

# Estudo da Eficácia do Método de Diversidade de Caminhos para Aplicações Multimídia

Bruno Felisberto Ribeiro<sup>1\*</sup>, Edmundo de Souza e Silva<sup>1†</sup> e Donald Towsley<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro  
COPPE/Prog. de Engenharia de Sistemas e Computação  
Caixa Postal 68511, CEP: 21941-972  
Rio de Janeiro, RJ  
{bruno, edmundo}@land.ufrj.br

<sup>2</sup>Department of Computer Science, University of Massachusetts  
Amherst, MA 01003 USA  
towsley@cs.umass.edu

**Abstract.** *A number of works have addressed methods to cope with the poor quality of service of the Internet. One of the proposed methods is to stream data using distinct paths connecting the source and the receiver to achieve better end-to-end loss behavior. One of the main advantages of this technique (called path diversity) resides in the fact that it is neither based on adding redundancy to the original flow nor making any changes in the current Internet protocols. This paper extends the analysis on the performance on path diversity encountered on previous work. Our studies address two main issues. First, the performance gains obtained are evaluated when the number of paths is increased. Second, we investigate the performance of path diversity when the streams that use the technique consumes a non-negligible amount of the network's bandwidth.*

**Resumo.** *Muitos trabalhos sobre métodos destinados a lidar com a qualidade insatisfatória dos serviços prestados pela Internet podem ser encontrados na literatura. Um destes métodos é a diversidade de caminhos ou path diversity, sendo uma de suas principais vantagens o fato de não haver necessidade de redundância adicional nem mudança nos protocolos usados atualmente na Internet (marcação de pacotes, etc) para que este seja empregado. Este artigo se propõe a estender a análise do desempenho da diversidade de caminhos encontrada em trabalhos anteriores. Nossos estudos visam elucidar dois problemas principais. Primeiramente verificar se o aumento do número de caminhos melhora o desempenho do método. E, em segundo lugar, investigar o desempenho da diversidade de caminhos quando os fluxos desta técnica consomem uma quantidade não negligenciável da banda da rede.*

---

\*Bruno Felisberto Ribeiro teve bolsa de mestrado da CAPES.

†E. de Souza e Silva é financiado pelos recursos do CNPq/ProTeM, PRONEX e FAPERJ.

## 1. Introdução

O método de diversidade de caminhos ou *path diversity* é um método utilizado para melhorar as características de perda fim-a-fim de aplicações multimídia sobre redes com serviço de melhor esforço. A idéia básica do método é simples: os pacotes da aplicação são enviados para o destino por dois ou mais caminhos distintos.

Este método foi inicialmente proposto como um esquema de roteamento para melhorar a confiabilidade das transmissões e ao mesmo tempo suavizar o tráfego [13]. Entretanto, este também pode ser utilizado para reduzir o tamanho das rajadas de perda de pacotes quando aplicações multimídia enviam fluxos de dados. Como o tamanho das rajadas de perda têm um efeito adverso na qualidade das aplicações de vídeo e áudio [11], reduzi-lo pode melhorar significativamente a qualidade do vídeo ou do áudio transmitidos.

### 1.1. Alguns problemas da diversidade de caminhos

Atualmente, a Internet não provê suporte para a diversidade de caminhos no nível da camada IP, sendo necessária a sua implementação na camada de aplicação. Caso os dados possam ser replicados em diversos servidores e acessados por múltiplos caminhos, cabe à aplicação receptora apenas agrupar os diversos fluxos recebidos em um fluxo único. Entretanto, caso a mídia não possa ser replicada (como, por exemplo, fluxos de aplicações de tempo real), a diversidade de caminhos necessita de servidores que atuem como redirecionadores de tráfego (*relays* [10]).

A diversidade de caminhos faz uso da independência entre os processos de perda de pacotes em caminhos distintos para reduzir o tamanho das rajadas de perda. A redução no tamanho das rajadas de perda deve ser significativa, visando compensar o esforço extra de se buscar múltiplos caminhos para entrega dos pacotes, bem com a implementação de novos algoritmos. Deve-se ressaltar que caso não exista independência entre as perdas nos diversos caminhos a eficácia do método é reduzida significativamente.

### 1.2. Trabalhos relacionados

Gogate e Panwar [7] foram os primeiros a aplicar o conceito de diversidade de caminhos para tráfegos multimídia. Neste trabalho, uma rede sem fio foi utilizada como ambiente para a aplicação do método. Em [12] este conceito foi aplicado à redes *ad-hoc*.

Os trabalhos de Apostolopoulos [2] e Girod et al [10], foram os primeiros a estudar a diversidade de caminhos na Internet. Após estes trabalhos, diversos outros foram publicados como [3, 8], porém a maioria destes trabalhos não será revista aqui devido à falta de espaço.

Um dos principais e mais recentes trabalhos é o de Golubchick et al. [8], que analisa a diversidade de caminhos para aplicações de vídeo pré-armazenado. Neste trabalho, somente dois caminhos são analisados e o processo de perda dos canais é modelado através do modelo de Gilbert. Os autores concluíram que, em geral, a diversidade de caminhos (considerando somente dois caminhos) melhora as características de perda de pacotes independente do uso de esquemas de correção de erro e melhora a distribuição do tamanho da rajada de perda de pacotes se comparado com o envio destes utilizando um único caminho.

### 1.3. Sumário das contribuições

A maioria dos trabalhos relacionados na sub-seção 1.2 apenas considera a diversidade de caminhos sobre dois caminhos, não realizando estudos criteriosos nos casos onde três ou mais caminhos são utilizados.

Em decorrência deste fato, não existe um entendimento claro do desempenho do método quando são utilizados mais caminhos para enviar o fluxo de dados. Também não existem estudos analíticos que mostrem a influência da utilização de mais de dois caminhos nas estatísticas de perda em rajada dos pacotes.

Este trabalho contribui para a investigação da eficácia da diversidade de caminhos sob vários aspectos. Primeiramente, na seção 2, foram desenvolvidos modelos para calcular a função probabilidade de massa (pmf) do tamanho da rajada de perda quando  $N$  caminhos são utilizados, sendo considerados caminhos homogêneos e caminhos heterogêneos. Estes modelos estendem os dados na literatura e revelam anomalias interessantes quando o número de caminhos é aumentado. Uma das conclusões observadas é que aumentar o número de caminhos não é garantia que o desempenho do método melhore. Foi também estudado o desempenho do método quando combinado com um esquema de FEC (*Forward Error Correction*).

Na seção 3, foram estudados diversos problemas que surgem quando um grande número de aplicações utilizam a diversidade de caminhos. Para tal, foram desenvolvidos dois modelos: um modelo de fluido simples e um modelo de simulação que inclui tráfego TCP compartilhando os canais com o tráfego da diversidade de caminhos. Um dos resultados obtidos pelos dois modelos indica que os benefícios da diversidade de caminhos diminuem a medida que mais aplicações utilizam o método.

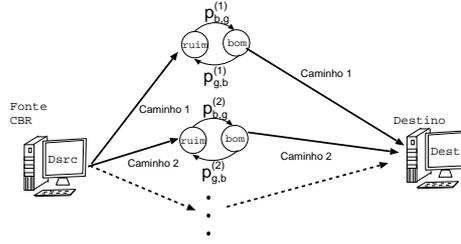
Finalizando, na seção 4 são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como os trabalhos futuros.

## 2. Diversidade de caminhos com mais de dois caminhos

Nesta seção a eficácia da diversidade de caminhos com  $N > 2$  caminhos é estudada. O objetivo é avaliar se o desempenho do método melhora quando o número de caminhos é aumentado.

A Figura 1 mostra um modelo utilizado na literatura [3, 8], onde o processo de perda fim-a-fim é modelado através do modelo de tempo contínuo de Gilbert. Nesta mesma Figura são mostradas as probabilidades de transição do processo uniformizado equivalente (veja em [5] os detalhes sobre uniformização). Durante todo trabalho utilizaremos o processo uniformizado.

Seja  $\mathcal{X}_r = \{X_r(t) : t \geq 0\}$  o processo de perda do  $r$ -ésimo caminho. O estado  $X_r(t)$  no tempo  $t$  pode assumir os seguintes valores:  $b$  ou  $g$ , ( $g=good$  e  $b=bad$ ). Iremos assumir que a fonte transmite pacotes em intervalos regulares de tamanho fixo ( $\tau$ ) e que os pacotes são distribuídos entre os canais usando a política *round-robin*. Portanto, observaremos o estado dos caminhos nos intervalos  $\tau$ ,  $2\tau$  etc., e assumiremos, sem perda de generalidade, que  $\tau = 1$  unidade de tempo para simplificar a notação. Assumiremos, também, que  $\mathcal{X}_r$  é estacionário e independente de  $\mathcal{X}_u$  para todos os pares  $r \neq u$ . Um pacote é perdido se  $X_r(n) = b$  quando o  $n$ -ésimo pacote transmitido pela fonte é enviado pelo caminho  $r$ . Sejam  $\mu_b^{(r)}$  e  $\mu_g^{(r)}$  respectivamente as taxas de transição entre os estados *bad* e *good*, e seja  $\Lambda^{(r)} = \mu_b^{(r)} + \mu_g^{(r)}$  a taxa de uniformização escolhida.



**Figura 1: Modelo de diversidade de caminhos.**

Sejam  $\pi_g^{(r)}$  e  $\pi_b^{(r)}$  as probabilidades em estado estacionário de que  $\mathcal{X}_r$  esteja no estado “good” ou “bad” respectivamente, e seja  $p_{i,j}^{(r)}(l)$  a probabilidade de  $\mathcal{X}_r$  transicionar do estado  $i$  para o estado  $j$  em  $l$  unidades de tempo, i.e.  $p_{i,j}^{(r)}(l) = P[X_r(n+l) = j | X_r(n) = i] = P[X_r(l) = j | X_r(0) = i]$ . Claramente o processo uniformizado obtido a partir de  $\mathcal{X}_r$  tem probabilidades de transição:  $p_{g,b}^{(r)} = \mu_b^{(r)}/\Lambda^{(r)}$  e  $p_{b,g}^{(r)} = \mu_g^{(r)}/\Lambda^{(r)}$ . Além disso,  $\pi_b^{(r)} = \mu_g^{(r)}/\Lambda^{(r)}$  e  $\pi_g^{(r)} = \mu_b^{(r)}/\Lambda^{(r)}$  são as probabilidades em estado estacionário dos estados de  $\mathcal{X}_r$ .

Seja  $\mathcal{A}$  um conjunto de  $N$  caminhos com, possivelmente, processos de perda distintos. Seja  $\Gamma_N = \{\mathcal{X}_1, \mathcal{X}_2, \dots, \mathcal{X}_N\}$  um conjunto de processos de perda associados aos caminhos  $1, \dots, N$  e seja  $L(\Gamma_N)$  uma variável aleatória que denota o tamanho de uma rajada de perda usando os caminhos denotados por  $\Gamma_N$ . (Note que  $L(\Gamma_N)$  pode assumir valores  $1, 2, \dots$ ). No que segue, acharemos  $P[L(\Gamma_N) = m]$  e usaremos esta probabilidade para comparar a eficácia da diversidade de caminhos utilizando dois ou mais caminhos.

## 2.1. Caminhos homogêneos

Nesta sub-seção é assumido que  $\mathcal{X}_r$  esteja em estado estacionário e todos os caminhos sejam homogêneos, i.e. que os  $\mathcal{X}_r$ 's sejam i.i.d. (independentes e identicamente distribuídos). A suposição de que todos os caminhos sejam homogêneos será relaxada na próxima sub-seção. Neste caso, usaremos  $\mathcal{H}$  no lugar de  $\Gamma$  para enfatizar que todos os caminhos são homogêneos. O subscrito  $N$  em  $\mathcal{H}_N$  indica que a diversidade de caminhos é feita utilizando  $N$  caminhos.

Golubchick *et al* [8] obteve  $P[L(\mathcal{H}_2) = m]$ , i.e., o conjunto  $\mathcal{A}$  continha apenas dois elementos. Este resultado é estendido a seguir para um número arbitrário de caminhos.

Primeiramente, calculemos  $p_{i,j}(l)$ . É sabido que, para uma cadeia de Markov de dois estados:

$$\begin{bmatrix} p_{g,g}(l) & p_{g,b}(l) \\ p_{b,g}(l) & p_{b,b}(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_g & \pi_b \\ \pi_g & \pi_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \pi_b & -\pi_b \\ -\pi_g & \pi_g \end{bmatrix} e^{-l\Lambda} \quad (1)$$

onde  $l$  é a variável que indica o tempo. O seguinte teorema calcula a probabilidade que uma rajada de perda tenha tamanho  $m$  quando múltiplos caminhos são utilizados.

**Teorema 1.** *Suponha que uma fonte envie pacotes para o receptor usando  $N \geq 2$  caminhos (round robin). Quando os processos de perda de todos os caminhos são i.i.d., dado que uma rajada de perda ocorreu, a*

probabilidade que esta rajada tenha tamanho  $m$  é:

$$P[L(\mathcal{H}_N) = m] = \begin{cases} \pi_b^{m-1} \pi_g & \text{para } m < N - 1, \\ \pi_b^{N-2} p_{g,g}(N) & \text{para } m = N - 1, \\ \pi_b^{N-2} p_{g,b}(N) [p_{b,b}(N)]^{m-N} p_{b,g}(N) & \text{para } m \geq N \end{cases} \quad (2)$$

*Demonstração.* Esta demonstração encontra-se no apêndice A.1. □

O Corolário 1 a seguir compara a probabilidade de que haja uma rajada de perda de tamanho até  $k$  usando  $k$  caminhos com uma rajada de perda de tamanho até  $k$  usando mais de  $k$  caminhos. Para esta comparação o seguinte lema é necessário.

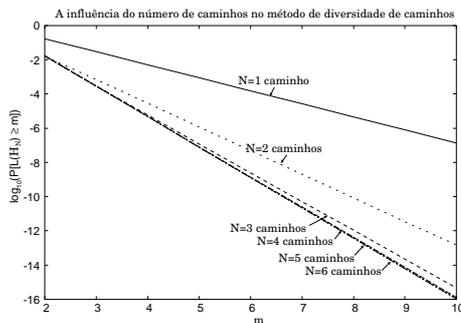
**Lema 1.** *Considere um modelo de Gilbert contínuo. Então, para  $N$  finito,  $p_{g,g}(N) > \pi_g$ .*

*Demonstração.* Pela equação (1)  $p_{g,g}(N) = \pi_g + \pi_b e^{-N}$ . O lema segue diretamente desta equação. □

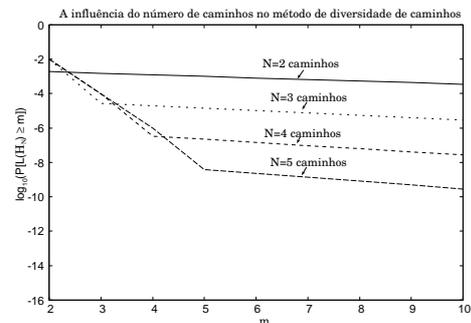
**Corolário 1.**  $P[L(\mathcal{H}_k) < k] \geq P[L(\mathcal{H}_N) < k]$  para  $1 < k < N$ ,  $N$  finito.

*Demonstração.* A demonstração encontra-se no apêndice A.2. □

Podemos utilizar o Corolário 1 para deliberar sobre a questão: “A eficácia da diversidade de caminhos melhora com o aumento do número de caminhos?”. A resposta depende da sensibilidade da aplicação a pequenas e longas rajadas de perda. Aumentar o número de caminhos não necessariamente melhora a qualidade percebida pelo usuário. Quando aumentamos o número de caminhos, a probabilidade de rajadas grandes diminui, no entanto, a probabilidade de rajadas menores aumenta. Como a probabilidade de rajadas muito longas em geral é bem pequena, pode ser que não seja eficiente utilizar a diversidade de caminhos sobre muitos caminhos.



**Figura 2:**  $\log_{10}(P\{L(\mathcal{H}_N) \geq m\})$ , modelo de Gilbert com parâmetros  $p_{g,b}(1) = 0.0141$  e  $p_{b,b}(1) = 0.1732$ .



**Figura 3:**  $\log_{10}(P\{L(\mathcal{H}_N) \geq m\})$ , modelo de Gilbert com parâmetros  $p_{g,b}(1) = 0.001$  e  $p_{b,b}(1) = 0.9$ .

Todas as curvas da Figura 2 foram obtidas usando a equação (2) onde os parâmetros para o modelo de Gilbert foram obtidos em [16]. Podemos observar na Figura que o ganho do método é mínimo quando mais de quatro caminhos é utilizado.

Na Figura 3 os parâmetros do modelo de Gilbert foram modificados. Nesta Figura, o tempo médio no estado *bad* foi aumentado para estudar a eficiência do método quando os caminhos possuem forte tendência a ter rajadas de perda muito longas.

A Figura mostra que, quando quatro ou mais caminhos são utilizados, a probabilidade de rajadas de perda grandes (digamos, maiores que cinco) é muito pequena. Portanto, aumentar o número de caminhos pode não valer o esforço, pois o ganho seria muito pequeno. Também é interessante observar que, quando o número de caminhos aumenta de quatro para cinco, a probabilidade de ocorrer uma rajada de comprimento maior que cinco decresce como esperado, mas, por outro lado, a probabilidade de ocorrer rajadas de tamanho maior que quatro aumenta.

Suponhamos que o número de caminhos aumente de dois para três. Neste caso, aumenta a probabilidade de perder dois ou mais pacotes consecutivos. Este resultado é contra-intuitivo, uma vez que esperava-se que usando mais caminhos se diminuísse a probabilidade de haver rajadas maiores ou iguais a dois. Portanto, aumentar o número de caminhos pode ter um impacto negativo na qualidade das aplicações. Por conseguinte, a aplicação precisa ter cuidado ao avaliar o efeito de adicionar mais caminhos, sempre levando em conta os processos de perda dos canais.

É sabido que as aplicações multimídia são afetadas pelo número de perdas consecutivas (em Liang *et al* [11] há um estudo sobre o efeito das rajadas de perda na qualidade das aplicações de vídeo). Claramente podemos combinar a diversidade de caminhos com um esquema de FEC para reduzir ainda mais o tamanho das perdas. O trabalho de Nguyen *et al* [14] analisou um esquema de FEC que possui um bom desempenho quando utilizado juntamente com a diversidade de caminhos sobre dois caminhos distintos.

Aplicaremos nosso modelo para analisar a eficácia de um esquema FEC acoplado à diversidade de caminhos e compararemos a eficiência deste novo esquema quando dois e três caminhos são utilizados. Para esta comparação uma nova métrica será definida. Suponha que nosso objetivo seja maximizar o número de pacotes corrigidos pelo esquema FEC dado em [4], quando combinado com a diversidade de caminhos. Este esquema FEC pode corrigir a perda de um único pacote de uma rajada de perda de qualquer tamanho. Defina a função

$$\phi(\mathcal{H}_N) = \sum_{m=1}^{\infty} P[L(\mathcal{H}_N) = m]/m$$

como a fração de pacotes corrigidos pelo esquema dado em [4]. (Outros esquemas de FEC também poderiam ser utilizados, como o esquema dado em [6], mas o esquema de [4] foi escolhido para este exemplo pois a função  $\phi(\mathcal{H}_N)$  neste caso é muito simples).

A Figura 4 mostra  $\phi(\mathcal{H}_2) - \phi(\mathcal{H}_3)$  como uma função dos parâmetros  $p_{g,b}(1)$  e  $p_{b,b}(1)$  do modelo de perda. Uma vez que  $\phi(\mathcal{H}_2) - \phi(\mathcal{H}_3)$  é sempre positivo, fica óbvio que dois caminhos é melhor do que três para este esquema de FEC. Esta conclusão também é válida quando o número de caminhos é aumentado ( $> 3$ ). Este comportamento peculiar é resultante do Corolário 1 e mostra que para esta dada aplicação, o aumento no número de caminhos piora a qualidade do método.

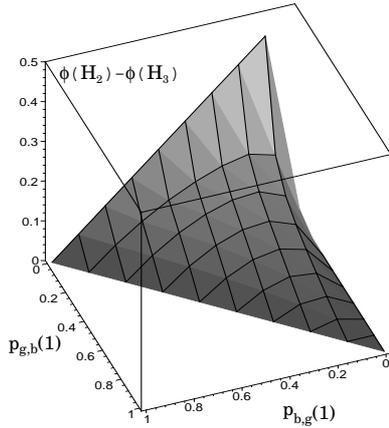


Figura 4: Diferença entre a fração de pacotes recuperados usando dois e três caminhos.

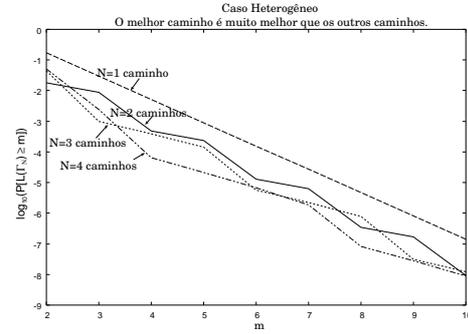


Figura 5:  $P[L(\Gamma_N) \geq m]$  para diferentes valores de  $N$ .

## 2.2. Caminhos heterogêneos

Nesta sub-seção será considerado o caso em que os caminhos são heterogêneos, ou seja, o modelo de Gilbert utilizado para cada um dos caminhos possui diferentes valores em seus parâmetros embora os processos de perda ainda sejam independentes. Seja  $\Theta(r, \Gamma_N)$  a fração das rajadas de perda em que o primeiro pacote perdido foi enviado pelo caminho  $r$  (relembrando que  $\Gamma_N$  é o conjunto dos processos de perda dos  $N$  caminhos escolhidos). Sem perda de generalidade, assumiremos que a aplicação seleciona os caminhos em *round robin*. Então, se um pacote é enviado pelo caminho  $r$ , o próximo pacote será enviado pelo caminho  $(r + 1)|_N$ , onde “ $|$ ” é um operador módulo definido da seguinte forma: seja  $\varsigma$  o resto de  $(r)/N$ ; então  $(r)|_N = \varsigma + 1$ .

**Lema 2.**

$$\Theta(r, \Gamma_N) = \frac{\pi_g^{(r-1)} \pi_b^{((r)|_N)}}{\sum_i^N \pi_g^{(i-1)} \pi_b^{((i)|_N)}} \quad (3)$$

*Demonstração.* A demonstração encontra-se no apêndice A.3 □

Com o lema acima podemos calcular  $P[L(\Gamma_N) = m]$ , i.e. a probabilidade que a rajada de perda tenha tamanho  $m$  quando são usados  $N$  caminhos heterogêneos independentes. O corolário abaixo é uma extensão do resultado dado no Teorema 1.

**Corolário 2.** Para  $N \geq 2$ ,

$$P[L(\Gamma_N) = m] = \sum_{r=1}^N \Theta(r, \Gamma_N) \times \begin{cases} \left[ \prod_{i=1}^{m-1} \pi_b^{((r+i)|_N)} \right] \pi_g^{((r+m)|_N)} & \text{para } m < N - 1, \\ \left[ \prod_{i=1}^{N-2} \pi_b^{((r+i)|_N)} \right] p_{g,g}^{((r+N-1)|_N)}(N) & \text{para } m = N - 1, \\ \sigma(r, \Gamma_N) & \text{para } m \geq N \end{cases}$$

$$\text{onde, } \sigma(r, \Gamma_N) = \left[ \prod_{i=1}^{N-2} \pi_b^{((r+i)|_N)} \right] p_{g,b}^{((r+N-1)|_N)}(N) \left[ \prod_{i=1}^{(m-N)} p_{b,b}^{(r-1+i)|_N}(N) \right] p_{b,g}^{((r+m)|_N)}(N)$$

*Demonstração.* Esta demonstração segue os mesmos passos do Teorema 1, dado que condicionamos que a rajada de perda começa no caminho  $r$ .  $\square$

A partir do Corolário 2 é possível observar que algumas conclusões obtidas no caso homogêneo não podem ser estendidas para o caso heterogêneo. Por exemplo, o Corolário 1 não é válido quando os caminhos são heterogêneos.

A Figura 5 ilustra um caso onde a aplicação tem quatro caminhos disponíveis para usar: um caminho relativamente *bom* (onde  $\mathcal{X}_1$  é tal que  $p_{g,b}^{(1)}(1) = 0.0141$  e  $p_{b,b}^{(1)}(1) = 0.1732$ ) e três caminhos relativamente *ruins* (onde  $\mathcal{X}_i$  é tal que  $p_{g,b}^{(i)}(1) = 0.0141$  e  $p_{b,b}^{(i)}(1) = 0.8$ ,  $i = 2 \dots 4$ ). A Figura mostra  $P[L(\Gamma_N) \geq m]$  para diferentes valores de  $N$ . Quando  $N = 1$ , é assumido que a aplicação envia pacotes somente pelo caminho *bom*. Já quando  $N > 1$ , a aplicação estará usando o caminho *bom* e os outros  $N - 1$  caminhos *ruins*.

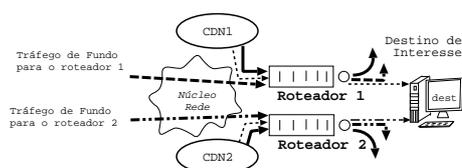
Dependendo do valor do tamanho rajada de perda, a probabilidade de uma rajada maior que  $m$  usando  $k > 1$  caminhos pode ser maior ou menor dependendo do número de caminhos utilizados. Pela Figura 5 fica claro que a diversidade de caminhos ainda é melhor do que utilizar apenas o melhor caminho, mesmo que os caminhos adicionais sejam relativamente *ruins*. Entretanto, adicionar mais caminhos pode piorar o desempenho do método.

### 3. Escalabilidade da Diversidade de Caminhos

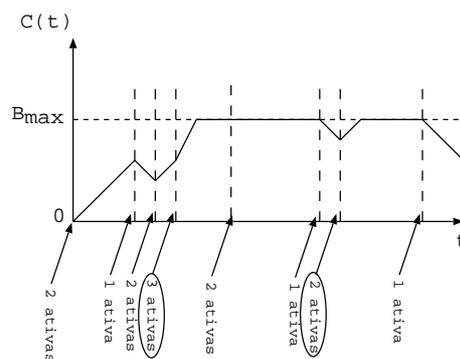
As redes de distribuição de conteúdo (CDNs) são planejadas para servir uma grande população de usuários. Neste ambiente, a diversidade de caminhos pode ser usada para melhorar a qualidade das aplicações de vídeo e áudio. Entretanto, neste caso, a fração da banda consumida por estas aplicações pode ser grande. Este fato pode induzir indesejáveis correlações de perda entre os diversos caminhos (mesmo sendo estes disjuntos) e pôr em dúvida a suposição feita previamente. Apesar disto, espalhar o tráfego por vários caminhos diminui as rajadas de tráfego (*traffic burstness*), o que por sua vez reduz a probabilidade de perda [9]. Nesta seção iremos estudar este problema. Para tal usaremos dois caminhos e as aplicações que fazem uso da diversidade consumirão uma grande porção da banda disponível da rede.

A Figura 6 mostra um exemplo com duas CDNs, cada uma com vários servidores de vídeo e áudio. Neste exemplo existem duas maneiras de servir as requisições dos clientes. No primeiro caso, apenas um servidor de uma das CDNs é escolhido para enviar o fluxo multimídia requerido pelo cliente. No segundo caso, o fluxo multimídia é servido por dois servidores, cada qual situado em uma das CDNs, que, conjuntamente, servem ao cliente. Neste último caso, por exemplo, um dos servidores pode servir os pacotes ímpares enquanto o outro servirá os pacotes pares.

Esta segunda abordagem corresponde ao método da diversidade de caminhos. Resumindo, a eficácia da diversidade de caminhos em diminuir o tamanho das rajadas de perda é influenciada por: (1) o grau de correlação dos processos de perda dos diferentes caminhos e; (2) o grau de suavização do tráfego que ocorre como consequência do espalhamento do tráfego por diversos caminhos. A seguir iremos quantificar o impacto da diversidade de caminhos quando o método é utilizado por uma grande quantidade de servidores e avaliar a troca entre aumentar a correlação de perda e suavizar o tráfego.



**Figura 6: Modelo para analisar a escalabilidade da diversidade de caminhos.**



**Figura 7: Caminho amostral de  $C(t)$  versus  $t$ . “ $i$  ativas” significa que  $i$  fontes estão ativas neste momento.**

O modelo que usaremos está representado na Figura 6. Nossa análise inicial assume que não há tráfego de fundo. Cada CDN possui  $K$  fontes multimídia que estaremos modelando como fontes On/Off. Para avaliarmos a distribuição do tamanho da rajada de perda, primeiramente iremos calcular a distribuição do tempo em que o roteador permanece cheio.

Seja  $\mathcal{Z} = \{Z(t) : t \geq 0\}$  um processo de nascimento e morte (*birth-death process*) que representa o número de fontes On/Off ativas de um total de  $K$  fontes. Seja  $\mathbf{Q}$  a matriz de transição de taxa de  $\mathcal{Z}$  e  $\mathbf{P}$  a matriz de transição de probabilidade obtida após a uniformização de  $\mathcal{Z}$  [5]. No modelo de fluido da fonte, a recompensa de taxa  $r_i$  representa a taxa total em que o tráfego enche a fila do roteador quando a fonte está no estado  $i$ . Portanto,  $r_i = i\lambda - c$ , onde  $\lambda$  é a taxa que a fonte transmite o tráfego para o roteador enquanto ela está no estado “On” e  $c$  é a capacidade do canal. Seja  $C(t)$ ,  $0 \leq C(t) \leq B$  a quantidade total de fluido na fila do roteador no tempo  $t$ . A seguir obteremos a distribuição da variável aleatória  $T_f$ , a duração do tempo em que a fila permanece cheia.

A Figura 7 mostra um caminho amostral de  $C(t)$ . Claramente, se soubermos o estado de  $\mathcal{Z}$  quando a fila enche, então  $T_f$  é igual ao tempo que este estado demora para atingir algum estado com recompensa negativa pela primeira vez *first passage time*. Na Figura 7 a elipse circulando os estados “3 ativas” e “2 ativas” indica o estado da fonte quando a fila enche.

Particionaremos o espaço de estados de  $\mathcal{Z}$  em dois subconjuntos. Seja  $\mathcal{S}_1$  o conjunto de estados que inclui todos os estados com recompensas negativa e  $\mathcal{S}_2$  o conjunto dos outros estados (aqueles com  $r_i \geq 0$ ). Isto impõe uma partição da matriz estocástica  $\mathbf{P}$  onde  $\mathbf{P}_{ij}$  contém as probabilidades de transição dos estados

em  $\mathcal{S}_i$  para os estados em  $\mathcal{S}_j$ .

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix}.$$

As matrizes  $\mathbf{P}_{ii}$  são sub-estocásticas e a  $(i, j)$ -ésima entrada de  $(\mathbf{I} - \mathbf{P}_{22})^{-1}$  é o número médio de visitas ao estado  $j \in \mathcal{S}_2$  dado que entrou-se em  $\mathcal{S}_2$  pelo estado  $i \in \mathcal{S}_2$ . (Note que, no nosso modelo de nascimento e morte, só existe um estado de entrada em  $\mathcal{S}_2$  a partir de  $\mathcal{S}_1$ .) Defina  $\mathbf{w}^*$  tal que o elemento  $w_i^*$  seja a probabilidade que a condição de fila cheia comece no estado  $i \in \mathcal{S}_2$ . Seja  $\mathbf{v}_2^*$  um vetor no qual o  $i$ -ésimo elemento é igual à fração do tempo gasto no estado  $i \in \mathcal{S}_2$  quando a fila está cheia, ou seja,  $[v_2^*]_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P[Z(t) = i | C(t) = B]$ . É fácil perceber que a seguinte igualdade é verdadeira:

$$\mathbf{w}^* (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{22})^{-1} = \mathbf{v}_2, \quad (4)$$

$\mathbf{v}_2^* = \mathbf{v}_2 / (\mathbf{v}_2 \mathbf{e})$ , ou seja  $\mathbf{v}_2^*$  é  $\mathbf{v}_2$  normalizado, e  $\mathbf{e}$  é um vetor onde todas as entradas são iguais a um. A equação (4) possui uma solução não nula se  $\mathbf{P}_{22}$  é sub-estocástica.

Pallares-Ségarra e García-Haro [15] mostrou como obter  $\mathbf{v}_2^*$  para fontes On/Off homogêneas (nosso modelo). A abordagem envolve a solução de um sistema de  $K + 1$  equações lineares (veja também [1]). Em [15] fontes heterogêneas também são tratadas, mas a abordagem é computacionalmente mais complexa. Uma vez que  $\mathbf{v}_2^*$  é obtida,  $\mathbf{w}^*$  pode ser imediatamente calculada a partir (4).

O número médio de visitas a um estado em  $\mathcal{S}_2$  quando a fila está cheia é  $[\mathbf{w}^* (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{22})^{-1}] \mathbf{e}$ . Seja  $\Lambda$  a taxa de uniformização escolhida para  $\mathcal{Z}$ . Como o tempo médio entre qualquer transição do processo uniformizado é  $1/\Lambda$ , teremos,

$$E[T_f] = \frac{[\mathbf{w}^* (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{22})^{-1}] \mathbf{e}}{\Lambda}. \quad (5)$$

Uma vez que  $\mathbf{w}^*$  é obtida, podemos também calcular a distribuição de  $T_f$ . Ver [5] para alguns métodos que podem ser usados neste caso.

A partir da distribuição de  $T_f$ , podemos avaliar os possíveis benefícios da diversidade de caminhos para o tamanho da rajada de perda na fila do roteador. Por exemplo, se uma fonte transmite a uma taxa (constante) de  $\lambda$  pacotes por unidade de tempo, então o evento  $L > m$  (relembrando que  $L$  é a variável aleatória que dá o tamanho da rajada de perda) é equivalente ao evento  $T_f > m/\lambda$ . Claramente, se  $P[T_f > m/\lambda]$  é reduzido quando usamos diversidade de caminhos, então  $P[L > m]$  também é reduzido.

A Figura 8 mostra a distribuição de  $T_f$  para um roteador de borda alimentado por 30 fontes On/Off usando diversidade de caminhos. Quando a diversidade de caminhos não é utilizada, metade das fontes enviam todo o seu tráfego para um dos roteadores e a outra metade todo o seu tráfego para o outro. Os parâmetros do modelo são: a média do tempo em “On” é igual a  $10^4$  segundos e a taxa de transmissão  $\lambda$  para uma fonte enquanto ela está no estado “On” é de 2Mbps; A capacidade do canal do roteador é 16.5Mbps, e o tamanho do da fila é 1Mb.

Neste exemplo,  $E[T_f] = 1544.8$  quando a diversidade de caminhos é utilizada e  $E[T_f] = 2209.0$  quando este método não é utilizado. Portanto, a partir de  $E[T_f]$  e da distribuição mostrada na Figura 8, fica claro que a diversidade de caminhos pode reduzir significativamente o tamanho das rajadas de perda.

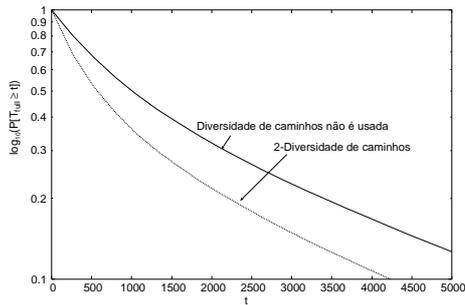


Figura 8: Distribuição do tempo em que a fila permanece cheia.

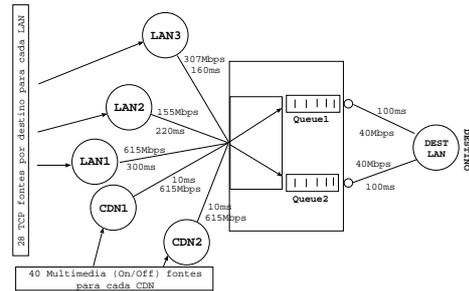


Figura 9: Topologia usada no NS, onde as fontes usando diversidade de caminhos são On/Off CBR e dividem a banda com diversas fontes TCP.

Na análise acima estudamos o caso onde todo o tráfego nos roteadores provinha das CDNs e ou todas usavam diversidade de caminhos ou nenhuma delas a usava. No que segue assumiremos que as CDNs são responsáveis por mais da metade do tráfego nos roteadores e a carga restante de tráfego é gerada por fontes TCP *greedy*. O modelo é mostrado na Figura 9. Este é um modelo de simulação e detalhes sobre o comportamento das fontes estão descritos a seguir: a velocidade e atrasos de propagação são mostrados na Figura 9; as fontes multimídia são ainda modeladas como fontes On/Off Markovianas com tempos médios de “On” e “Off” iguais a  $10^3$  segundos; cada fonte transmite um tráfego CBR quando em “On” à taxa de 125 pacotes/seg e o tamanho dos pacotes é de 1500 bytes; as fontes TCP têm um tamanho de janela máximo igual à 50 pacotes e *MSS* igual a 1500 bytes; o tamanho da fila do roteador é de 50 pacotes e todos os roteadores usam a política de descarte *drop-tail*. Neste experimento foram usadas 80 fontes multimídia e 168 fontes TCP. O tempo simulado foi de 83 horas para cada rodada. No total foram usadas de quatro a oito rodadas para obter cada medida (uma vez que os intervalos de confiança foram muito justos, estes não estão representados na figura).

No experimento foram estudados quatro casos: (1) todas as fontes multimídia das CDNs usam diversidade de caminhos; (2) apenas uma fonte multimídia das CDNs usa diversidade de caminhos, enquanto as outras usam apenas um caminho; (3) nenhuma fonte das CDNs estão usando diversidade de caminhos; (4) todas as fontes das CDNs, exceto uma, estão usando diversidade de caminhos (neste caso estamos interessados na fonte que não usa diversidade de caminhos).

A Figura 10 mostra os resultados da simulação. Nesta figura o gráfico de  $P[L \geq m]$  versus  $m$  é apresentado para cada fonte de interesse. A partir do gráfico fica claro que, quando apenas a fonte de interesse faz uso da diversidade de caminhos, (“Apenas uma usando Diversidade de Caminhos (DC)”) esta fonte se beneficia mais do método. O segundo melhor resultado é quando todas as fontes fazem uso da diversidade de caminhos (“Todas usando DC”). Mesmo quando a fonte de interesse não usa diversidade de caminhos enquanto as outras usam, esta fonte se beneficia, como mostrado pela curva “Todas exceto uma usando DC”. Podemos inferir esta conclusão comparando esta curva com a curva do caso onde nenhuma das fontes usam diversidade de caminhos.

A comparação das curvas “Apenas uma usando Diversidade de Caminhos (DC)” e “Nenhuma usando DC” mostra (o que já era sabido) que a diversidade de caminhos suaviza o tráfego e diminui o

tamanho das rajadas de perda, beneficiando também as fontes que não fazem uso da técnica. Pela Figura 10 nós também podemos concluir que mesmo quando há correlação no processo de perda dos dois roteadores, induzido pelo alto número de fontes utilizando o método, o impacto negativo em  $P[L \geq m]$  não é suficientemente grande para eliminar o benefício do método. Esta afirmação é verdadeira, uma vez que  $P[L \geq m]$  para “Todas usando DC” está sempre abaixo de “Todas exceto uma usando DC” na faixa de valores do gráfico. Portanto, o melhor caso é alcançado quando somente a fonte de interesse usa diversidade de caminhos. Por esta razão podemos concluir que o benefício da suavização do tráfego não é tão forte quanto o benefício obtido pela independência das perdas nas filas dos roteadores. Nota-se que a suavização do tráfego ocorre quando a maioria das fontes das CDNs usam diversidade de caminhos, mas ao mesmo tempo este também é o caso onde a correlação entre os processos de perda é mais alta. Quando somente uma fonte usa a diversidade de caminhos a correlação entre os processos de perda dos dois caminhos é desprezível e a fonte pode se beneficiar plenamente do método.

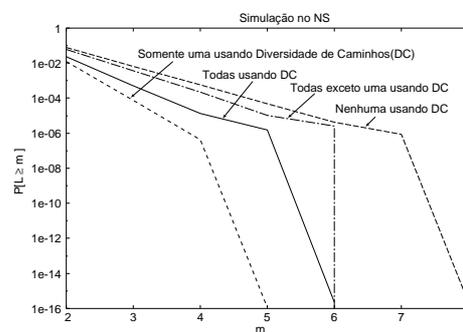


Figura 10: Distribuição da rajada de perda para o modelo da Figura 9.

#### 4. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram analisados diversos aspectos relacionados à diversidade de caminhos. Primeiramente foi desenvolvido um modelo para obter a pmf do tamanho da rajada de perda quando a aplicação usa um número arbitrário  $N$  de caminhos. O modelo revela anomalias interessantes quando o número de caminhos aumenta. A análise mostra que aumentar o número de caminhos não necessariamente melhora a eficiência do método, mesmo quando todos os processos de perda dos caminhos são iguais e independentes. Uma conclusão similar é encontrada quando a diversidade de caminhos é combinada com o esquema de FEC utilizado em [4]. A equação (2) (para caminhos heterogêneos) pode ser empregada pelo analista para decidir, baseado nas estatísticas dos caminhos, qual o número de caminhos a ser usado pela aplicação.

E por último, foi verificada a escalabilidade do método, isto é, qual o efeito resultante quando uma grande porção do tráfego total advém de servidores usando diversidade de caminhos para enviar fluxos de mídia para os seus clientes. A eficácia da diversidade de caminhos reside na independência dos processos de perda dos caminhos. Assim, quando aumentamos o número de aplicações usando a diversidade de caminhos, introduzimos uma correlação nos processos de perda nos caminhos utilizados. Isto por sua vez diminui a eficiência do método. Por outro lado, distribuir a carga de tráfego por vários caminhos suaviza o tráfego total, o que causa a redução do tamanho das rajadas de perda no roteador. Para estudar este efeito, foi

desenvolvido um método para calcular a pmf da rajada de perda usando um modelo de fluido simples. Também foram investigados os custos/benefícios usando um modelo simulado. Por este modelo pudemos concluir que o melhor cenário para a aplicação é quando apenas uma quantidade pequena de fontes utilizam a diversidade de caminhos.

A diversidade de caminhos pode ser empregada conjuntamente com outras técnicas de redução da rajada de perdas, como a interpolação de pacotes ou *packet interleaving*. Estudar a eficácia quando uma combinação dessas técnicas é usada é assunto de trabalho futuro.

## Referências

- [1] D. Anick, D. Mitra, and M. M. Sondhi. Stochastic theory of a data-handling system with multiple sources. *The Bell System Technical Journal*, 61(8), October 1982.
- [2] John Apostolopoulos. Reliable video communication over lossy packet networks using multiple state encoding and path diversity. *Visual Communications and Image Processing (VCIP)*, pages 392–405, January 2001.
- [3] John Apostolopoulos, Tina Wong, Wai tian Tan, and Susie Wee. On multiple description streaming with content delivery networks. *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 2002.
- [4] Jean-Chrysostome Bolot and Andrés Vega-García. Control mechanisms for packet audio in the internet. In *Proceedings of INFOCOM*, pages 232–239, 1996.
- [5] Edmundo de Souza e Silva and H. Richard Gail. Transient solutions for markov chains. In W. Grassmann, editor, *Computational Probability*, pages 43–81. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [6] D.R. Figueiredo and E. de Souza e Silva. Efficient mechanisms for recovering voice packets in the internet. In *Proceedings of IEEE/Globecom, Global Internet: Application and Technology Symposium*, pages 1830–1837, December 1999.
- [7] N. Gogate and S. S. Panwar. Supporting applications in a mobile multihop radio environment using route diversity part I: Non-real time data. *Proceedings of the ICC*, 1998.
- [8] L. Golubchik, J. C.S. Lui, T. F. Tung, A. L.H. Chow, W.-J. Lee, G. Franceschinis, and C. Anglano. Multi-path continuous media streaming: What are the benefits? In *Performance Evaluation*, volume 49, pages 429–449. Kluwer, September 2002.
- [9] E. Gustafsson and G. Karlsson. A literature survey of traffic dispersion. *IEEE Network Magazine*, 11(2):28–36, Mar./Apr. 1997.
- [10] Y. J. Liang, E. G. Steinbach, and B. Girod. Real-time voice communications over the internet using packet path diversity. *Proc. ACM Multimedia*, pages 431–440, Sept/Oct 2001.
- [11] Yi J. Liang, John G. Apostolopoulos, and Bernd Girod. Analysis of packet loss for compressed video: Does burst-length matter? *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-2003*, Apr. 2003.
- [12] S. Lin, S. Mao, Y. Wang, and S. S. Panwar. A reference picture selection scheme for video transmission over ad-hoc networks using multiple paths. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, Aug. 2001.
- [13] N. F. Maxemchuk. *Diversity routing in store and forward networks*. PhD thesis, University of Pennsylvania, 1975.
- [14] Thinh Nguyen and Avidesh Zakhor. Path Diversity with Forward Error Correction (PDF) system for delay sensitive applications over the internet. In *Proc. of the IEEE INFOCOM*, San Francisco, CA, Apr. 2003.
- [15] Esteve Pallarés-Segarra and Joan García-Haro. Fluid-flow approach to evaluate the information loss probability in a finite buffering switching node under heterogeneous ON/OFF input traffic sources. In *Performance Evaluation*, volume 51 (2/4), pages 153–169. Elsevier, February 2003.
- [16] M. Yajnik, S. Moon, Jim Kurose, and Donald Towsley. Measurement and modelling of the temporal dependence in packet loss. *Proc. of the IEEE INFOCOM*, 1999.

## A. Apêndice

### A.1. Prova do Teorema 1

*Demonstração.* Para  $m < N - 1$ :

Dado que uma perda ocorreu, cada um dos  $m - 1$  pacotes seguintes serão perdidos com probabilidade  $\pi_b$  devido à suposição de independência nos processos de perda da estacionaridade dos processos (que também são i.i.d.) . Assim, uma rajada de perda de tamanho  $m$  ocorre com probabilidade  $\pi_b^{m-1}\pi_g$  uma vez que ela precisa acabar quando o caminho está no estado *good*.

Para  $m = N - 1$ :

Dado que uma perda ocorreu, a probabilidade de perder todos os  $N - 2$  pacotes restantes é  $\pi_b^{N-2}$ . Note que o primeiro pacote depois da rajada e o pacote que precede a rajada de perda precisam ser recebidos corretamente e estes pacotes são enviados pelo mesmo caminho. Este evento ocorre com probabilidade  $p_{g,g}(N)$ , e uma vez que ele é independente dos outros eventos, a segunda igualdade da equação (2) é válida.

Para  $m \geq N$ :

Após a primeira perda, os  $N - 2$  pacotes restantes são perdidos com probabilidade  $\pi_b^{N-2}$  e o  $N - 1$ -ésimo pacote é perdido com probabilidade  $p_{g,b}(N)$ . Os pacotes subseqüentes são enviados pelos mesmos caminhos usados quando a rajada de perda ocorreu e todos são perdidos com probabilidade  $p_{b,b}^{m-N}(N)$ . A rajada de perda termina quando um pacote é corretamente recebido e este evento ocorre com probabilidade  $p_{b,g}(N)$ .  $\square$

### A.2. Prova do Corolário 1

*Demonstração.* Pela equação (2)  $P[L(\mathcal{H}_k) = m] = P[L(\mathcal{H}_{k+1}) = m]$  para  $m < k - 1$ . Também a partir da mesma equação:  $P[L(\mathcal{H}_k) = k - 1] = \pi_b^{k-2}p_{g,g}(k)$  e  $P[L(\mathcal{H}_{k+1}) = k - 1] = \pi_b^{k-2}\pi_g$ . Pelo Lema 1 nós temos que  $p_{g,g}(k) > \pi_g$  e portanto  $P[L(\mathcal{H}_k) = k - 1] > P[L(\mathcal{H}_{k+1}) = k - 1]$ . O corolário segue quando somamos os termos apropriados.  $\square$

### A.3. Prova do Lema 2

*Demonstração.* A prova é simples. Construa um modelo de perda (discreto) do processo de perda que a aplicação vê. Este modelo inclui uma variável que indica qual caminho está sendo utilizado e contém  $N$  variáveis, cada uma representando o estado do caminho correspondente (*good* ou *bad*). (Portanto, teremos  $N2^N$  estados). Seja  $B_r$  o evento em que uma rajada inicia no caminho  $r$ . Isto ocorrerá se: (a) o processo de perda do caminho  $(r - 1)|_N$  está no estado “*good*” quando um pacote é enviado pelo caminho  $(r - 1)|_N$  e; (b) o modelo faz uma transição para um estado que indica que o caminho  $r$  está em uso e no estado “*bad*”, independentemente dos outros caminhos. Em estado estacionário, uma vez que todos os processos são independentes, depois de somadas todas as possibilidades, obtemos:  $P[B_r] = 1/N\pi_g^{(r-1)|_N}\pi_b^{(r)}$ . Equação (3) é obtida depois de ser normalizada por  $\sum_{r=1}^N P[B_r]$ .  $\square$