

Modelagem da Probabilidade de Sucesso no Envio de Pacotes Codificados Aplicada a Roteamento Ciente de Codificação para Redes Sem Fio de Múltiplos Saltos

Diego Passos, Célio V. N. Albuquerque

Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense (UFF)
Niterói – RJ – Brasil

{dpassos, celio}@ic.uff.br

Abstract. *This paper analyzes the process of sending a coded packet in the wireless medium. Understanding this basic Network Coding operation is fundamental for the recent work on Coding-aware Routing. The literature on this subject has relied on strong assumptions to simplify the models for evaluating routes. In this paper we present arguments and experimental results that show that some assumptions are not valid in most cases. Based on these results, a more suitable model is proposed. The paper also discusses an alternative method for sending coded packets, different from the methods used in previous work in the area. Experiments show that this new method outperforms the previous proposals.*

Resumo. *Este artigo analisa o processo de envio de um pacote codificado no meio sem fio. A compreensão desta operação básica do paradigma de Codificação de Rede é fundamental para os recentes trabalhos na área de Roteamento Ciente de Codificação. A literatura no assunto tem partido de hipóteses fortes para simplificar os modelos para avaliação de rotas. Neste trabalho, são apresentados argumentos e resultados experimentais que mostram que certas hipóteses são inválidas na maior parte dos casos. Com base nestes resultados, uma modelagem mais apropriada é proposta. O trabalho discute ainda um método para o envio dos pacotes codificados, alternativo aos propostos em trabalhos da área. Experimentos mostram que este método tem desempenho superior às demais propostas.*

1. Introdução

O paradigma tradicional de roteamento define que o processo de *encaminhamento* consiste em replicar um pacote recebido através de um enlace de entrada para um ou mais enlaces de saída [Kurose e Ross 2006]. O conteúdo dos pacotes, a princípio, não é alterado. Durante anos, foram desenvolvidos trabalhos que buscavam melhorar o desempenho e aumentar a capacidade das redes utilizando este paradigma. Em vários casos, entretanto, a evolução tecnológica atingiu um certo ponto de estagnação.

O trabalho em [Ahlswede et al. 2002] introduziu um novo paradigma no qual, durante o processo de encaminhamento, os nós podem também transformar o conteúdo dos pacotes. Esta transformação é realizada através da combinação de diversos pacotes presentes na memória do roteador, gerando uma única mensagem codificada a ser transmitida por um ou mais enlaces de saída. A codificação, em geral, consiste na simples aplicação da operação de *ou-exclusivo* entre os pacotes originais. Este novo paradigma,

denominado *Codificação de Rede*, permitiu a quebra de uma série de barreiras no aumento da capacidade de vários tipos de redes. Em especial, no caso das redes sem fio de múltiplos saltos, trabalhos anteriores mostraram grande potencial na aplicação de métodos de codificação [Katti et al. 2008].

Uma série de trabalhos nesta área tem foco na proposta de estratégias para a escolha dos pacotes mais adequados à codificação [Seferoglu e Markopoulou 2007, Katti et al. 2008]. O objetivo destas estratégias é detectar dinamicamente oportunidades de codificação de forma a maximizar a quantidade de pacotes combinados. O desafio destas propostas é relacionado à restrição de que todos os destinatários do pacote codificado devem ser capazes de decodificar sua respectiva mensagem original.

Mais recentemente, uma nova linha de propostas tem sido explorada com os chamados *Protocolos de Roteamento Cientes de Codificação* [Fan et al. 2009, Sengupta et al. 2007, Le et al. 2010]. Ao invés de apenas aproveitar as oportunidades casuais de codificação, a ideia é proativamente provocar oportunidades através da escolha de rotas adequadas na rede. Quando um novo fluxo de dados é iniciado, o protocolo de roteamento se encarrega de verificar se existem caminhos pelos quais o novo fluxo se cruzaria com fluxos anteriores, o que possivelmente aumentaria as chances de codificação. O desafio neste caso é avaliar de maneira precisa o que é melhor: optar pelo melhor caminho, em termos de métricas tradicionais de roteamento, ou escolher um caminho não-ótimo que, no entanto, propicie mais oportunidades de codificação.

Esta segunda classe de propostas é bastante interessante, pois tem a capacidade de potencializar os ganhos já conhecidos da utilização do paradigma de codificação de rede. É necessária, no entanto, uma métrica de roteamento que seja capaz de incluir em sua formulação os possíveis ganhos do uso de codificação de rede em cada caminho.

Em geral, as métricas de roteamento modelam algum tipo de parâmetro de desempenho da rede, como vazão ou atraso [Passos e Albuquerque 2009]. A informação básica para o modelo da grande maioria das métricas é a probabilidade de perda de quadros em cada enlace de um caminho. A partir desta probabilidade, outras informações são inferidas, como a quantidade necessária de retransmissões de um dado pacote e o atraso fim a fim. O cálculo da probabilidade de perda de quadros de um enlace pode ser realizado de maneira simples, através do envio periódico de pacotes de *probe* [Campista et al. 2008].

Quando a codificação de rede é utilizada, no entanto, a probabilidade de perda de um enlace passa a ter uma definição mais complexa. Um pacote codificado não é transmitido para um nó apenas, mas para um sub-conjunto de vizinhos. Uma tentativa de transmissão, portanto, pode ao mesmo tempo ser bem-sucedida para certos destinatários e mal-sucedida para outros. Por isso, para que os protocolos de roteamento cientes de codificação possam escolher os melhores caminhos é necessário que o processo de transmissão de um pacote codificado para seus vários destinatários seja bem definido e modelado. Como será mostrado na Seção 2, entretanto, os trabalhos propostos na literatura não tratam este aspecto com a atenção necessária.

O objetivo deste artigo é analisar o processo de transmissão de um pacote codificado para um sub-conjunto de vizinhos, de forma a obter um modelo preciso para a probabilidade de recepção de um pacote por cada um de seus destinatários. Os resultados experimentais obtidos refutam, por exemplo, a hipótese de que as probabilidades

de recepção de um mesmo pacote por nós diferentes sejam independentes. Como será discutido na Seção 2, esta hipótese é utilizada pelos principais trabalhos da área.

Outra contribuição deste trabalho é a discussão sobre o método mais adequado para a realização da transmissão de um pacote codificado. Especificamente, é proposto um método alternativo aos utilizados na literatura. Através de experimentos é demonstrado que a proposta apresentada melhora significativamente a probabilidade de recepção do pacote codificado pelos seus destinatários.

O restante do artigo é organizado da seguinte forma. Na Seção 2 são discutidos trabalhos da literatura relevantes às ideias propostas. Na Seção 3 é discutida a hipótese de independência dos eventos de recepção de um dado pacote por vários destinatários. São exibidos resultados experimentais que corroboram os argumentos apresentados. A Seção 4 discute como as métricas de roteamento podem realizar estimativas mais razoáveis das probabilidades de recepção para cada destinatário. Na Seção 5 é apresentado um novo método para realizar a transmissão de pacotes codificados. A seção apresenta também resultados experimentais que mostram que o método proposto garante melhor taxa de sucesso, quando comparado aos métodos utilizados na literatura. Finalmente, a Seção 6 apresenta as conclusões do artigo, além das direções para trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O conceito de codificação de rede foi inicialmente proposto em [Ahlsvede et al. 2002]. O artigo mostra que a simples replicação e roteamento dos pacotes nos roteadores não permite que se alcance o desempenho ótimo em vários casos. Por outro lado, a simples introdução da operação de codificação nos nós pode aumentar a capacidade de uma rede.

A partir deste artigo seminal, muitos trabalhos foram desenvolvidos explorando os benefícios da codificação de rede em ambientes com tráfego *multicast* [Chou et al. 2003, Ho et al. 2003, Zhu et al. 2004]. Ainda nesta linha, existem trabalhos sobre codificação de rede aplicados a redes *Peer-to-Peer*, como o *Avalanche* [Gkantsidis e Rodriguez 2005] que utiliza este paradigma sobre redes de sobreposição para transferência de arquivos.

Outra linha de trabalho bastante explorada é a da *Codificação de Rede Aleatória* [Ho et al. 2003, Ho et al. 2006] na qual várias combinações lineares de um conjunto de n pacotes pertencentes a um fluxo são transmitidas pela rede. Cada nó intermediário sorteia aleatoriamente coeficientes para gerar uma nova combinação, posteriormente replicada na rede. A ideia neste caso é melhorar a resiliência da rede a falhas. Um nó de destino precisa apenas receber n combinações lineares independentes para que seja possível decodificar os pacotes originais.

Mais recentemente, vários trabalhos passaram a explorar os benefícios da codificação de rede aplicada a tráfegos *unicast*. Embora seja demonstrável que, em redes sem erros, a codificação de rede não traz benefícios no caso de um único fluxo *unicast* [Li e Li 2004, Lun et al. 2005] (em redes com erros, a codificação de rede aleatória pode ser útil [Lun et al. 2006]), existem muitos cenários nos quais múltiplos fluxos podem ser combinados, resultado em aumento de capacidade agregada.

A proposta de maior impacto neste sentido é o protocolo COPE [Katti et al. 2008]. Este protocolo utiliza informações da camada de roteamento para escolher para codificação conjuntos de pacotes da fila de saída de um roteador. O COPE aglo-

mera em um mesmo pacote codificado o maior número possível de pacotes nativos (sem codificação) de forma que todos os destinatários tenham alta probabilidade de decodificação. Informações de roteamento são utilizadas para determinar a probabilidade de cada destinatário ter recebido (de forma promíscua) cada um dos demais pacotes a serem codificados.

Há ainda na literatura trabalhos recentes que propõem uma integração ainda maior entre o protocolo de roteamento e as técnicas de codificação de rede [Sengupta et al. 2007, Fan et al. 2009, Le et al. 2010]. A ideia é utilizar protocolos de roteamento cientes do processo de codificação. Ao invés de considerar apenas as métricas de roteamento tradicionais, estes protocolos incluem nas suas escolhas de rota também uma análise de potenciais oportunidades de codificação. Neste caso, o protocolo pode escolher caminhos que favoreçam a ocorrência de tais oportunidades, mesmo que estas rotas não sejam ótimas do ponto de vista de métricas tradicionais (*e.g.*, perda de pacotes ou atraso).

Em [Sengupta et al. 2007], os autores realizam uma análise teórica sobre os ganhos obtidos por métodos de codificação oportunística em redes sem fio de múltiplos saltos, como o COPE, para o caso de múltiplos fluxos *unicast*. Para isso, eles elaboram uma modelagem do sistema na forma de um problema de programação linear, cujo objetivo é maximizar a vazão agregada dos fluxos. Através desta análise, os autores concluem que a escolha das rotas exerce grande influência na quantidade de oportunidades de codificação e, por consequência, no desempenho da rede.

Em [Le et al. 2010], os autores apresentam a primeira proposta prática de um protocolo de roteamento ciente de codificação. O protocolo, denominado DCAR (*Distributed Coding-Aware Routing*), é uma variação do tradicional protocolo DSR (*Dynamic Source Routing*) [Johnson et al. 2001]. Quando um novo fluxo é iniciado, um processo de descoberta de rotas é disparado com o envio em difusão de um pacote RREQ (*Route Request*). Ao receber um RREQ, os nós avaliam quais seriam as oportunidades de codificação locais, supondo que a rota escolhida passasse por eles. No caminho de retorno do pacote RREP (*Route Reply*), cada nó do caminho inclui estas informações de oportunidades de codificação. Quando os pacotes de RREP são recebidos pela origem, este nó decide o melhor caminho com base em uma métrica proposta pelos autores, a CRM (*Coding-aware Routing Metric*). Esta métrica estima o número esperado de transmissões necessárias para que os pacotes enfileirados em cada nó do caminho avaliado, além dos pacotes provenientes do novo fluxo, sejam enviados com sucesso.

Uma segunda proposta de um protocolo de roteamento prático é apresentada em [Fan et al. 2009]. Os autores propõem um protocolo denominado HLCR (*Heuristic Load-balanced Coding-aware Routing*), bastante similar ao proposto em [Le et al. 2010]. Entre as diferenças, estão um mecanismo de controle de inundação das mensagens RREQ e RREP e a métrica de roteamento utilizada. O mecanismo de controle funciona através da análise do caminho percorrido por cada mensagem RREQ. Ao receber uma mensagem deste tipo, um nó a reencaminha apenas se o custo do caminho percorrido até então for menor ou igual ao melhor custo já registrado. A métrica proposta, denominada WETCC (*Weighted Expected Transmission Count with Coding*) é uma variação da métrica ETX [Couto et al. 2005] na qual os autores estimam o número de transmissões necessárias para um pacote do novo fluxo, subtraindo deste valor transmissões realizadas quando este pacote estiver codificado com mensagens de outros fluxos.

O trabalho de [Sengupta et al. 2007] parte da suposição de que as probabilidades de recepção de um pacote codificado por dois ou mais destinatários são independentes. Por exemplo, suponha um pacote codificado em um nó a é destinado a dois vizinhos, b e c . Se a probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote pelo enlace $a \rightarrow b$ é 0,8, enquanto no enlace $a \rightarrow c$ é de 0,5, a probabilidade de ambos os vizinhos receberem o pacote codificado, segundo a análise dos autores, é de 0,4. Com isso, o pacote codificado precisará, na média, de 2,5 transmissões. O efeito de desconsiderar a possibilidade de dependência nos eventos de recepção entre dois nós resulta na preferência por caminhos com menor número de oportunidades de codificação.

Já a métrica utilizada em [Le et al. 2010] considera apenas a probabilidade de sucesso do enlace utilizado pelo novo fluxo (para o qual o processo de descoberta de rotas foi disparado). Os efeitos das oportunidades de codificação de rede são considerados apenas por uma componente da métrica relacionada ao tamanho esperado da fila da saída de cada nó, caso o novo fluxo passe pelo caminho avaliado. Assim, a proposta realiza uma aproximação muito simplificada dos efeitos do processo de transmissão dos pacotes codificados no desempenho da rede.

O trabalho de [Fan et al. 2009] também não considera a dependência entre as probabilidades de sucesso nos eventos de recepção de um pacote codificado por vários destinatários. A métrica proposta, WETCC, basicamente considera que os destinatários cujos enlaces têm pior qualidade (menor probabilidade de sucesso) precisarão de um número extra de retransmissões.

Outro problema com as propostas dos protocolos DCAR e HLCR é o mecanismo utilizado para realizar o envio dos pacotes codificados para seus destinatários. Ambas as propostas utilizam o mecanismo de Pseudo-Broadcast, introduzido em [Katti et al. 2008]. Neste mecanismo, o pacote codificado é enviado em *unicast* para um dos destinatários escolhido aleatoriamente. Os demais destinatários devem receber o pacote de maneira promíscua. A vantagem deste método é a utilização da técnica ARQ (*Auto Repeat Request*) nativa da camada de enlace. No entanto, a falta de critério para seleção do destino para o quadro *unicast* pode levar a resultados bastante ruins, como será mostrado na Seção 5. Especificamente, o protocolo HLCR emprega uma versão modificada do Pseudo-Broadcast, optando por utilizar como endereço de destino para a transmissão *unicast* do pacote codificado o destinatário do pacote pertencente ao fluxo mais antigo envolvido na codificação. Embora esta seleção não seja totalmente aleatória, não existe um critério bem definido de desempenho envolvido na decisão.

3. Dependência dos Eventos de Recepção

Como discutido na seção anterior, os principais trabalhos na área de roteamento ciente de codificação se baseiam na hipótese de que os eventos de recepção de um pacote codificado por nós distintos são independentes. Esta suposição simplifica a proposta das métricas de roteamento para este tipo de protocolo, pois faz com que a probabilidade conjunta de recepção do pacote codificado por todos os destinatários seja o produto das probabilidades de recepção individuais. No entanto, esta hipótese de independência é contra-intuitiva.

Há uma série de fatores envolvidos no resultado de sucesso ou falha durante a recepção de um pacote. Entre eles, pode-se destacar:

- potência de transmissão do nó de origem;

- taxa de transmissão (modulação e taxa de símbolos);
- sensibilidade de recepção dos rádios dos destinatários;
- níveis de ruído e interferência no receptor; e
- distância, obstáculos e percursos de propagação.

No caso de uma mesma tentativa de transmissão, a potência de transmissão do nó de origem e a taxa de transmissão do pacote são idênticas para todos os destinatários. A sensibilidade do rádio, por outro lado, pode variar. No entanto, a variabilidade nos valores de sensibilidade reportados pelos fabricantes de dispositivos comerciais é relativamente baixa. Além disso, vários tipos de redes sem fio de múltiplos saltos empregam *hardware* idêntico para os nós da rede (por exemplo, uma rede de sensores ou o *backbone* de uma rede em malha sem fio). Por isso, para uma avaliação genérica, é razoável considerar que este parâmetro é, também, fixo para os vários destinatários.

Os dois últimos fatores são os que, de fato, apresentam grande influência na recepção ou não do pacote pelos destinatários. Como cada destinatário ocupa uma posição física diferente, estes nós estão susceptíveis a fontes e magnitudes de interferência diferentes uns dos outros. Da mesma forma, na maior parte dos ambientes reais, existem obstáculos variados nos caminhos de propagação entre o nó de origem e os nós de destino. As diferenças nas distâncias, obstáculos e múltiplos percursos na propagação do sinal do nó de origem até cada um dos nós de destino faz com que os níveis de atenuação de sinal sejam diferentes para cada destinatário. Por este motivo, enlaces para destinatários diferentes apresentam probabilidades de sucesso distintas.

No entanto, estes dois fatores estão diretamente ligados às posições físicas dos nós. A Figura 1 mostra um exemplo. Na situação hipotética apresentada, os quadrados em cinza representam fontes de interferência quaisquer (*e.g.*, dispositivos eletrônicos gerando ruídos na frequência considerada ou nós de outras redes que utilizam o mesmo canal). Os círculos concêntricos em volta das fontes de interferência ilustram a zona de interferência resultante do sinal gerado por estes dispositivos. Os demais círculos mostram o posicionamento dos nós. Neste cenário, é razoável supor que as fontes de ruído e interferência que afetam o nó *A* (como a fonte mais à direita) são muito semelhantes às que afetam o nó *B*, pois ambos os nós estão próximos. Por outro lado, as fontes de interferência que atuam sobre o nó *C* (como a fonte mais à esquerda) podem ser completamente diferentes, já que o mesmo se encontra bem mais distante.

Supondo que o nó *D* na figura deseje enviar um pacote codificado para os nós *A* e *C*, a hipótese de que as probabilidades de recepção sejam independentes é válida. Em uma dada tentativa de transmissão de *D*, é possível que a fonte de interferência mais à esquerda esteja gerando ruídos em menor intensidade, fazendo com que a recepção do nó *C* seja possível. Ao mesmo tempo, o nível de ruído gerado pela fonte mais à direita pode ser bastante alto, fazendo com que o nó *A* não consiga decodificar o quadro corretamente.

No entanto, podemos também considerar a situação em que os destinatários do pacote codificado são os nós *A* e *B*. Caso a fonte de interferência mais à direita cesse a geração de ruído no instante da transmissão do pacote, tanto *A* quanto *B* serão favorecidos. Caso contrário, ambos os nós serão prejudicados.

É possível, ainda, ver esta situação de um outro ponto de vista. Caso o nó *A* consiga decodificar corretamente uma dada transmissão do pacote pelo nó *D*, isto significa

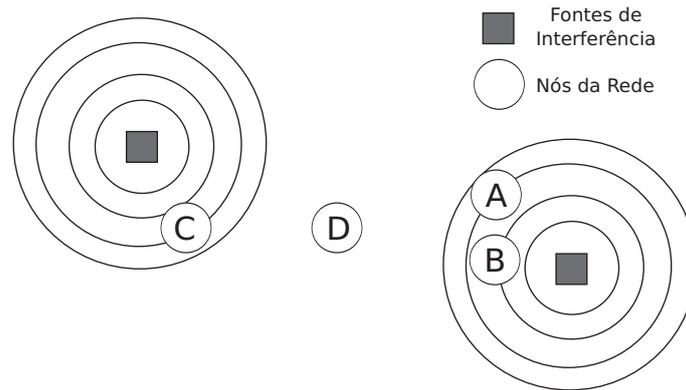


Figura 1. Exemplo de fontes de interferência afetando nós de uma rede. Nós mais próximos tendem a sofrer efeitos das mesmas fontes, com intensidade semelhante. Nós distantes, em geral, sofrem efeitos de fontes distintas.

que o nível de ruído gerado pela fonte de interferência mais à direita foi suficientemente baixo. Neste caso, a probabilidade do nó B receber o mesmo pacote aumenta. Por outro lado, dado que o nó A não conseguiu decodificar corretamente o pacote enviado por D , isso significa que o ruído do ambiente foi excessivamente alto. Desta forma, a probabilidade de que B seja capaz de receber o pacote diminui. Matematicamente, assumindo que a probabilidade de recepção por cada um dos nós seja não-nula, podemos escrever:

$$P(Suc_B|Suc_A) > P(Suc_B|\neg Suc_A), \quad (1)$$

onde Suc_B denota o evento de recepção bem sucedida pelo nó B do pacote codificado e Suc_A denota o evento de recepção bem sucedida pelo nó A do pacote codificado. Neste caso, temos que:

$$P(Suc_B|Suc_A) \neq P(Suc_B) \quad (2)$$

ou

$$P(Suc_B|\neg Suc_A) \neq P(Suc_B) \quad (3)$$

Logo, a ocorrência ou não do evento de sucesso na recepção no nó A torna a ocorrência do evento de sucesso na recepção no nó B mais ou menos provável. Assim, dentro destas condições, os eventos não são independentes. O argumento pode ser facilmente estendido para mais de dois nós.

3.1. Evidências Experimentais

O exemplo anterior claramente favorece o argumento da dependência entre os eventos de recepção em dois nós distintos. No entanto, resta a dúvida de se em um ambiente real, com diversas fontes de interferência e obstáculos diferentes, existem, de fato, casos em que há dependência entre as recepções de nós distintos.

Para responder esta pergunta, foram realizados experimentos em uma rede em malha sem fio real. A rede utilizada, ilustrada na Figura 2, é a rede *indoor* do Projeto ReMoTE [Projeto ReMoTE 2010]. Ela é constituída por roteadores comerciais Linksys WRT54g, rodando uma versão personalizada da distribuição Linux OpenWrt [OpenWrt 2010]. No total, são 10 roteadores espalhados por dois andares de um

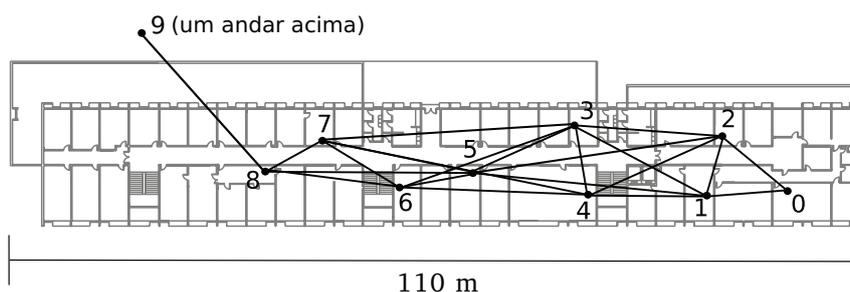


Figura 2. Topologia da rede em malha sem fio utilizada para os experimentos.

dos prédios da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense. Na figura, as linhas interligando os nós representam enlaces frequentemente encontrados na topologia.

Os experimentos consistem no envio, a partir de um nó de origem, de uma sequência de pacotes em *broadcast* (representando pacotes codificados, destinados a todos os vizinhos). Ao receber um destes pacotes, cada vizinho do nó de origem registra em um arquivo de *log* a ocorrência. Ao final do experimento, os dados de todos os vizinhos são cruzados para uma estimativa das probabilidades associadas aos diversos eventos de recepção envolvidos.

O experimento foi repetido 10 vezes, fazendo com que cada nó da topologia pudesse atuar exatamente uma vez como nó de origem dos pacotes. O intervalo entre os pacotes enviados foi configurado para 100 milissegundos. Cada experimento teve duração de 300 segundos, perfazendo 3000 pacotes de 1500 bytes enviados.

Durante o cruzamento dos dados, para cada nó de origem, foram desconsiderados os *logs* em que não havia nenhum pacote registrado (por não haver um enlace a partir do nó de origem). Dos arquivos restantes, foram calculadas as probabilidades condicionais entre os vizinhos, dois a dois. No total, as estatísticas foram computadas para 71 tuplas do tipo $\langle no_de_origem, no_destino_A, no_destino_B \rangle$.

A Tabela 1 mostra alguns dos resultados obtidos. Por uma questão de espaço, os resultados menos interessantes não são apresentados. A tabela é dividida em duas partes: a parte superior mostra resultados para tuplas nas quais foi detectada alta dependência entre as probabilidades de recepção dos dois nós de destino, enquanto a inferior exhibe resultados para tuplas nas quais praticamente não houve dependência.

Analisando os resultados da parte superior da tabela, pode-se notar casos como os das tuplas $\langle 2, 3, 5 \rangle$, $\langle 3, 7, 6 \rangle$ e $\langle 7, 5, 3 \rangle$, nos quais ambos os nós de destino apresentam uma probabilidade de recepção mediana individualmente, mas que aumenta consideravelmente quando considerados os eventos condicionais (variando de 14 a 20 pontos percentuais de aumento, nestes casos). Nestes 3 casos, há uma certa proximidade entre os nós de destino, o que sugere que os mesmos estejam sujeitos a condições de interferência similares, como no exemplo da Figura 1.

Os dois outros casos apontados na parte superior da tabela, $\langle 5, 7, 8 \rangle$ e $\langle 8, 5, 6 \rangle$, mostram situações nas quais um dos destinatários tem uma probabilidade de recepção razoável (nos exemplos, acima dos 61%), enquanto o outro destinatário apresenta uma baixa probabilidade de recepção (abaixo dos 38%). Nestes casos, o que chama atenção é o aumento na probabilidade de recepção do destinatário mais provável, caso o

Tabela 1. Estimativas para as probabilidades condicionais, par a par, obtidas experimentalmente. A e B são os eventos de recepção bem sucedida para cada um dos destinos considerados.

Origem	Destino A	Destino B	P(A)	P(B)	P(A ∩ B)	P(A B)	P(B A)
2	3	5	0,391	0,370	0,197	0,533	0,504
3	7	6	0,595	0,648	0,473	0,730	0,795
7	5	3	0,537	0,555	0,406	0,732	0,756
5	7	8	0,610	0,079	0,074	0,937	0,122
8	5	6	0,380	0,760	0,367	0,482	0,964
2	5	4	0,391	0,281	0,126	0,450	0,323
3	6	2	0,648	0,369	0,245	0,663	0,378
3	7	2	0,595	0,369	0,212	0,575	0,357
5	7	4	0,610	0,976	0,594	0,609	0,974
5	7	3	0,610	0,722	0,441	0,611	0,722
5	8	2	0,079	0,123	0,011	0,087	0,134
6	8	4	0,361	0,065	0,022	0,333	0,060
6	8	3	0,361	0,456	0,141	0,309	0,391

menos provável receba o pacote. Por exemplo, para a tupla $\langle 8, 5, 6 \rangle$, a probabilidade de recepção do nó 6 aumenta mais de 20 pontos percentuais em caso de recepção do nó 5, se tornando quase um evento certo. Novamente, a proximidade dos nós de destino faz com que haja uma grande interseção nos eventos de sucesso dos dois nós.

Em relação aos dados da parte inferior da tabela, pode-se notar que, em quase todos os casos, as tuplas apresentam um nó de origem “central” e destinatários diametralmente opostos. O nó 5, em especial, aparece em três tuplas como nó de origem. De fato, este nó se encontra no meio da topologia e se comunica com uma grande quantidade de vizinhos. Para estas tuplas, há baixa interseção entre os eventos de recepção de pacotes pelos dois destinatários. Ou seja, os eventos de recepção, como esperado, são independentes (ou muito pouco dependentes).

Chama a atenção, entre os resultados da parte inferior da tabela, a tupla $\langle 2, 5, 4 \rangle$. Em relação ao nó 2, os destinatários 4 e 5 estão consideravelmente próximos. Esta disposição dos nós da tupla é bem similar a de tuplas da parte superior da tabela. Entretanto, as probabilidades de recepção condicionais apresentam um aumento não maior que 6 pontos percentuais, em relação às probabilidades individuais. Este baixo aumento sugere baixa dependência entre os eventos de recepção nos dois nós. Como explicado na seção anterior, o posicionamento físico não é o único fator que tem influência sobre estes resultados. No caso desta tupla, alguma particularidade dos caminhos de propagação para os nós de destino pode ser mais preponderante que a proximidade entre eles.

De toda forma, estes resultados mostram que, em vários casos, não é razoável desprezar a dependência entre os eventos de recepção de um conjunto de nós. Mesmo em ambientes reais, esta dependência se manifesta em vários graus, podendo ser explorada.

4. Estimativa das Probabilidades de Recepção

Dados os resultados apresentados na seção anterior, fica clara a necessidade de um método mais preciso para a estimativa da probabilidade de recepção para um conjunto de desti-

natários de um pacote codificado. Para muitos casos, a simples multiplicação das probabilidades de recepção individuais pode gerar sérias distorções.

Embora o argumento da simplicidade seja um ponto positivo para a simples adoção da hipótese de independência, o método proposto neste trabalho é de simples implementação na grande maioria dos protocolos de roteamento existentes. Isso porque estes protocolos, em geral, implementam algum tipo de métrica de roteamento que necessita do envio periódico de pacotes de *probe* [Campista et al. 2008]. Uma vez que um *probe* é recebido por um nó, este atualiza uma estatística de pacotes perdidos em uma dada janela de tempo. Eventualmente, esta estatística é enviada de volta para todos os vizinhos (em geral, no próprio pacote de *probe*).

Na maioria das métricas, o formato da estatística enviada aos vizinhos é algum tipo de codificação que representa o valor da probabilidade de sucesso na recepção de um pacote. De posse apenas deste valor (para cada vizinho), um nó não é capaz de calcular as probabilidades de recepção conjunta para um sub-conjunto qualquer de seus vizinhos. Isso ocorre porque não há nos valores das probabilidades de recepção individuais informação sobre a dependência entre as recepções de cada vizinho.

No entanto, ao invés de enviar o valor da probabilidade de recepção já pré-computado, cada nó poderia enviar um mapa de *bits* representando o resultado de cada tentativa de transmissão de *probes* (sucesso ou falha). Neste caso, cada nó da rede, ao receber o mapa de *bits* relativo aos resultados das transmissões dos seus *probes*, poderia não só calcular as probabilidades de sucesso individuais para cada vizinho, mas também a probabilidade de recepção conjunta para um sub-conjunto de vizinhos, bastando efetuar a operação lógica *AND bit a bit* nas janelas correspondentes. Como as janelas recebidas de vizinhos diferentes podem estar desalinhadas (um vizinho pode ainda não ter deslizado sua janela até o mesmo que algum outro), é preciso enviar também o número de sequência do *probe* relativo ao primeiro *bit* do mapa.

Em termos de *overhead*, esta solução não aumenta a quantidade de pacotes transmitidos. Por outro lado, é necessário um aumento no tamanho dos pacotes de controle utilizados. Para representar um mapa de *bits* para uma janela de n *probes* são necessários n *bits*, enquanto a informação da probabilidade de sucesso pode ser codificada em $\log_2 n$ *bits* (supondo que o tamanho da janela seja previamente conhecido).

Na prática, no entanto, o tamanho de janela empregada para o cálculo das métricas de roteamento é relativamente pequeno. Por exemplo, o valor padrão para o cálculo da métrica ETX pela implementação do protocolo OLSR disponível em [OLSRD 2010] é de 20 *probes*. Para uma janela deste tamanho são necessários menos *bits* que para a representação de um valor de ponto flutuante em precisão simples no padrão IEEE 754.

5. Método de Envio de Pacotes Codificados

Além do problema de estimar as probabilidades de recepção conjuntas para efeito de escolha de rotas, uma outra questão importante na utilização de codificação de rede é como efetivamente realizar o envio dos pacotes codificados. Uma primeira ideia é o simples encapsulamento do pacote codificado em um quadro de *broadcast* na camada de enlace. No entanto, este mecanismo não oferece informações sobre sucesso ou fracasso da operação, além de também não prover recursos de recuperação de falhas nativos.

Como explicado na Seção 2, um método alternativo mais interessante é o *Pseudo-Broadcast*, no qual um dos destinatários escolhido aleatoriamente é utilizado como endereço de destino do quadro relativo ao pacote codificado. Desta forma, o pacote codificado é transmitido na forma de um quadro *unicast*, o que provê confirmação de recebimento e correção de erros (através de ARQ, por exemplo, no padrão IEEE 802.11). A desvantagem deste método, no entanto, é a falta de critério para seleção do destino do quadro que, em geral, é feita de maneira aleatória.

Um critério simples pode ser utilizado para melhorar o desempenho do *Pseudo-Broadcast*. O objetivo da transmissão de um pacote codificado é que todos os destinatários consigam realizar a recepção com sucesso. Em outras palavras, deseja-se maximizar a probabilidade $P(Suc_A, Suc_B, Suc_C, \dots)$ de recepção conjunta de todos os destinatários. Ao utilizar a técnica de *Pseudo-Broadcast*, um dos destinatários será utilizado como destino do quadro *unicast* e, portanto, teremos a confirmação de que este nó recebeu o quadro corretamente o pacote codificado (assumindo que isso ocorra dentro do limite de tentativas de retransmissão). Denotando por α o nó escolhido, queremos maximizar a expressão:

$$P(Suc_A, Suc_B, Suc_C, \dots | Suc_\alpha) = \frac{P(Suc_A, Suc_B, Suc_C, \dots)}{P(Suc_\alpha)} \quad (4)$$

O numerador da expressão depende apenas dos destinatários do pacote codificado. Ou seja, independente do nó escolhido para destino do quadro *unicast*, o numerador se mantém. Desta forma, para maximizar a expressão, basta minimizar o valor do denominador. Logo, a escolha que maximiza a probabilidade de recepção conjunta para todos os destinatários é o nó com menor probabilidade de recepção. Como a informação sobre as probabilidades de recepção para os vizinhos geralmente já é calculada pelo protocolo de roteamento, esta estratégia, denominada *Pseudo-Broadcast Não Aleatório* (em oposição à proposta original do *Pseudo-Broadcast Aleatório*) é de fácil implementação.

5.1. Avaliação Experimental

Para avaliar o mecanismo proposto, novos experimentos foram realizados na mesma rede ilustrada na Figura 2. Três mecanismos foram implementados na forma de um *plugin* para o protocolo de roteamento OLSR [OLSRD 2010]: *Broadcast Simples*, *Pseudo-Broadcast Aleatório* e *Pseudo-Broadcast Não Aleatório*.

Quando carregado, o *plugin* cria uma interface de rede virtual do tipo TUN/TAP. Quando um pacote é enviado de uma aplicação local para uma interface deste tipo, o *kernel* local envia o pacote para a aplicação que criou a interface. Desta forma, o *plugin* é capaz de interceptar pacotes transmitidos para a sub-rede da interface criada e decidir qual a melhor maneira de encaminhá-los para seus destinatários.

Nestes novos experimentos, uma aplicação do nó de origem envia uma sequência de pacotes para o endereço de *broadcast* da sub-rede da interface TUN/TAP. Ao receber um destes pacotes, o *plugin* se encarrega de gerar um quadro da camada de enlace com o endereço de destino escolhido de acordo com o mecanismo utilizado. Este pacote é, então, passado para a interface de rede, que realiza o envio propriamente dito. Os vizinhos, por sua vez, executam uma outra aplicação que espera pelos pacotes e gera um arquivo de *log* contendo os números de sequência recebidos. Novamente, foram utilizados 3000 pacotes de 1500 bytes (um a cada 100 milissegundos). Para tornar os experimentos mais justos,

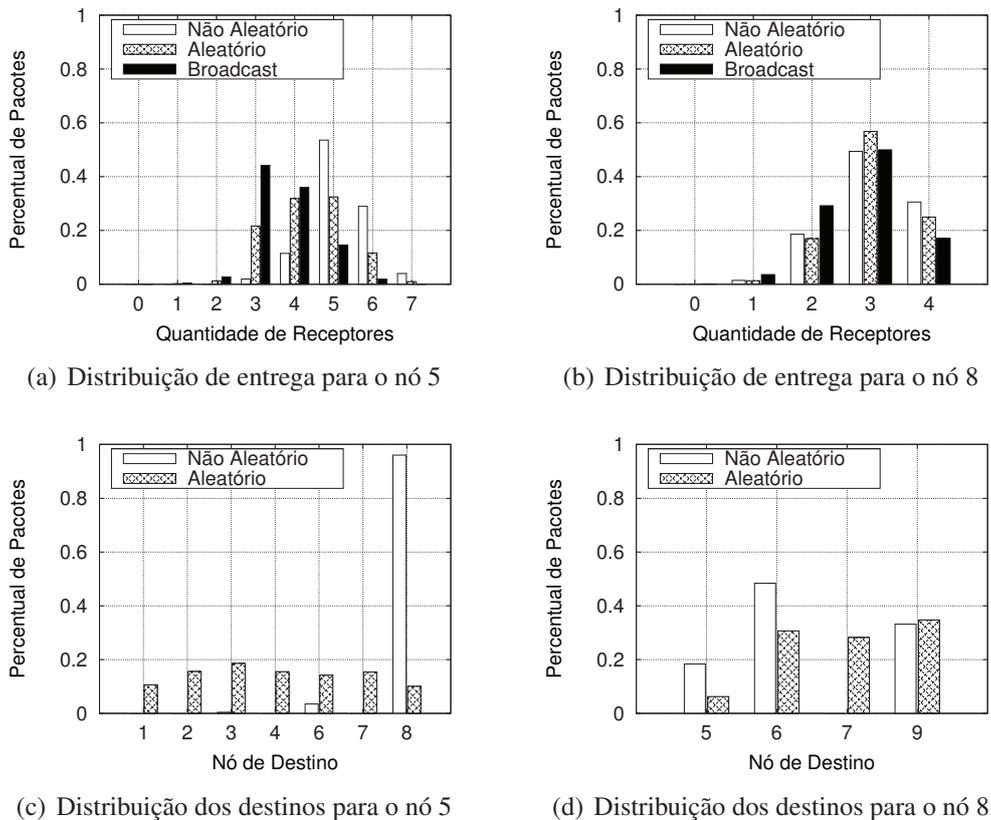


Figura 3. Resultados comparativos entre os três mecanismos de envio de pacotes codificados. Na parte superior, a distribuição do número de vizinhos que receberam corretamente os pacotes enviados. Na parte inferior, a distribuição dos vizinhos selecionados como destinos para os quadros *unicast*.

os três mecanismos comparados tiveram seus experimentos executados simultaneamente, garantindo que todos tivessem as mesmas condições de rede.

Os gráficos apresentados na Figura 3 resumem os resultados obtidos para dois nós da topologia (5 e 8) atuando como origens do fluxo de pacotes. A Figura 3(a) mostra que o *Pseudo-Broadcast* Não Aleatório obteve uma taxa de entrega de pacotes bastante superior aos dois outros mecanismos, considerando 7, 6 e 5 receptores. Somando-se estes três casos, conclui-se que o mecanismo não aleatório conseguiu entregar os pacotes a ao menos 5 vizinhos 86,5% das vezes. O segundo melhor desempenho, neste caso, obtido pelo *Pseudo-Broadcast* Aleatório, foi de apenas 45% de entrega, nas mesmas condições. Analisando a frequência de escolha de cada vizinho como destino do pacote *broadcast* (Figura 3(c)), nota-se que o mecanismo não aleatório optou pelo nó 8 como destino 96% das vezes. O mecanismo aleatório, como esperado distribuiu suas escolhas uniformemente, ignorando retransmissões necessárias.

A maior parte dos resultados obtidos para outros nós de origem foram bastante similares aos obtidos para o nó 5. A exceção ficou por conta do nó 8. Como ilustrado na Figura 3(d), para este nó de origem mesmo o mecanismo não aleatório distribuiu consideravelmente as escolhas dos nós de destino, se aproximando mais das frequências escolhidas pelo mecanismo aleatório (exceto pelo nó de destino 7, que nunca foi selecionado).

A razão para isso é a alta variabilidade da qualidade dos enlaces de saída do nó 8. Esta variabilidade faz com que o enlace de pior qualidade mude várias vezes ao longo do experimento. Como consequência, ambos os mecanismos (aleatório e não aleatório) obtiveram resultados semelhantes. Embora a taxa de entrega considerando 4 vizinhos tenha sido maior pelo mecanismo não aleatório (30,5% contra 25% do aleatório), considerando a taxa de entrega para 4 ou 3 vizinhos, a diferença entre os dois mecanismos é de menos de 2%. É interessante notar também que o caso do nó 8 como origem é o único no qual o mecanismo de *Broadcast Simple*s obteve resultados próximos aos das demais propostas.

6. Conclusões

Este trabalho discutiu o uso de probabilidades condicionais na modelagem e no envio propriamente dito de pacotes codificados. Várias propostas de roteamento ciente de codificação consideram a hipótese de que as probabilidades de recepção de um pacote codificado pelos seus vários destinatários são independentes. Foram apresentados argumentos teóricos apoiados por resultados experimentais que mostram que, em boa parte dos casos, esta hipótese é falsa. Esta suposição, portanto, faz com que os protocolos de roteamento cientes de codificação evitem caminhos com mais oportunidades de codificação, reduzindo os ganhos obtidos. O artigo apresentou também um método simples para a estimativa das probabilidades condicionais, necessárias à modelagem correta da métrica de roteamento. Foi proposto ainda um método de envio de pacotes alternativo às propostas da literatura. O método, que maximiza a probabilidade conjunta de recepção dos destinatários, se mostrou superior aos demais em todos os cenários avaliados.

Como trabalho futuro, fica o desenvolvimento de uma métrica de roteamento ciente de codificação que considere as possíveis dependências entre as probabilidades de entrega dos destinatários. Utilizando o método de estimativa das probabilidades condicionais apresentado, a métrica teria uma medida mais precisa da qualidade dos caminhos, favorecendo as oportunidades de codificação. É necessário também avaliar o impacto do uso de taxas de transmissão distintas para cada vizinho no envio de pacotes codificados para múltiplos destinatários. A escolha inadequada da taxa de transmissão pode resultar em baixa probabilidade de recepção do pacote codificado. O desenvolvimento de um protocolo de roteamento ciente de codificação baseado em estado de enlaces também pode ser interessante por permitir uma visão global do estado da rede.

Referências

- Ahlswede, R., Cai, N., Li, S., e Yeung, R. (2002). Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(4):1204–1216.
- Campista, M. E. M., Esposito, P. M., Moraes, I. M., Costa, L. H. M., Duarte, O. C. M., Passos, D. G., de Albuquerque, C. V. N., Saade, D. C. M., e Rubinstein, M. G. (2008). Routing metrics and protocols for wireless mesh networks. *IEEE Network*, 22(1):6–12.
- Chou, P., Wu, Y., e Jain, K. (2003). Practical network coding. Em *Proceedings of the 41st Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing*, pp. 40–49.
- Couto, D. S. J. D., Aguayo, D., Bicket, J., e Morris, R. (2005). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks*, 11(4):419–434.
- Fan, K., Wei, X., e Long, D. (2009). A load-balanced route selection for network coding in wireless mesh networks. Em *ICC '09*, pp. 1–6.

- Gkantsidis, C. e Rodriguez, P. (2005). Network coding for large scale content distribution. Em *Proceedings of INFOCOM 2005*, pp. 2235–2245.
- Ho, T., Médard, M., Koetter, R., Karger, D., Effros, M., Shi, J., e Leong, B. (2006). A random linear network coding approach to multicast. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(10):4413–4430.
- Ho, T., Médard, M., Shi, J., Effros, M., e Karger, D. (2003). On randomized network coding. Em *Proceedings of the 41st Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing*, pp. 11–20.
- Johnson, D. B., Maltz, D. A., e Broch, J. (2001). DSR: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. Em *Ad hoc networking*, chapter 5, pp. 139–172. Addison-Wesley.
- Katti, S., Rahul, H., Hu, W., Katabi, D., Médard, M., e Crowcroft, J. (2008). XORs in the air: practical wireless network coding. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(3):497–510.
- Kurose, J. F. e Ross, K. W. (2006). *Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-down*. Pearson, 6ª edição.
- Le, J., Lui, J., e Chiu, D.-M. (2010). DCAR: Distributed coding-aware routing in wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(4):596–608.
- Li, Z. e Li, B. (2004). Network coding in undirected networks. Em *Proceedings of the 38th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 257–262.
- Lun, D., Médard, M., e Koetter, R. (2005). Efficient operation of wireless packet networks using network coding. Em *International Workshop on Convergent Technologies (IWCT)*.
- Lun, D., Medard, M., e Koetter, R. (2006). Network coding for efficient wireless unicast. Em *2006 International Zurich Seminar on Communications*, pp. 74–77.
- OLSRD (2010). <http://www.olsr.org>. Acessado em 05/12/2010.
- OpenWrt (2010). <http://www.openwrt.org>. Acessado em 03/12/2010.
- Passos, D. e Albuquerque, C. (2009). Uma abordagem unificada para métricas de roteamento e adaptação automática de taxa em redes em malha sem fio. Em *27º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pp. 931–944.
- Projeto ReMoTE (2010). <http://www.midiacom.uff.br/remote>. Acessado em 03/12/2010.
- Seferoglu, H. e Markopoulou, A. (2007). Opportunistic network coding for video streaming over wireless. Em *Packet Video 2007*, pp. 191–200.
- Sengupta, S., Rayanchu, S., e Banerjee, S. (2007). An analysis of wireless network coding for unicast sessions: The case for coding-aware routing. Em *Proceedings of INFOCOM 2007*, pp. 1028–1036.
- Zhu, Y., Li, B., e Guo, J. (2004). Multicast with network coding in application-layer overlay networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(1):107–120.