

# UM MODELO APROXIMADO PARA O PROCESSO DE SAÍDA DE UM MULTIPLEXADOR ATM COM MECANISMO DE DESCARTE SELETIVO<sup>1</sup>

**Nelson L.S. Fonseca<sup>2</sup>**  
UNICAMP - IMECC - DCC  
Caixa Postal 6065  
13081 Campinas SP

**John A. Silvester**  
Department of Electrical Engineer-System  
University of Southern California  
Los Angeles CA 90089-2562

## **Resumo**

O tráfego nas futuras redes ATM será correlacionado. O dimensionamento da futura rede de comunicação, bem como a investigação dos novos mecanismos de controle de congestionamento demandam modelos de redes de filas orientados ao tráfego multimídia. Este artigo, apresenta um modelo aproximado para o processo de saída de um multiplexador ATM com mecanismo de descarte seletivo bem como um modelo de rede de filas orientado a redes ATM. A precisão do modelo aproximado é bastante encorajadora o que viabiliza os respectivos modelos para a avaliação do mecanismo de descarte seletivo fim-a-fim.

## **Abstract**

In ATM networks supporting B-ISDN, the traffic is highly correlated and neglecting its correlation leads to dramatic underestimation of the end-to-end delay and end-to-end loss rate. Being able to accurately estimate end-to-end performance is of paramount importance for traffic control. The purpose of this paper is to introduce a procedure for modeling the output process of a finite buffer discrete-time queue with selective discard mechanism. We show through numerical examples that this procedure is reasonably accurate.

---

1. Trabalho parcialmente reproduzido dos anais da Conferência IEEE International Conference on Communications 95, pag 783-787, Seattle, Junho 18 a 22 de 1995 sob autorização do Institute of Electrical and Electronic Engineers. (© IEEE) e do Coordenador do Comitê do Programa do XIV SBRC.

2. e-mail: nfonseca@dcc.unicamp.br

## I) INTRODUÇÃO

A habilidade de computar métricas de desempenho fim-a-fim é de vital importância para o dimensionamento das redes ATM, bem como para a avaliação da adequabilidade dos mecanismos de controle de congestionamento recentemente propostos na literatura [1]-[6]. O fluxo de células na futura rede ATM será correlacionado e negligenciar as correlações no processo de modelagem leva a erros grosseiros na estimativa de métricas de desempenho. Devido a complexidade das soluções de sistemas com fluxo não-renováveis, os estudos em redes ATM têm se restringido a análise de um multiplexador isolado. Assim sendo, é necessário que se desenvolvam modelos de redes de filas cujos fluxos na rede correspondam ao fluxo de células multimídia. Para se definir um modelo de redes de filas, é necessário especificar três processos estocásticos: o processo de saída de um multiplexador, e os processos de divisão e de junção de fluxos.

Diversos mecanismos vêm sendo propostos para o controle de tráfego na futura rede de comunicação. Dentre eles, o mecanismo de descarte seletivo descarta células em um multiplexador de acordo com o nível de prioridade da célula [7]-[13]. O presente trabalho introduz um modelo para o processo de saída de um multiplexador ATM com mecanismo de descarte seletivo, bem como, apresenta um modelo de redes de filas orientado as redes ATM.

No presente trabalho, tanto o fluxo interno quanto o fluxo externo à rede são modelados através de processos D-BMAP priorizados. O processo D-BMAP (Discrete Time Batch Markovian Arrival Process) [14] vem sendo amplamente usados na modelagem de tráfego multimídia, ou seja na modelagem do tráfego externo à rede de filas [15]-[16]. A contribuição deste artigo é mostrar como o tráfego interno pode ser também modelado como um processo D-BMAP, o que é extremamente desejável para a representação uniforme do tráfego na rede. Um multiplexador ATM com mecanismo de descarte seletivo é abstraído através de uma fila  $D\text{-BMAP}^{[A, B]}/D/1/K$  e o processo de saída é modelado como um processo  $\text{MMBP}^{[A, B]}$  (Markov Modulated Bernoulli Process) com dois estados ( $2\text{-MMBP}^{[A, B]}$ ), que é um caso particular do processo  $D\text{-BMAP}^{[A, B]}$ .

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na segunda seção, os trabal-

hos existentes na literatura são revistos criticamente. Na terceira seção, o processo D-BMAP<sup>[A, B]</sup> é descrito. Na quarta seção, um modelo de redes de filas com fluxo D-BMAP<sup>[A, B]</sup> é introduzido. Na quinta seção, o modelo para o processo de saída é detalhado. Na sexta seção, descreve-se como obter a solução de uma fila D-BMAP<sup>[A, B]</sup>/D/1/K, e finalmente, as conclusões são tecidas na sétima seção.

## II) Trabalhos Existentes na Literatura

Recentemente, alguns artigos analisaram o processo de saída de um multiplexador ATM. Saito estudou o processo de saída de uma fila N/G/1 e mais particularmente da fila MMPP/D/1 [1]. Comparando a transformada z da covariância dos tempos entre chegadas dos processos de entrada e saída, Saito concluiu que as covariâncias dos tempos entre chegadas são preservadas. Takine et. al [2] derivaram a expressão para o k-ésimo momento dos tempos entre partidas e as estatísticas dos períodos ocupado e ocioso de um servidor de uma fila D-BMAP/D/1/K. Park et al. [3] modelaram o processo de saída de uma fila 2-MMBP/Geo/1/K como um processo 2-MMBP através do casamento entre as estatísticas do processo de saída e do processo 2-MMBP, isto é, através da atribuição do mesmo valor numérico de certas estatísticas do processo de saída às estatísticas do processo 2-MMBP. Fonseca e Silvester [4] modelaram também o processo de saída de uma fila D-BMAP/D/1/K como um processo 2-MMBP. As estatísticas usadas foram: média, variância e as correlações com lag 1 e 2. Os resultados obtidos tiveram uma precisão bastante encorajadora. Obteve-se erros percentuais na estimação do retardo e da taxa de perdas respectivamente menores que 6.5% e 10% [17]-[18]. Este modelo do processo de saída foi usado no contexto de redes de filas e o erro percentual na estimativa do retardo foi menor que 10%.

Convém mencionar, que segundo o conhecimento dos autores, não existe na literatura, nenhum trabalho que estude o processo de saída de um multiplexador ATM com mecanismo de descarte seletivo.

### III) O Processo D-BMAP<sup>[A, B]</sup>

O processo D-BMAP (Discrete Time Batch Markovian Arrival Process) [14] é um processo estocástico a tempo discreto no qual a cada instante de tempo pode ocorrer uma chegada em grupo. Em um D-BMAP, a densidade de probabilidade do tamanho do grupo depende de uma cadeia de Markov embutida. Um D-BMAP é completamente especificado pelas matrizes  $D_n$ , cujos elementos  $(d_{ij})_n$  dão a probabilidade de haver uma transição do estado  $i$  para o estado  $j$  na cadeia de Markov embutida e haver a chegada de um grupo com tamanho igual a  $n$ . O processo D-BMAP vem sendo amplamente usado na modelagem de tráfego multimídia devido a sua flexibilidade de se poder atribuir valores aos elementos  $(d_{ij})_n$  de tal forma a se representar um determinado padrão de correlação.

Um processo D-BMAP<sup>[A, B]</sup> é um processo D-BMAP no qual cada elemento pode ser classificado como tendo prioridade alta ou baixa. A classificação da prioridade de um elemento depende do estado da cadeia de Markov embutida e é independente da classificação de outros elementos. Um processo D-BMAP<sup>[A, B]</sup> é completamente especificado pelas matrizes  $D_n$  do processo D-BMAP associado e pelo vetor  $\vec{p}_{alta}$  cuja a  $i$ -ésima componente representa a probabilidade de um elemento ter prioridade alta quando a cadeia de Markov embutida está no estado  $i$ . Define-se  $(p_{alta} = \vec{p}_{alta} \cdot \vec{\pi})$  como a probabilidade incondicional de um elemento ter prioridade alta. O processo MMBP<sup>[A, B]</sup> (processo Markoviano modulado tipo Bernoulliano priorizado) é um caso particular de um D-BMAP<sup>[A, B]</sup> no qual ocorrem somente chegadas individuais (e não em grupo)

### IV) Um Modelo de Redes de Filas com Fluxo D-BMAP<sup>[A, B]</sup>

Como mencionado anteriormente, processos D-BMAP são amplamente usados para a modelagem de fontes multimídia, o que corresponde ao fluxo externo de uma rede de filas. Nesta seção, demonstrar-se-á como o fluxo interno da rede pode ser também modelado através de processos D-BMAP's.

Redes de filas com fluxos não-renováveis não admitem solução na forma do produto [19]. Consequentemente, a aproximação por decomposição paramétrica será utilizada para a análise destas redes [20]-[21]. Na aproximação por decomposição paramétrica, as filas são analisadas com se fossem estocasticamente independentes e tenta-se capturar a dependência entre elas, estimando-se os parâmetros descritores de fluxos.

As redes estudadas neste artigo são do tipo aberta, em cada servidor o tempo de serviço é constante, e clientes são servidos de acordo com a ordem de chegada a fila (FIFO). A organização do buffer é do tipo completamente compartilhado e a disciplina de expulsão em caso de transbordo é o último a entrar é o primeiro a sair (LIFO).

Para se definir um modelo de redes de filas é necessário especificar três processos estocásticos: o processo de saída de uma fila, o processo de divisão decorrente do roteamento de células e o processo de junção dos fluxos que convergem para o mesmo multiplexador. Abaixo, encontram-se as especificações das três operações de fluxo em redes de filas:

### **Processo de Saída**

Em [1], foi demonstrado que o processo de saída de uma fila com processo D-BMAP é correlacionado. Como a cada instante de tempo, pode existir no máximo uma partida de uma fila, modela-se o processo de saída como sendo um processo  $MMBP^{[A, B]}$ . Tendo-se em mente manter baixa a complexidade computacional, utiliza-se um  $MMBP^{[A, B]}$  com apenas dois estados na cadeia de Markov embutida ( $2\text{-}MMBP^{[A, B]}$ ). Um processo  $2\text{-}MMBP^{[A, B]}$  é completamente especificado pela quádrupla  $(p_1, p_2, \alpha_1, \alpha_2)$  e pelo vetor  $\vec{p}_{alta}$ , onde  $p_i$  ( $i = 1, 2$ ) é a probabilidade de se ter uma chegada quando a cadeia de Markov associada está no estado  $i$  e  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2$ ) é a probabilidade de transição de estado no estado  $i$ .

### **Divisão**

Considera-se que o roteamento na rede não possui memória, isto é, a probabilidade de uma célula deixar um fila e ir para outra fila é fixa. Representa-se o fluxo

entre duas filas da seguinte forma: primeiro caracteriza-se o processo de saída da primeira fila e depois o fluxo que vai para a segunda fila. O vetor  $\vec{p}_{alta}$  do fluxo que vai para a segunda fila é igual ao do processo de saída da primeira fila. Os componentes da quádrupla  $(p_1 \times p_{ij}, p_2 \times p_{ij}, \alpha_1, \alpha_2)$  são os mesmos do processo de saída com exceção do termo  $p_{ij}$  que indica a probabilidade da célula deixar a fila  $i$  e ir para a fila  $j$ .

### Agregação

O processo resultante da superposição de dois processos D-BMAP's cujas cadeias de Markov embutidas possuem  $m_i$  ( $i = \overline{1, 2}$ ) estados e cujos tamanhos máximos de grupo são iguais a  $n_i$  ( $i = \overline{1, 2}$ ) também é um processo D-BMAP cuja cadeia de Markov possui  $m_a \times m_b$  estados e com tamanho máximo de grupo igual a  $n_a + n_b$ . As matrizes  $D_n$  do processo agregado são dadas por:

$$D_k^{(c)} = \sum_{q=0}^{\min(n_1, k)} D_q^{(a)} \otimes D_{k-q}^{(b)}$$

onde  $A \otimes B$  denota o produto Kroeckener entre as matrizes  $A$  e  $B$ .

Para se computar a probabilidade de uma célula ter probabilidade alta precisa-se levar em consideração a probabilidade de uma célula ter prioridade alta em cada um dos processos agregantes, bem como a probabilidade de uma célula do processo agregado ser oriunda de um dos processos agregantes específico. Assim sendo, a  $i$ -ésima componente do vetor  $\vec{p}_{alta}$  do processo agregado é computada por:

$$p_{alta}^{(c)}(i_c) = \sum_{j_c=1}^{M_c} \sum_{n_c=1}^{N_a+N_b} \sum_{n_a=\min(0, n_c-N_b)}^{\min(n_c, N_a)} H_a \times H_b \times \frac{z_a + z_b}{n_a + n_b} \times (d_{i_c j_c})_{n_a, n_b}$$

$$H_a = \sum_{z_a=0}^{n_a} \binom{z_a}{n_a} \times p_{alta}^{z_a}(i_a) \times p_{baixa}^{n_a-z_a}(i_a)$$

$$H_b = \sum_{z_b=0}^{n_b} \binom{z_b}{n_b} \times p_{alta}^{z_b}(i_b) \times p_{baixa}^{n_b-z_b}(i_b)$$

onde:

$$n_c = n_a + n_b$$

$$p_{baixa}(i_a) = 1 - p_{alta}(i_a)$$

$$p_{baixa}(i_b) = 1 - p_{alta}(i_b)$$

$i_a$  e  $i_b$  são respectivamente os estados dos processos  $A$  e  $B$  que correspondem ao estado  $i_c$  do processo agregado  $C$

$\left( d_{i_c j_c}^{(c)} \right)_{n_a, n_b}$  é o elemento na  $i_c$ -ésima linha e na  $j_c$ -ésima coluna de

$$D_{n_a}^{(a)} \otimes D_{n_b}^{(b)}$$

#### IV) O Processo de Saída de uma Fila D-BMAP<sup>[A, B]</sup>/D/1/K

Numa fila com compartilhamento total do espaço de buffer, células são perdidas somente em situações de excesso transbordo. Se nós observarmos o processo de saída de uma fila D-BMAP<sup>[A, B]</sup>/D/1/K sem levarmos em consideração as prioridades das células, podemos notar que as estatísticas do processo de saída são idênticas às estatísticas do processo de saída de uma fila D-BMAP/D/1/K. Esta característica ocorre por que a organização do buffer é do tipo compartilhamento total que é uma organização que conserva o trabalho [22]. Outras organizações que não conservam o trabalho como por exemplo compartilhamento parcial não possuem tal característica. Desta forma, o procedimento para se modelar o processo de saída da fila D-BMAP<sup>[A, B]</sup>/D/1/K é realizado em duas etapas (Figura 1). Na primeira etapa, modela-se o processo de saída da fila D-BMAP/D/1/K e, na segunda etapa, computa-se, o vetor  $\vec{p}_{alta}$

Conforme mencionado na introdução, os parâmetros  $(\rho_1, \rho_2, \alpha_1, \alpha_2)$  do processo 2-MMBP são computados através do casamento entre as estatísticas do processo de saída e estatísticas do 2-MMBP. As estatísticas escolhidas são [4]:

- 1) Média
- 2) Variância
- 3) Covariância com lag 1
- 4) Covariância com lag 2

A taxa média, o coeficiente de variação e o coeficiente de correlação podem ser respectivamente calculados por:

$$\lambda = \pi \left( \sum_{k=1}^{\infty} k D_k \right) \bar{e}$$

$$var = \pi \left( \sum_{k=1}^{\infty} k^2 D_k \right) \bar{e} - \lambda^2$$

$$cov(x_1, x_k) = \pi \left( \sum_{n=1}^{\infty} n D_n \right) D^{k-2} \left( \sum_{n=1}^{\infty} n D_n \right) \bar{e} - \lambda^2$$

Se o buffer fosse infinito, a probabilidade de uma célula do processo de saída ter prioridade alta seria a mesma do processo de entrada. No caso de buffer finito, é necessário levar em conta, também, as probabilidades de perda de cada classe de células. Neste artigo, assume-se que a probabilidade de uma célula ter prioridade alta é independente do estado da cadeia de Markov embutida. Assim sendo, as probabilidades são dadas por:

$$\Pi_{alta} = \frac{p_{alta} \times (1 - R_{alta})}{p_{alta} \times (1 - R_{alta}) + p_{baixa} \times (1 - R_{baixa})}$$

$$\Pi_{baixa} = \frac{p_{baixa} \times (1 - R_{baixa})}{p_{alta} \times (1 - R_{alta}) + p_{baixa} \times (1 - R_{baixa})}$$

onde  $R_{alta}$  ( $R_{baixa}$ ) é a taxa de perda da classe alta (baixa)

$\Pi_{alta}$  ( $\Pi_{baixa}$ ) é a probabilidade de uma célula do processo de saída ter alta (baixa) prioridade.

$p_{alta} = \hat{p}_{alta} \cdot \hat{\pi}$  ( $p_{baixa} = \hat{p}_{baixa} \cdot \hat{\pi}$ ) é a probabilidade de uma célula ter prioridade alta (baixa) no processo de entrada

## V) A Fila D-BMAP<sup>[A, B]</sup>/D/1/K e a Lei de Conservação das Taxas de Perdas

Para se computar as taxas de perdas em uma fila D-BMAP<sup>[A, B]</sup>/D/1/K com baixa complexidade computacional, utiliza-se uma lei de conservação das taxas de perdas. Esta lei estabelece que o produto entre a taxa de perda do processo agregado pela taxa de chegada do processo agregado é igual a soma dos produtos das taxas de perda pelas taxas de chegada de cada classe, isto é:

$$\lambda R = \sum_{n=1}^N \lambda_n R_n$$

onde  $\lambda$  e  $R$  são respectivamente a taxa de chegada e a taxa de perdas do processo agregado e  $\lambda_n$ ,  $R_n$  são as taxas de chegada e de perda por classe.

Nos cálculos das taxas de perdas em uma fila D-BMAP<sup>[A, B]</sup>/D/1/K, primeiramente, resolve-se o sistema agregado, sem se levar em conta o mecanismo de prioridade. Tendo-se a distribuição do número de células na fila, computa-se a taxa de perda de uma célula com prioridade baixa ser descartada através de argumentos probabilísticos. A taxa de perda da classe com prioridade alta é derivada diretamente através da lei da conservação das taxas de perdas. Esta solução da fila a tempo discreto é uma mera generalização da solução da fila a tempo contínuo que pode ser encontrada em [7].

A utilização da lei de conservação das taxas de perdas é fundamental para obtenção de uma solução com baixa complexidade computacional. A lei de conservação das taxas de perdas é uma generalização da lei de conservação das probabilidades de perdas em filas com processos renováveis. Estas duas leis são traduzidas pela mesma expressão matemática, mudando-se para taxa de perda onde se lê probabilidade de perda. A diferença entre as duas leis é sutil, porém importante. Quando se refere a probabilidade de perda, deseja-se expressar qual é a probabilidade de se perder uma célula escolhida aleatoriamente, enquanto que quando se refere a taxa de perda, deseja-se expressar qual é a fração das células perdidas no universo de todas as células transmitidas. Obviamente, por trás desta diferença conceitual, existe todo um conjunto de hipóteses que não pode ser assumido em um sistema com fluxo

não-renovável devido a existência de memória nesta classe de processos. A demonstração da lei de conservação das taxas de perdas pode ser encontrada em [23]

## VI) Exemplos Numéricos

Nesta seção, apresenta-se os principais resultados do processo de validação do modelo aproximado que são obtidos através da comparação das estimativas do modelo aproximado com as estimativas derivadas através de um experimento de simulação. No processo de validação, considera-se duas filas em "tandem". O processo de entrada da primeira fila é um D-BMAP<sup>[A, B]</sup>. O processo de entrada da segunda fila é composto pelo processo de saída da primeira fila mais um processo de interferência (Figura 2). O processo de interferência é introduzido com o objetivo de se evitar o fenômeno de não formação de filas em redes tandem com tempo de serviço constante. No experimento analítico, substitui-se o processo de saída da primeira fila pelo processo aproximado 2-MMBP e compara-se as taxas de perdas na segunda fila com as taxas de perdas derivadas através de simulação. No experimento de simulação, utiliza-se o método das replicações independentes com intervalo de confiança de 95%. Reporta-se o erro percentual entre a estimativa analítica da taxa de perda e a taxa de perda encontrada no experimento de simulação, isto é:  $|(p_{aprox} - p_{sim}) / p_{sim}|$  onde  $p_{aprox}$  é a taxa de perda calculada pelo modelo aproximado e  $p_{sim}$  é a taxa de perda calculada via simulação. A fim de se acessar o erro única e exclusivamente devido ao modelo aproximado, limitou-se aos valores numéricos na faixa de  $10^{-7}$  a  $10^{-1}$ , evitando-se, portanto, o uso de técnicas de simulação de eventos raros.

Na validação, utilizou-se de um processo D-BMAP<sup>[A, B]</sup> com dois estados tanto para o processo de entrada na primeira fila, quanto para o processo de interferência. A densidade de probabilidade do tamanho do grupo deste processo é do tipo Poisson com média  $(1+c)p$  (estado 1) e  $(1-c)p$  (estado 2) onde  $p$  é a taxa de chegada. O coeficiente de variação e o coeficiente de correlação são dados por:

$$C_v^2 = \rho^{-1} + c^2$$

$$C_c(n) = \frac{c^2 \rho}{1 + c^2 \rho} \times (2\alpha - 1)^n$$

A probabilidade de uma célula ter prioridade alta independe do estado da cadeia de Markov embutida tanto para o processo de entrada quanto para o processo de interferência.

As Tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, as taxas de perdas para a classe com prioridade alta e para classe com prioridade baixa para tamanho de buffers igual a 100 (a menos que especificado o contrário, todos os dados nesta seção são referentes ao tamanho de buffer igual a 100). Nota-se que o modelo é mais preciso para estimar as taxas de perdas para a classe com prioridade baixa do que para a classe com prioridade alta. Erros na estimação da taxa de perda para as classes com prioridade alta são menores que 15% enquanto que para a classe com prioridade baixa são menores que 10%.

Para se avaliar o impacto da taxa de chegada, do coeficiente de variação e do coeficiente de correlação na precisão do modelo aproximado, variou-se  $\rho$ ,  $c$  e  $\alpha$ . A Figura 3 mostra as taxas de perda da classe com prioridade alta como função de  $\rho$  (para  $(c = 0.9, \alpha = 0.9, \rho_{alta} = 0.8)$  e parâmetros do processo de interferência ( $\rho = 0.3, c = 0.5, \alpha = 0.9, \rho_{alta} = 0.8$ ). No gráfico superior da figura mostra-se os valores do experimento analítico e do experimento de simulação, enquanto que no gráfico inferior, mostra-se o erro percentual correspondente. Nota-se que o modelo torna-se mais preciso com o aumento da taxa de chegada. Na Figura 4 (semelhante a Figura 3) mostra-se a precisão do modelo em relação a classe com prioridade baixa. As mesmas observações da Figura 3 são válidas para a Figura 4.

A Figura 5 mostra o erro percentual quando se varia o parâmetro  $c$  (para  $(\rho = 0.8$  e  $\alpha = 0.1)$  e para os parâmetros do processo de interferência igual a  $(\rho = 0.5, c = 0.1, \alpha = 0.1, \rho_{alta} = 0.7)$ ). Nota-se que o modelo é mais preciso para valores maiores do coeficiente de variação. O impacto do coeficiente de variação é mais pronunciado para classe com prioridade alta do que para classe com prioridade baixa. Para classes com prioridade alta a variação no erro percentual foi menor que 3% enquanto que para a classe com prioridade baixa foi menor que 2%. Nota-se também que a precisão aumenta com o aumento de  $\rho_{alta}$ . Este crescimento é mais notório para as

classes com prioridade alta do que para as classes com prioridade baixa. A precisão do modelo como função do coeficiente de variação depende também do coeficiente de correlação. Para fluxos correlacionados positivamente o modelo é aproximadamente 2% mais preciso do que para fluxos correlacionados negativamente. A Figura 6 mostra a precisão do modelo como função do coeficiente de correlação. A mesma tendência da Figura 5 é observada na Figura 6. O modelo é ligeiramente mais preciso para fluxos positivamente correlacionados do que para fluxos negativamente correlacionados.

Para se certificar de que o processo de interferência não influencia os resultados obtidos, variou-se os seus parâmetros. Nenhum impacto significativo foi notado. Variou-se, também, o tamanho do buffer entre 50 e 200 e também não foi constatado nenhum impacto do tamanho do buffer na precisão do modelo.

Na Figura 7, mostra-se um experimento com uma rede em tandem com quatro nós. O processo de interferência é o mesmo para todos os nós (por definição, a primeira fila não tem processo de interferência). Neste experimento, computa-se as taxas de perda fim-a-fim através de  $1 - \prod (1 - p_j)$  onde  $p_j$  é a taxa de perda na fila  $j$ . No gráfico superior da Figura 7, mostra-se as taxas de perda nos experimentos analíticos e de simulação. O gráfico inferior refere-se ao erro percentual. Nota-se que a precisão aumenta com o aumento da taxa de chegada. Exemplos adicionais podem ser vistos em [23]

## VII) Conclusões

Neste artigo, um modelo aproximado para o processo de saída de uma fila D-BMAP<sup>[A, B]</sup> com espaço de buffer completamente compartilhado foi introduzido. O modelo é realizado em duas etapas. Na primeira etapa, computa-se as estatísticas do processo 2-MMBP<sup>[A, B]</sup> e na segunda etapa, computa-se a probabilidade de uma célula ter uma certa prioridade. Os resultados do processo de validação deste modelo aproximado são bastante encorajadores. Além disto, mostrou-se um modelo de redes de filas para redes ATM com mecanismo de descarte seletivo. Como trabalhos futuros, sugere-se a elaboração de modelos de processos de saída para filas com outros tipos de organização do espaço de buffer, bem como a investigação fim-

a-fim do mecanismo de descarte seletivo.

## VIII) Referencias Bibliográficas

- [1]H. Saito. "The departure process of an N/G/1 Queue". *Perfor. Eval.*, 11, pp. 241-251, 1990.
- [2]T. Takine, T. Suda and T. Hasegawa. "Cell loss and output process analyses of finite buffer discrete time queueing system with correlated arrivals", in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp 1259-1268, 1993
- [3]D. Park, H. G. Perros and H. Yamashita. "Approximate analysis of discrete-time tandem queueing networks with bursty and correlated input traffic and customers" to appear in *Operation Research Letters*.
- [4]N. L. S. Fonseca and J. A. Silvester, "Modelling the output process of an ATM multiplexer with Markov modulated arrivals", in *Proc of IEEE ICC'94*, pp. 721-725, 1994.
- [5]J.F. Ren, J. W. Mark and J. W. Wong, "End-to-end performance in ATM networks", *Proc of IEEE ICC'94*, pp. 996-1002, 1994.
- [6]V. Frost and Q. Wang, "Estimation of cell loss probabilities for tandem ATM queues", *Proc of IEEE ICC'94*, pp. 1019-1024.
- [7]N. L. S. Fonseca and J. A. Silvester, "Estimating the loss probability in a multiplexer loaded with multi-priority MMPP streams", in *Proc. IEEE ICC'93*, pp. 1037-1041, 1993.
- [8]A. Y-M Lin and J. A. Silvester, "Priority queueing strategies and buffer allocation protocols for traffic control at an ATM integrated broadband switching system, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 9, pp. 1524-1536, Dec. 1991
- [9] Y. Le Boudec, "An efficient solution method for markov models of ATM links with loss priorities", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 9, pp. 408-417, Apr. 1991.
- [10]H. Kroner, "Comparative performance study of space priority mechanisms for ATM networks", in *Proc. IEEE INFOCOM'90*, pp. 1136-1143, 1990.
- [11]J. Garcia and Olga Casals, "Stochastic models of space priority mechanisms with Markovian arrival processes". *Annals of Operation Research* 35, pp. 271-296, 1992
- [12]D. W. Petr and V. S. Frost, "Priority cell discarding for overload control in BIDN/ ATM networks: an analysis framework", *International Journal of Digital and Analog Communication Systems*, vol 3, n 2, 1990.
- [13] N. L. S. Fonseca and J. A. Silvester, "A comparison of push-out policies in an ATM multiplexer", in *Proc. of IEEE Pac. Rim Conf. on Commun. Comp. and Signal Proc.*, pp. 338-341, 1993.
- [14]C. Blondia. "A discrete-time batch Markovian arrival process as B-ISDN traffic model", *Belgian J. of Oper Res., Stat. and Comp. Science*, vol. 32 (3), pp. 3-23. 1992.

- [15] S. Wang and J. A. Silvester, "A discrete-time performance model for integrated service ATM multiplexers", in *Proc. of IEEE GLOBECOM'93*, pp.757-761, 1993
- [16] C. Blondia and O. Casais, "Performance analysis of a statistical multiplexing of VBR sources", *Proc of IEEE INFOCOM*, pp 828-838, 1992
- [17] N. L. S. Fonseca and J. A. Silvester, " On the computation of end-to-end delay in feed-forward ATM networks", *Proc. of IEEE International Telecommunication Symposium '94*, pp. 460-464.
- [18] J. A. Silvester, N. L. S. Fonseca and S.S. Wang, "D-BMAP models for the performance evaluation of ATM networks", in *Proc of 2nd IFIP Workshop on Performance and Modeling of ATM networks*", paper n<sup>o</sup> 34, 1994.
- [19] E Souza e Silva e R. Muntz, "Queueing Networks: Solutions and Applications in Stochastic Analysis of Computer and Communication Systems", H. Takagi editor, North Holland, 1990.
- [20] P. J. Kuehn, "Approximate analysis of general queueing networks by decomposition", *IEEE Trans. Commun.*, vol COM-27, 1, pp. 113-126, 1979
- [21] W. Whitt, "The Queueing Network Analyzer", *The Bell Sys. Tech. J.*, vol. 62, pp. 2779-2815, Nov. 1983
- [22] L. P. Clare and I. Rubin, "Performance boundaries for prioritized multiplexing systems", *IEEE Trans on Info. Theory*, n<sup>o</sup> 3, pp. 329-340, May 1987.
- [23] N. L. S. Fonseca, Queueing Network Models for Multiple Class Broadband Integrated Digital Service Networks, U.S.C. CENG Tech Report 94-25, 1994.

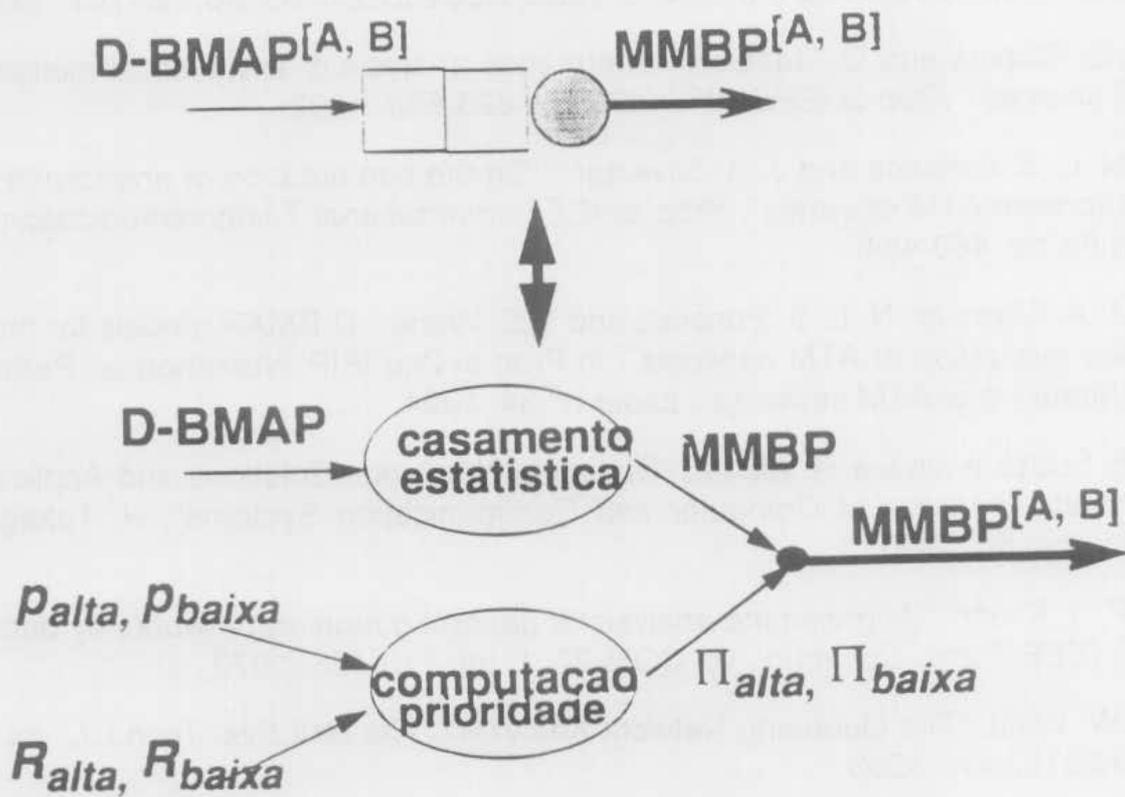


Figure 1: Procedimento computacional em duas fases para modelagem de um multiplexador ATM com mecanismo de descarte seletivo

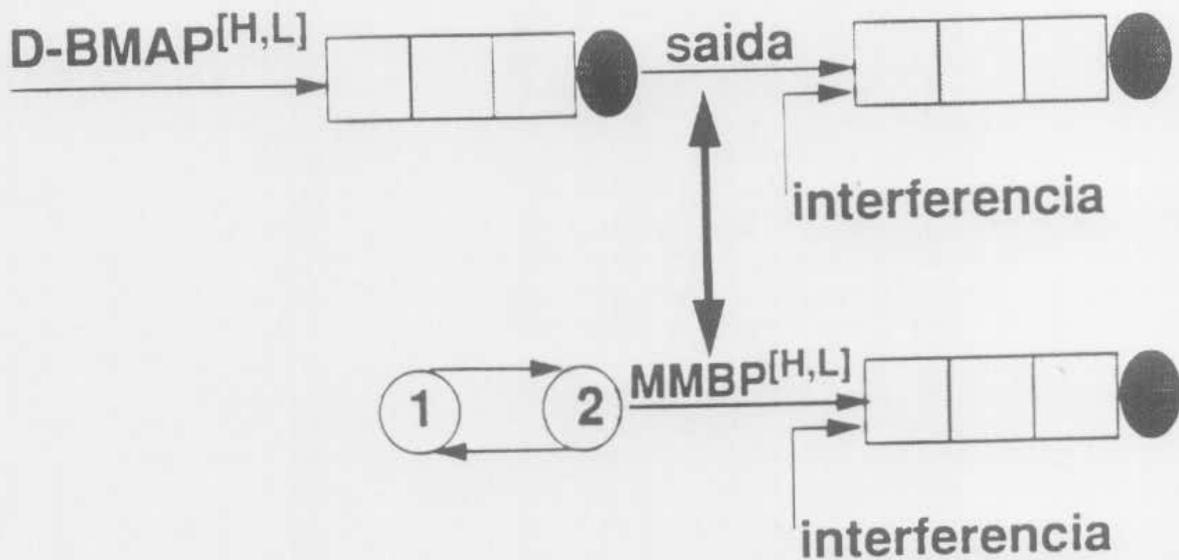


Figura 2: Esquema para validação do procedimento

proc entrada ( $\rho, c, P_{alta}$ )	interferên ( $\rho, c, P_{alta}$ )	Analitico	simulação	Interv de conf	erro
0.85, 0.95, 0.9	0.5, 0.1, 0.7	0.1262	0.1205	4.63e-3	4.7
0.85, 0.9, 0.8	0.5, 0.1, 0.5	2.4049e-2	2.2309e-2	7.72e-4	7.8
0.9, 0.95, 0.8	0.3, 0.1, 0.5	2.2711e-3	2.0912e-3	2.54e-5	8.6
0.85, 0.95, 0.8	0.2, 0.1, 0.5	1.8265e-4	1.6742e-4	2.01e-6	9.1
0.8, 0.9, 0.8	0.3, 0.1, 0.5	4.2467e-5	3.8019e-5	8.29e-7	11.7
0.8, 0.9, 0.8	0.2, 0.1, 0.5	3.9843e-6	3.5197e-6	4.29e-8	13.2
0.75, 0.9, 0.8	0.2, 0.1, 0.5	2.3188e-7	2.0287e-7	3.73e-9	14.3

Table 1: Taxa de perda da classe com prioridade alta,  $\alpha = 0.9$  para processo de entrada e de interferência

proc entrada ( $\rho, c, P_{alta}$ )	Análítico	simulação	Interv de conf	erro
(0.85, 0.95, 0.8)	0.2167	0.2066	3.82e-3	4.9
(0.75, 0.9, 0.8)	2.0134e-2	1.9048e-2	5.38e-4	5.7
(0.7, 0.9, 0.8)	1.9641e-3	1.8617e-3	1.17e-5	5.5
(0.65, 0.9, 0.8)	1.8444e-4	1.7189e-4	3.85e-6	7.3
(0.625, 0.9, 0.8)	3.2688e-5	3.0211e-5	1.62e-7	8.2
(0.6, 0.9, 0.8)	1.9371e-6	1.7722e-6	5.72e-8	9.3
(0.5875, 0.9, 0.8)	4.9388e-7	4.5062e-7	1.72e-9	9.6

Table 2: Taxa de perda da classe com prioridade baixa,  $\alpha = 0.9$  para processo de entrada e parâmetros do processo de interferência iguais a

Table 3: ( $\rho = 0.2, c = 0.1, \alpha = 0.9, P_{high} = 0.5$ )

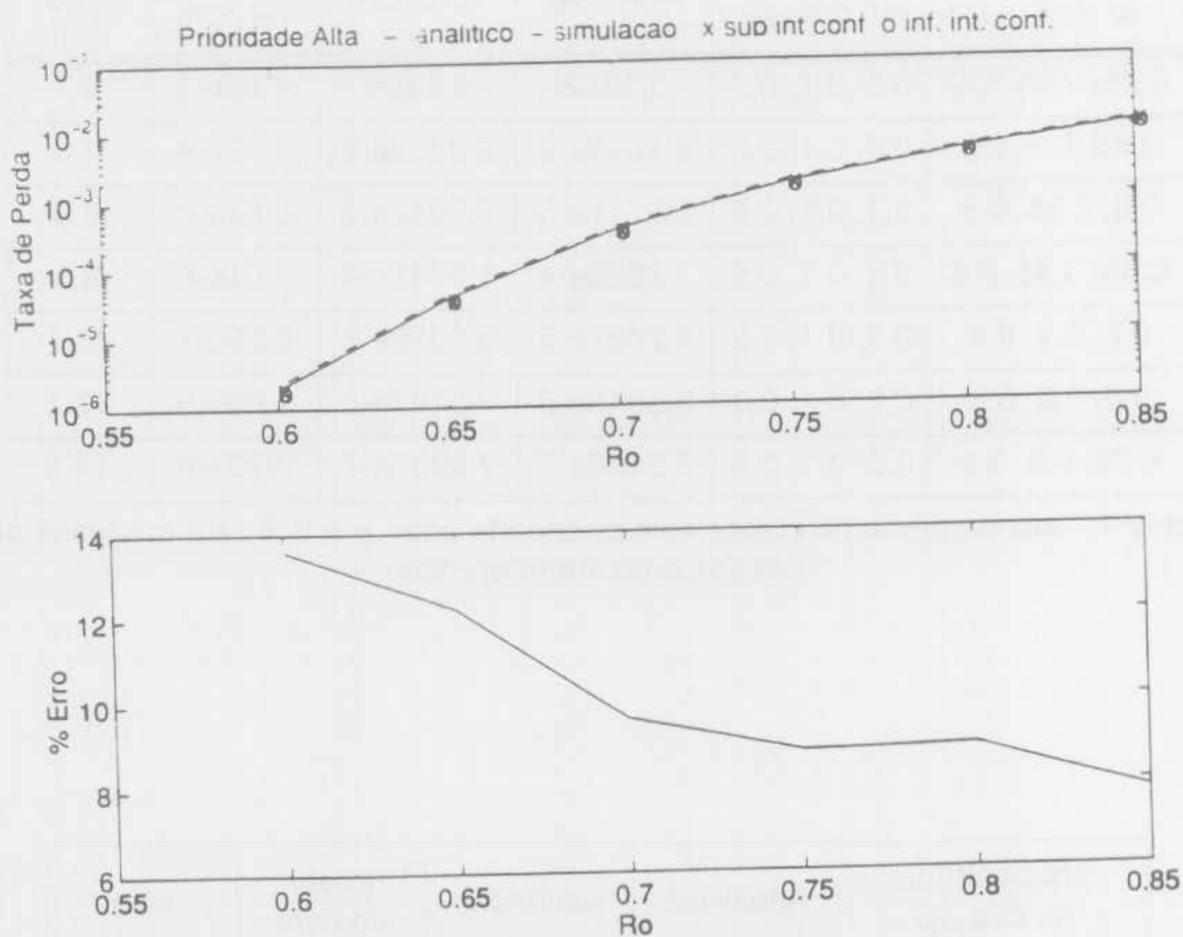


Figura 3: Taxa de perda da classe com prioridade alta como um função da carga oferecida ( $\rho$ ) onde os parâmetros do processo de entrada são ( $c=0.9$ ,  $\alpha=0.9$ ,  $p_{alta}=0.8$ ) e os parâmetros do processo de interferência iguais a ( $\rho=0.3$ ,  $c=0.5$ ,  $\alpha=0.9$ ,  $p_{alta}=0.8$ ).

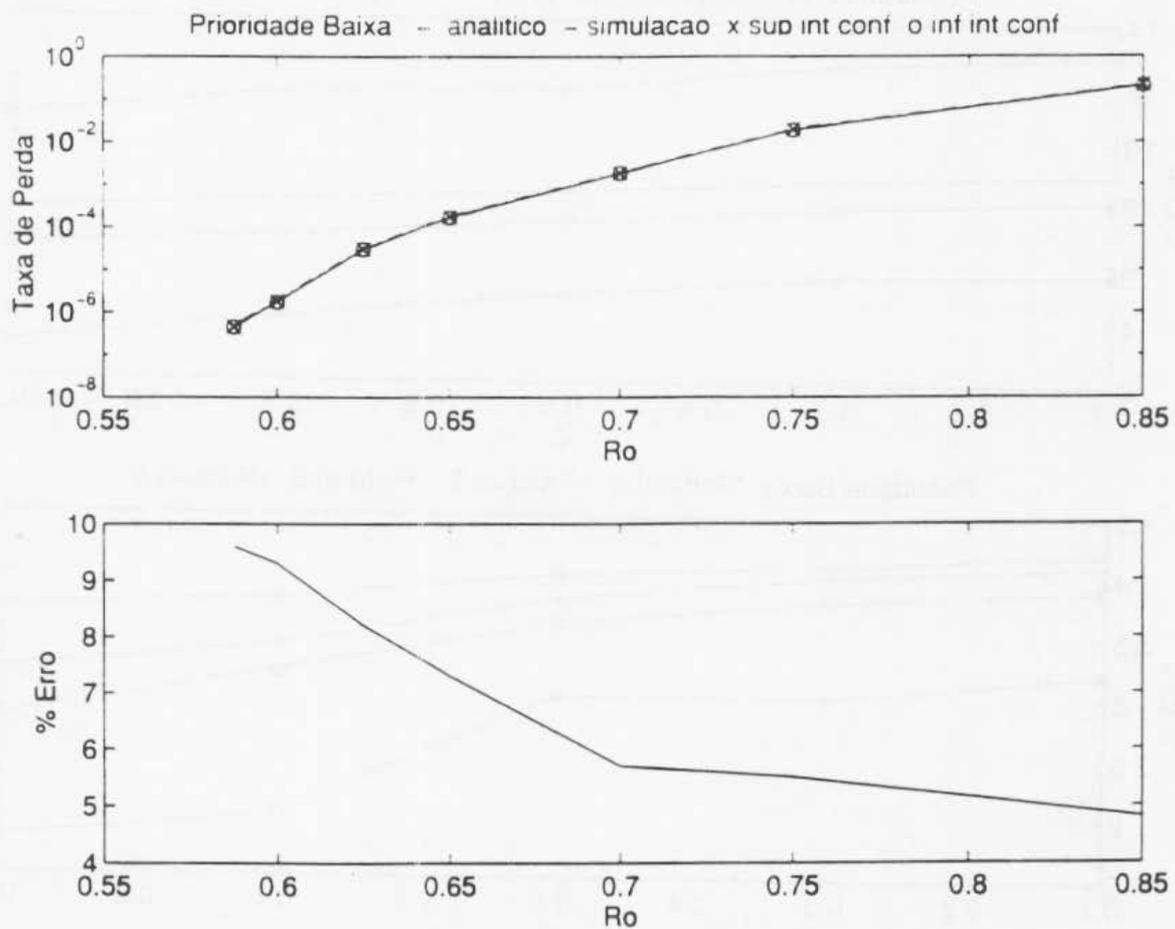


Figura 4: Taxa de perda da classe com prioridade baixa como um função da carga oferecida ( $\rho$ ) onde os parâmetros do processo de entrada são ( $c=0.9$ ,  $\alpha=0.9$ ,  $\rho_{alta}=0.8$ ) e os parâmetros do processo de interferência iguais a ( $\rho=0.3$ ,  $c=0.5$ ,  $\alpha=0.9$ ,  $\rho_{alta}=0.8$ )

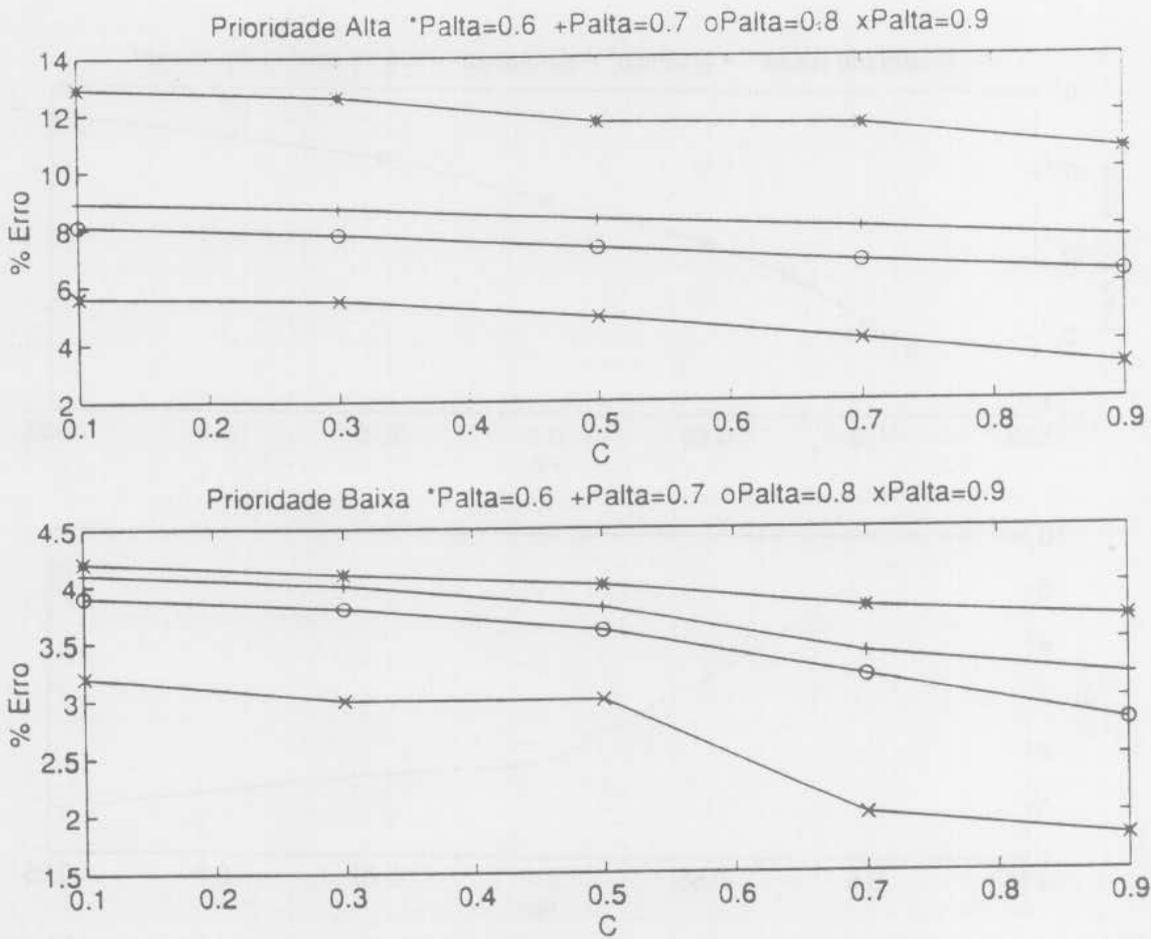


Figure 5: Erro percentual da taxa de perda como uma função do parâmetro  $c$  do processo de entrada cujos demais parâmetros são ( $\rho=0.8, \alpha=0.1$ ) e cujos parâmetros do processo de interferência são ( $\rho=0.5, c=0.1, \alpha=0.1, p_{alta}=0.7$ )

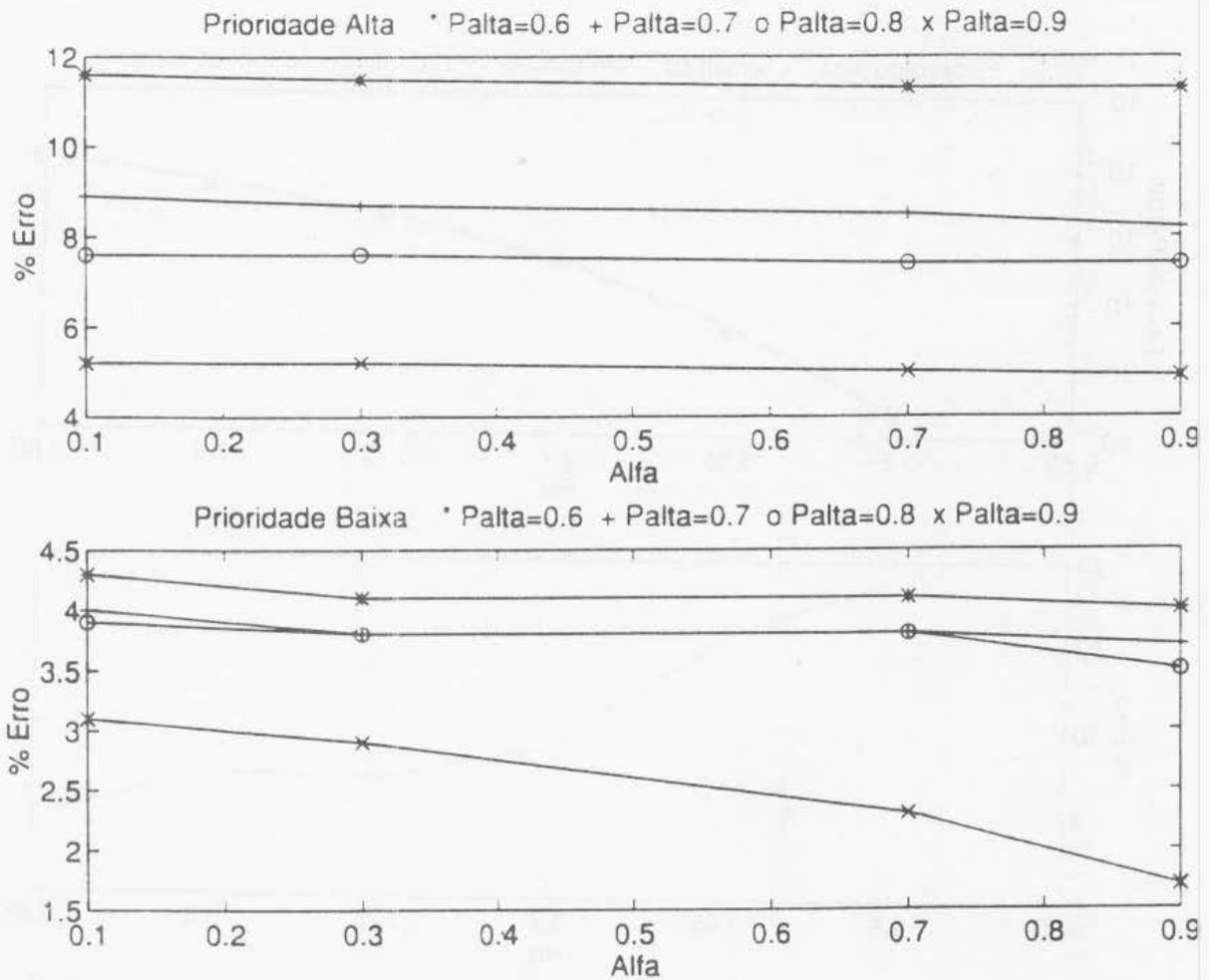


Figure 6: Erro percentual da taxa de perda como uma função do parâmetro  $\alpha$  do processo de entrada cujos demais parâmetros são ( $\rho=0.8$ ,  $c=0.1$ ) e cujos parâmetros do processo de interferência são ( $\rho=0.5$ ,  $c=0.1$ ,  $\alpha=0.1$ ,  $\rho_{alta}=0.7$ )

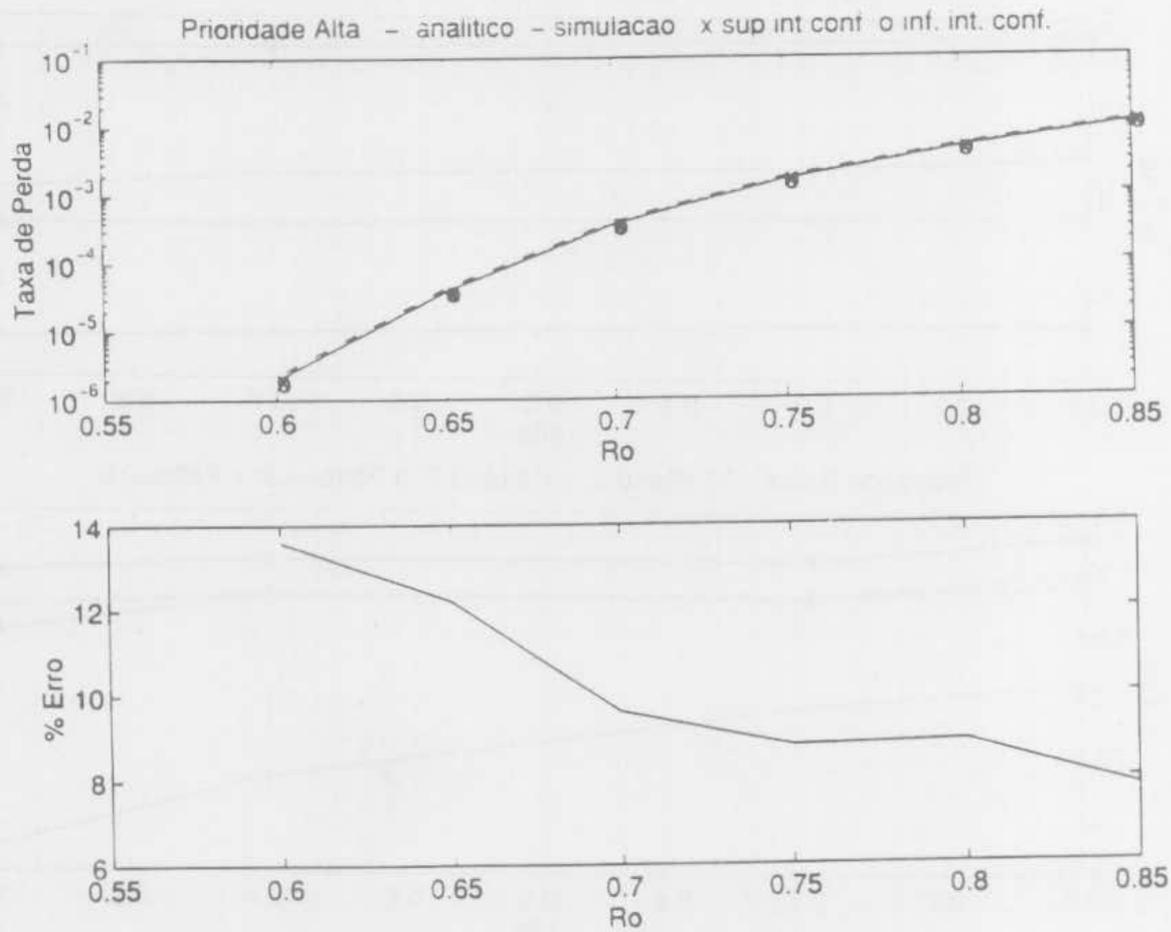


Figura 7: Taxa de perda fim-a-fim em uma rede "tandem" com 4 nós