tráfego oferecida (em erlangs) a esse grupo.

C. Extravasamento de tráfego (excedente) de um grupo primário de recursos

Consideremos um sistema composto pela seqüência de um grupo primário de s recursos e um grupo secundário de extravasamento com infinitos recursos. Nesse sistema, denominado modelo de extravasamento simples, os clientes solicitam serviço inicialmente ao grupo primário e, caso encontrem todos os s recursos ocupados, são direcionados para o grupo secundário de extravasamento com infinitos recursos.

Vamos considerar que a carga oferecida ao grupo primário seja a e que o processo de entrada seja de Poisson. Ainda, admitimos para o mecanismo de serviço que a distribuição dos tempos de serviço seja exponencial. Pode-se provar que a média α e a variância ν relativas à carga que é rejeitada pelos grupos primários de recursos (fluxo de extravasamento), são dadas, respectivamente, por [9], [10]:

$$\alpha = aB(s, a), \quad (2)$$

$$\nu = \alpha \left(1 - \alpha + \frac{a}{s+1+\alpha-a} \right). \quad (3)$$

D. Extravasamento de tráfego de um conjunto de vários grupos primários de recursos

Para sistemas desse tipo, com apenas um grupo primário, pode-se mostrar [9] que o fluxo de extravasamento que sai do grupo primário não constitui um processo de Poisson. A proporção, Π_c , de solicitações de serviços de clientes que são bloqueados no grupo secundário, em relação ao total de solicitações que extravasa do grupo primário, é dada por:

$$\Pi_c = \frac{aB(s+c, a)}{aB(s, a)}, \quad (4)$$

onde c é o número de recursos do grupo secundário de extravasamento.

O numerador de (4) é a média relativa à carga que extravasa do grupo secundário [9], α' , dada por:

$$\alpha' = aB(s+c, a). \quad (5)$$

Segue-se da primeira propriedade que estes sistemas não podem ser estudados usando-se (2) e (3). Assim sendo, utiliza-se (4) para o desenvolvimento de um método aproximado, denominado método do tráfego aleatório equivalente [9], [10].

E. Método do Tráfego Aleatório Equivalente

Consideremos o sistema situado no lado esquerdo da seta do esquema mostrado na Fig. 1. Nesse sistema, um grupo secundário de c recursos atua como um grupo de extravasamento comum para todo o tráfego que extravasar dos n grupos primários. Consideremos que o i -ésimo grupo primário consiste de s_i recursos e que seu processo de entrada seja do tipo Poisson, com carga oferecida a_i erlangs. Admitamos para os mecanismos de serviço de todos os grupos que a distribuição dos tempos de serviço seja exponencial e idêntica em todos eles, e que esses tempos sejam independentes.

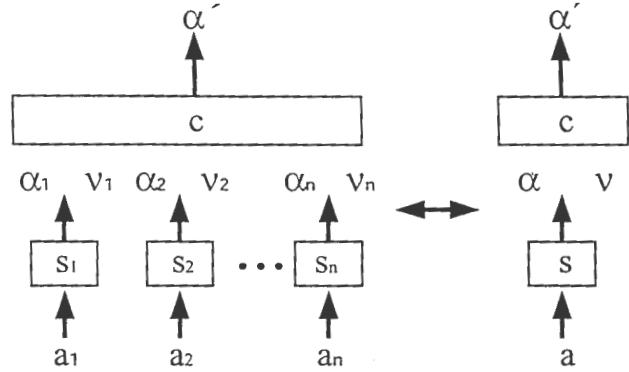


Figura 1. Grupos primários de recursos "aleatoriamente equivalentes" [9].

Para o propósito de uma análise aproximada [9], pode-se calcular a carga que extravasa do i -ésimo grupo primário por meio das correspondentes média (α_i) e variância (ν_i), calculadas conforme (2) e (3). Obtém-se, então:

$$\alpha_i = a_i B(s_i, a_i), \quad (1 \leq i \leq n, i \in N),$$

$$\nu_i = \left(1 - \alpha_i + \frac{a_i}{s_i + 1 + \alpha_i - a_i} \right), \quad (1 \leq i \leq n, i \in N). \quad (6)$$

Como os n grupos primários são independentes entre si, tem-se que [9], [10]:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i, \quad (7)$$

$$\nu = \sum_{i=1}^n \nu_i. \quad (8)$$

Os valores de α e v podem ser substituídos em (2) e (3), originando o sistema de duas equações e duas incógnitas (a e s):

$$\alpha = aB(s, a), \quad (9)$$

$$v = \alpha \left(1 - \alpha + \frac{a}{s+1+\alpha-a} \right). \quad (10)$$

Resolvendo o sistema e determinando os valores de a e s , pode-se substituí-los em (4) para obter Π_c . Este valor é a proporção de solicitações de serviços de clientes que são bloqueadas no grupo secundário, em relação ao total de solicitações que extravasa do grupo primário. O valor de Π_c é tomado como a probabilidade de bloqueio no grupo secundário relativa ao tráfego que extravasa dos grupos primários [9].

Substituindo os valores de a e s em (5), obtém-se o valor $\alpha' = aB(s+c, a)$. Esse é o valor da carga que extravasa do grupo secundário e é eliminada do sistema [9].

Finalmente, a proporção Π de todas as solicitações de recursos por clientes que são bloqueadas tanto nos grupos primários como no grupo secundário, em relação ao total de solicitações de recursos nos n grupos primários é determinada por meio de [9], [10]:

$$\Pi = \frac{\alpha'}{\sum_{i=1}^n a_i} = \frac{aB(s+c, a)}{\sum_{i=1}^n a_i}. \quad (11)$$

F. Modelagem analítica para o dimensionamento de uma rede óptica sem comutação

Com o intuito de demonstrar a capacidade do sistema e investigar os principais resultados relacionados ao seu dimensionamento, a análise será feita considerando-se somente a existência de tráfego telefônico. No tráfego exclusivamente telefônico, vamos considerar que o processo de entrada é um processo de Poisson e a disciplina de fila é aquela em que chamadas que não encontram recursos de transmissão disponíveis são eliminadas do sistema. Assim sendo, poderá ser utilizado o método aleatório equivalente. Desse modo, poderá ser avaliada a probabilidade de bloqueio sofrida pela carga de tráfego oferecida ao sistema, em função dos recursos da rede, bem como do número de usuários. O dimensionamento da rede poderá ser feito avaliando-se quais são os parâmetros que garantem a probabilidade de bloqueio, P , abaixo de um determinado valor. Usando-se a fórmula Erlang B e o método do tráfego aleatório equivalente [9], [10], pode-se equacionar os parâmetros de rede para se deduzir expressões que possibilitem atingir os objetivos propostos.

A rede investigada [3], ilustrada na Fig. 2, é constituída por um único nó central e, na transmissão, são utilizadas duas estratégias de multiplexação, no domínio do tempo (TDM) e do comprimento de onda (WDM) [3]. A rede é organizada de tal forma que, para cada par de redes ópticas passivas (PONs), existe um comprimento de onda dedicado, que contém T canais TDM dedicados à conexão PON a PON. Além disso, cada PON é conectada, por meio de N_d comprimentos de ondas dedicados, cada um também com T canais TDM, às

N_d portas reservas da PWRN (*passive wavelength router node*), e vice-versa.

Na rede em estudo, o conjunto de todos os fluxos de extravasamento relativos aos comprimentos de onda (grupos primários de recursos) que conectam diretamente uma PON de entrada com uma PON de saída é oferecido ao sistema de portas reservas (grupo secundário de recursos) [3]. Admitimos que existem N_p PONs com n clientes cada.

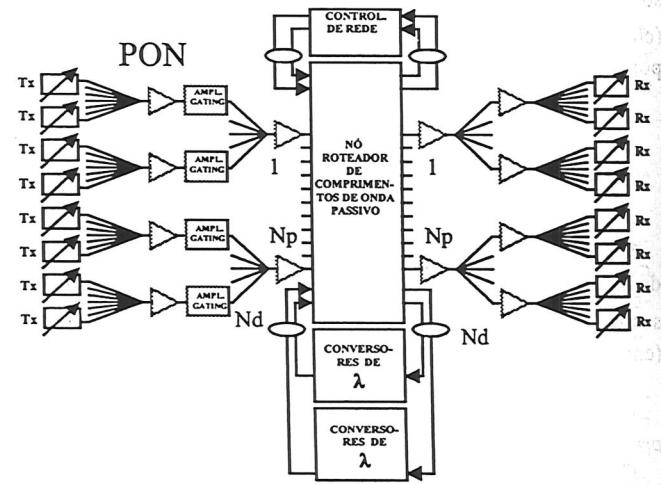


Figura 2. Estrutura de uma rede óptica sem comutação [3].

Supomos que há uma uniformidade na distribuição da carga do tráfego oferecida em relação tanto às portas de entrada quanto às portas de saída. Ou seja, a carga total oferecida que a rede deve atender é igualmente distribuído pelas N_p PONs de entrada, bem como o tráfego total oferecido a cada PON de entrada é igualmente distribuído em direção às N_d portas de saída.

É efetuada a análise de uma única relação de tráfego entre a i -ésima PON de entrada e a j -ésima PON de saída. É avaliada a probabilidade de bloqueio associada a esta relação, considerando o efeito do tráfego associado às outras relações de tráfego. De acordo com a hipótese que pressupõe tráfego uniforme, esta probabilidade representa também a probabilidade de bloqueio associada a todo o sistema [3].

As seguintes definições expressam as variáveis utilizadas na análise:

A_0 é a carga oferecida em uma PON de entrada com direção a uma única PON de saída; A_{0tot} é a carga oferecida em todas as PONs de entrada com direção a uma única PON de saída, ou seja, $A_{0tot} = N_p A_0$; A_{cl} é a média relativa à parte da carga oferecida que é transportada por um comprimento de onda que conecta diretamente a uma PON de entrada com uma PON de saída; A_{0R} é a média relativa ao fluxo de extravasamento de um comprimento de onda que conecta diretamente uma PON de entrada com uma determinada PON de saída (PON de destino), e que é a seguir oferecido às portas reservas; A_p é a somatória das médias relativas aos fluxos de extravasamento de todos os demais comprimentos de onda.

que conectam diretamente as outras PONs de entrada à mesma PON de saída acima referida. Tais fluxos são oferecidos às portas reservas, ou seja, $A_p = (N_p - 1)A_{0R}$; V_0 é variância relativa ao fluxo de extravasamento de um comprimento de onda que conecta diretamente uma PON de entrada a uma determinada PON de saída, e que é a seguir oferecido às portas reservas; A_{c2} é a média relativa à carga que é transportada através das portas reservas; e A_R é a média relativa ao fluxo de extravasamento do sistema.

A média relativa ao fluxo de extravasamento total, A_{0d} , oferecido ao sistema de portas reservas é dada pela soma das médias de todos os fluxos de extravasamento, de acordo com (7). Assim, tem-se:

$$A_{0d} = A_{0R} + A_p.$$

Como

$$A_p = (N_p - 1)A_{0R},$$

obtém-se:

$$A_{0d} = N_p A_{0R}. \quad (12)$$

De acordo com (6) tem-se também que

$$V_0 = A_{0R} \left(1 - A_{0R} + \frac{A_0}{T + 1 - A_0 + A_{0R}} \right). \quad (13)$$

De acordo com (8), tem-se que

$$V_{0d} = N_p V_0. \quad (14)$$

Pode-se procurar agora por uma expressão que forneça a probabilidade de bloqueio em uma rede óptica sem comutação, da qual se conhece N_p , A_0 e T . O primeiro passo é calcular a probabilidade, P_1 , de que uma chamada qualquer originada na i -ésima PON de entrada com direção à j -ésima PON de saída não seja acomodada em nenhum dos T canais TDM transportados pelo comprimento de onda direto que as conecta.

Utilizando-se a fórmula Erlang B, (1), obtém-se:

$$P_1 = B(T, A_0) = \frac{A_0^T}{T!} \left/ \sum_{j=0}^T \frac{A_0^j}{j!} \right.$$

Conforme (2), a média relativa ao fluxo de extravasamento de um comprimento de onda que conecta diretamente uma PON fonte com uma PON de destino é dada por:

$$A_{0R} = A_0 P_1. \quad (15)$$

Substituindo (15) em (12), obtém-se:

$$A_{0d} = N_p A_0 P_1.$$

Com os valores de A_0 e T e A_{0R} , todos agora determinados, calcula-se V_0 por meio de (13). Em seguida, obtém-se V_{0d} por meio de (14).

Conhecidos os valores de A_{0d} e V_{0d} , substitui-se todos os N_p grupos primários de recursos por um único grupo primário “aleatoriamente equivalente”. Ou seja, procuram-se os valores tanto do número de recursos, N_x , desse grupo equivalente, quanto da carga oferecida equivalente, A_x . Este gru-

po aleatoriamente equivalente será o gerador de tráfego do sistema composto pelos N_d comprimentos de onda associados às portas reservas. Para esse cálculo utilizam-se (9) e (10), reescritas na forma

$$A_{0d} = A_x \cdot B(N_x, A_x) = A_x \left(\frac{A_x^{N_x}}{N_x!} \right) \left/ \sum_{j=0}^{N_x} \frac{A_x^j}{j!} \right. \quad (16)$$

e

$$V_{0d} = A_{0d} \left(1 - A_{0d} + \frac{A_x}{N_x + 1 - A_x + A_{0d}} \right). \quad (17)$$

Como já são conhecidos os valores de A_{0d} e V_{0d} , pode-se resolver o sistema formado por (16) e (17) e determinar os valores de N_x e A_x .

O valor de A_R é obtido por meio de (5), escrita sob a forma

$$A_R = A_x \cdot B(N_x + N_d T, A_x).$$

Finalmente, a probabilidade de bloqueio de todo o sistema é calculada usando-se (12), escrita na forma

$$P = \frac{A_R}{A_{0tot}}.$$

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os principais resultados numéricos.

A. Cálculo da probabilidade de bloqueio de uma rede óptica sem comutação em função do número de portas reservas

O gráfico de probabilidade de bloqueio em função do número de portas reservas é mostrado na Fig. 3. Nota-se que aumentando o número de portas reservas diminui a probabilidade de bloqueio. Escolhendo-se o valor desejado para esta, obtém-se o número necessário de portas reservas.

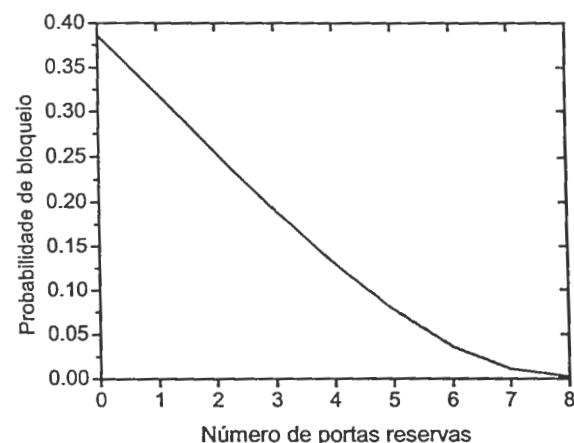


Figura 3. Gráfico da probabilidade de bloqueio em função do número de portas reservas. Foram adotados $N_p = 10$, $A_0 = 30$ erlangs e $T = 20$.

B. Cálculo do número de canais TDM em função do número de PONs

Vamos analisar agora vários cenários, considerando-se o tráfego gerado por clientes residenciais ou comerciais, bem como o número de clientes, conforme mostra a Tabela 1. Para clientes residenciais considera-se que a carga de tráfego oferecida por cliente é de 0,05 erlangs. Para comerciais, se considera o valor de 0,15 erlangs.

Tabela 1 – Cenários de tráfego

Cenário	Número de clientes	Carga de tráfego (erlangs)
Cs1 – Região pequena, tráfego residencial	15.000	750
Cs2 – Região pequena, tráfego misto	15.000	1080
Cs3 – Região pequena, tráfego comercial	15.000	2250
Cs4 – Região média, tráfego residencial	150.000	7500

Para se comparar as várias alternativas de dimensionamento do sistema, analisamos por meio da Fig. 4 a capacidade necessária total de cada porta (C_s , expressa em número de canais TDM), nos cenários citados na Tabela 1. Pode-se determinar o menor valor de C_s necessário para assegurar que a probabilidade de bloqueio, P_b , experimentada em um comprimento de onda que ligue diretamente duas PONs seja menor que 0,1.

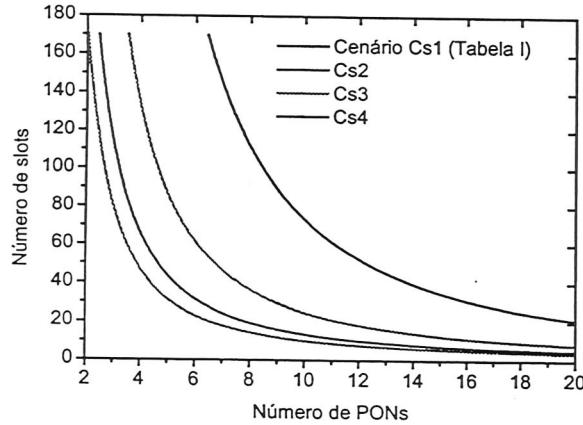


Figura 4. Número de canais TDM das portas da PWRN versus número de PONs, de acordo com os cenários de tráfego Cs1, Cs2, Cs3 e Cs4 especificados na Tabela I.

C. Probabilidade de bloqueio em função do número de portas reservas e do número de PONs

Em busca de melhores alternativas de dimensionamento da rede, podemos estudar as variações do número de PONs (N_p) e do número de portas reservas (N_d), que atingem o mesmo objetivo. Esta situação pode ser observada na Fig. 5. Conhecendo-se a carga de tráfego oferecida (7500 erlangs) e fixando-se o número de canais TDM (49), podemos observar que são necessárias três portas reservas para se conseguir que a probabilidade de bloqueio seja inferior a 10^{-5} numa rede com 13 PONs. Numa rede com 14 PONs o mesmo objetivo é atingido com duas portas reservas. A partir deste resultado,

podemos agora avaliar em termos de custos qual das opções é a mais conveniente para ser projetada.

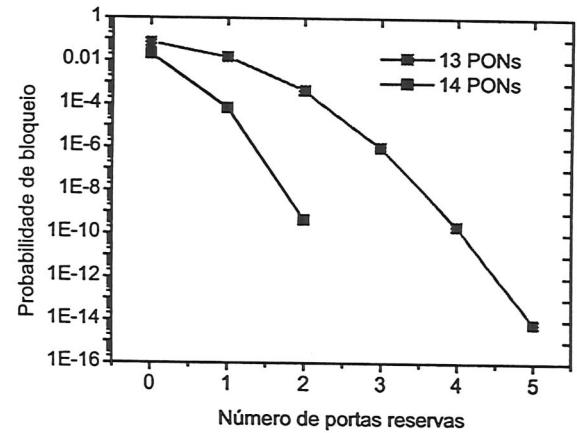


Figura 5. Probabilidade de bloqueio versus número de portas reservas. Considerou-se região residencial média (150000 assinantes, tráfego de 7500 erlangs, 14 canais TDM).

IV. CONCLUSÕES

O dimensionamento de recursos de redes ópticas sem comutação utilizando modelo analítico baseado no método do tráfego aleatório equivalente é apresentado neste trabalho. O número de assinantes e o correspondente tráfego gerado em uma PON, o número de PONs, o número de canais TDM em cada comprimento de onda e o número de portas reservas são parâmetros de projetos dimensionados nesta investigação, visando implementar redes com número mínimo de recursos, observando parâmetros de desempenho estabelecidos.

REFERÊNCIAS

- [1] A. M. Hill, S. Carter, J. Armitage, M. Shabeer, R. A. Harmon e P. Rose, "A scalable and switchless optical network structure, employing a single 32x32 free-space grating multiplexer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, nº 4, pp. 569-571, abril 1994.
- [2] N. P. Caponio, A. M. Hill, R. Sabella, "Switchless optical network for advanced transport architecture", *Proc. LEOS'98*, Orlando, FL, paper WZ4, pp. 358-359, dezembro 1998.
- [3] S. Binetti, M. Listanti, A. Maga, R. Sabella, "Analysis and dimensioning of switchless networks for single-layer optical architecture", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, nº 2, pp. 144-153, fevereiro 2000.
- [4] J. C. Chen, C. Dragone, "A proper design for ultra low-loss waveguide routers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, pp. 117-119, janeiro 1998.
- [5] B. Glance, I. P. Kaminov, R. W. Wilson, "Applications of the integrated waveguide grating router", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, nº 6, pp. 957-962, junho 1994.
- [6] D. Banerjee, J. Frank e B. Mukherjee, "Passive optical network architecture based on waveguide grating routers", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, nº 7, pp. 1040-1050, setembro 1998.
- [7] P. Bernasconi, C. Derr, C. Dragone, M. Capuzzo, E. Laskowski, e A. Paunescu, "Large NxN waveguide grating routers", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, nº 7, pp. 985-991, julho 2000.
- [8] J. Leuthold, J. Eckner, C. Holtmann, R. Hess e H. Melchior, "All-optical 2x2 switches with 20dB extinction ratios", *Electronics Letters*, vol. 32, nº 24, novembro 1996.
- [9] R. B. Cooper, "Introduction to queueing theory", *Elsevier North Holland Inc.*, New York, 1981.
- [10] J. H. Ngai, "Switching and traffic theory for integrated broadband networks", *Kluwer Academic Publishers*, 1990.