

Mecanismos de Difusão Limitada de Interesses em Redes em Malha Sem-Fio Orientadas a Conteúdo *

Dalbert Matos Mascarenhas^{1,2}, Igor Monteiro Moraes¹

¹Laboratório Mídiacom, PGC-TCC/Instituto de Computação
Universidade Federal Fluminense (UFF)–Niterói–RJ–Brasil

²Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Foseca–CEFET/RJ
Campus Petrópolis

{dmascarenhas, igor}@ic.uff.br

Abstract. *This paper proposes three mechanisms in order to reduce the broadcast storm problem in information-centric wireless mesh networks. The first one defines a probability to forward or not interest packets. The second one limits the number of interest packets forwarded based on the number of previous forwarding actions of these packets. The third one is a hybrid approach that combines the forwarding criteria of the two previous mechanisms. The performance of a information-centric wireless mesh networks is evaluated with the three proposed mechanisms and also with the default forwarding mechanism. The performance of such network is also compared with the one provided by a wireless mesh network based on the TCP/IP stack running the OLSR protocol. Results show that the proposed mechanisms provide a delivery rate four times higher than the one provided by OLSR. In addition, our proposals outperform the default forwarding mechanism by up to 19% in terms of data delivery rate in dense scenarios with high number of hops.*

Resumo. *Este trabalho propõe três mecanismos para reduzir o problema da tempestade de pacotes de interesse (broadcast storm) em redes em malha sem-fio orientadas a conteúdo. O primeiro mecanismo define uma probabilidade de encaminhamento para os pacote de interesse. O segundo limita o número de pacotes de interesse encaminhados com base no número de encaminhamentos anteriores desses pacotes. O terceiro é uma abordagem híbrida que combina os critérios dos dois anteriores. O desempenho de uma rede em malha sem-fio orientada a conteúdo é avaliado com o emprego dos três mecanismos propostos e com o seu mecanismo de encaminhamento padrão. O desempenho dessa rede também é comparado ao de uma rede em malha baseada na pilha TCP/IP com o protocolo OLSR. Os resultados mostram que os mecanismos propostos proporcionam uma taxa de entrega até quatro vezes maior do que a obtida com o protocolo OLSR. Além disso, as propostas superam o mecanismo padrão em até 19% em termos da taxa de entrega de pacotes de dados em cenários densos com um grande número de saltos.*

*Este trabalho conta com recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, Proppi/UFF, TBE/ANEEL e CELESC/ANEEL.

1. Introdução

As redes em malha sem-fio (*Wireless Mesh Networks* - WMNs) são uma solução de baixo custo para prover acesso à Internet [Canali et al. 2010]. A principal característica dessas redes é possuir um *backbone* formado por nós sem-fio tipicamente estacionários, o que aumenta a conectividade dessas redes em relação às redes *ad hoc*. Esse *backbone* é usado pelos clientes, móveis ou não, para acessar à Internet, uma vez que, um ou mais de um, de seus nós atuam como *gateways*. Por isso, tipicamente, a maior parte do tráfego de uma rede em malha sem-fio se concentra próximo aos *gateways* da rede. Isso faz com que os nós que estejam mais frequentemente nos melhores caminhos até os *gateways* encaminhem mais pacotes e, conseqüentemente, consumam mais dos seus recursos [Campista et al. 2008]. Além da concentração do tráfego próximo aos *gateways*, as redes em malha sem-fio sofrem com interferências e colisões características da comunicação sem-fio. Como as redes em malha operam através de múltiplos saltos, a cada salto há disputa pelo meio de transmissão. Dessa forma, pacotes que já percorreram um longo caminho pela rede podem ser descartados, o que provoca um grande desperdício de recursos [Campista et al. 2007a].

Uma alternativa para solucionar os dois problemas citados anteriormente é adotar o paradigma de redes orientadas a conteúdo nas redes em malha sem-fio [Al-Arnaout et al. 2012, Oh et al. 2010, De Brito et al. 2013]. O foco dessas arquiteturas é a entrega de conteúdo independentemente da localização física desses conteúdos. Requisições de conteúdo e os conteúdos em si são encaminhados pelos nós de acordo com seus nomes. Portanto, não é preciso definir endereços para cada nó da rede e fazer requisições de conteúdo a um nó específico e de endereço conhecido. Além disso, as redes orientadas a conteúdo definem que todos os nós da rede são dotados de um *cache* de conteúdo. Assim, qualquer um dos nós pode responder uma solicitação de conteúdo enviada por outro nó, caso possua esse conteúdo armazenado em seu *cache* [Carofiglio et al. 2012]. Conseqüentemente, não é preciso ir até o *gateway* para receber um conteúdo de um nó na Internet, caso ele já tenha sido solicitado por outro nó anteriormente. Assim, se reduz a sobrecarga nos nós próximos ao *gateway* e também o número de saltos para se obter um conteúdo.

Uma das arquiteturas propostas na literatura para as redes orientadas a conteúdo é a *Content Centric Networking* (CCN) [Jacobson et al. 2009]. Na CCN, os conteúdos são solicitados através do envio de pacotes de interesse, que são difundidos pela rede até alcançarem um nó capaz de responder esse pedido com um pacote de dados, ou seja, um produtor do conteúdo ou um nó que armazene o conteúdo em *cache*. Com a CCN, as redes em malha sem-fio podem se beneficiar da característica natural de difusão do meio sem-fio para disseminar pacotes de interesse. A CCN também provê suporte nativo à mobilidade dos nós, uma vez que não é preciso mudar endereços a cada mudança de ponto de acesso [Amadeo et al. 2012]. Por isso, sua adoção em redes em malha sem-fio se justifica.

Um dos desafios da adoção da CCN em redes em malha sem-fio, no entanto, é o problema da tempestade de pacotes de interesse (*broadcast storm*). Na CCN, como visto anteriormente, os interesses são difundidos pela rede. Além disso, não há nenhuma hierarquia entre os nós, o que aumenta a disputa pelo meio sem-fio. Dependendo do número de consumidores, isto é, nós que solicitam conteúdos, e da taxa de envio desses

interesses, os nós da rede podem experimentar uma grande quantidade de colisões de pacotes. Essas colisões aumentam as perdas de pacotes e os atrasos causados por possíveis retransmissões de interesses para contornar as perdas desses pacotes. Essa sequência de eventos evidencia a tempestade de interesses [Akyildiz et al. 2005].

Este artigo propõe três mecanismos para limitar o número de encaminhamentos de interesses e, assim, reduzir os efeitos da tempestade de interesses. Com menos interesses encaminhados, é possível aumentar o número de pacotes de dados entregues e reduzir também o atraso de entrega. O primeiro, chamado de *Probabilistic Interest Forwarding* (PIF), define uma probabilidade de encaminhamento para os pacotes de interesse em nós com alta centralidade. O segundo, chamado de *Retransmission-Counter-based Interest Forwarding* (ReCIF), limita o número de pacotes de interesse encaminhados com base no número de encaminhamentos anteriores desses pacotes. Esse mecanismo também diferencia os nós de acordo com seu grau de centralidade. Por fim, o ReCIF+PIF combina os critérios de encaminhamento das duas propostas anteriores. A idéia é fazer com que alguns pacotes de interesse tenham seu encaminhamento garantido com base no seu número de retransmissões, enquanto que outros pacotes de interesse que não se enquadrem neste número de retransmissões estarão sujeitos ao encaminhamento probabilístico. Através de simulações, compara-se os três mecanismos propostos com o mecanismo de encaminhamento padrão da CCN e com uma rede em malha sem-fio baseada na arquitetura TCP/IP e que roda o protocolo de roteamento OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*). As métricas usadas são: o número de pacotes de dados entregues e o atraso médio de entrega. Os resultados mostram que em cenários com um maior número de saltos entre produtores e consumidores, os mecanismos propostos produzem resultado mais significantes tanto na entrega dos dados como também na redução do atraso de entrega. Para estes cenários, os mecanismos propostos entregam até 19% mais pacotes de dados aos nós consumidores do que a CCN padrão.

As próximas seções estão assim organizadas. A Seção 2 apresenta uma visão geral sobre as redes em malha orientadas a conteúdo. A Seção 3 discute trabalhos recentes sobre a utilização de redes orientadas a conteúdo em redes sem-fio. A Seção 4 introduz os mecanismos propostos para limitar o encaminhamento de pacotes de interesse. A Seção 5 descreve o ambiente de simulação e suas particularidades. Os resultados são discutidos na Seção 6. Finalmente, a Seção 7 apresenta as considerações finais e trabalhos futuros.

2. Redes em Malha Sem-Fio Orientadas a Conteúdo

O funcionamento de uma rede em malha sem-fio orientada a conteúdo, em particular, baseada na arquitetura CCN, é descrita a seguir. Nessa rede, existem apenas dois tipos de pacotes: os pacotes de interesse e os pacotes de conteúdo. Os pacotes de interesse são enviados por nós que desejam um conteúdo, os consumidores. O objetivo desses pacotes é solicitar à rede um determinado conteúdo. Os pacotes de conteúdo, ou de dados, contém o objeto de dado solicitado por um pacote de interesse. Esses pacotes são enviados por nós produtores ou por nós que armazenam aquele determinado conteúdo em sua memória. O armazenamento de conteúdos previamente solicitados por parte dos nós intermediários em um *cache*, chamado especificamente de *Content Store* (CS) na CCN, possibilita a formação de uma rede de *caches* [Carofiglio et al. 2012].

Os nós de uma rede orientada a conteúdo possuem duas estruturas de dados que

são usadas para o encaminhamento de pacotes de interesse e de dados. A primeira é a *Pending Interest Table* (PIT), que é responsável por armazenar o estado sobre interesses transmitidos por um nó e ainda não atendidos pela rede. Cada entrada da PIT também registra as interfaces associadas a cada interesse recebido. A segunda é a *Forwarding Interest Table* (FIB), que é uma tabela de encaminhamento para os pacotes de interesse, pois registra as interfaces pelas quais um determinado conteúdo foi recebido anteriormente.

O encaminhamento de pacotes de interesse ocorre da seguinte forma. Ao receber um pacote de interesse, um nó primeiramente consulta o seu CS para verificar a existência do conteúdo pedido. Caso encontre, responde esse interesse enviando um pacote de conteúdo. Caso contrário, o nó consulta a PIT para verificar a existência de uma solicitação pendente para esse mesmo conteúdo. Caso esta solicitação já exista na PIT, o nó atualiza a lista de interfaces de entrada pelas quais recebeu interesse para esse conteúdo e descarta o pacote que acaba de receber. Se não existir uma entrada para o interesse na PIT, uma nova entrada é criada e o nó consulta a FIB em busca de interfaces que levem a algum produtor do conteúdo desejado. Não encontrando entradas de encaminhamento na FIB, o nó encaminha o interesse por todas as interfaces disponíveis para tentar alcançar um produtor do conteúdo desejado. Todo esse processo é realizado a cada recebimento de um pacote de interesse por cada nó da rede. Como a PIT mantém uma lista de interfaces de entrada para cada interesse recebido, o pacote de conteúdo é entregue pelo caminho inverso ao percorrido pelos pacotes de interesse.

Um dos principais desafios para a adoção das redes em malha sem-fio baseadas na CCN é que a quantidade de pacotes de interesse gerados e reencaminhados pode causar uma tempestade de interesses enviados em *broadcast*, uma vez que essa é a forma de envio desses pacotes. Além dos pacotes de interesse os pacotes de dados também podem ser enviados em grande número por um grupo de nós próximos e, assim, aumentar o tempo de acesso ao meio e o número de colisões [De Brito et al. 2014]. Estas colisões podem ser provocadas tanto por nós que estão participando da mesma rota de entrega de conteúdos como também podem ser causadas por nós que estão próximos o suficiente para causar interferência [Mascarenhas et al. 2008]. Em redes orientadas a conteúdo cabeadas existem técnicas que evitam a tempestade de *broadcast* de pacotes de interesse. Dentre essas técnicas, está a de nunca aceitar um pedido de interesse através da mesma interface que o encaminhou dentro de um período de tempo. Esta abordagem de contenção de réplicas desnecessárias de pacotes de interesse utilizada em redes orientadas a conteúdos cabeadas não é aplicada às redes sem-fio que comumente possuem apenas uma interface de rede. Nesse caso, a mesma interface é responsável por receber e encaminhar os interesses.

Al-Arnaout *et al.* afirmam que o custo de transferência de dados em uma rede em malha sem-fio é maior do que em redes cabeadas [Al-Arnaout et al. 2012]. Isto porque em redes em malha sem-fio tanto a competição pelo meio como interferências no canal sem-fio provocam uma redução significativa de vazão durante caminhos com muitos saltos [Sbai et al. 2008]. Portanto, o uso de *cache* pelos nós intermediários pode reduzir o número de saltos entre consumidores e produtores e, assim, economizar a largura de banda ao evitar retransmissões provocadas pelo grande número de perdas no canal sem-fio. Para [Oh et al. 2010] é melhor gastar com memória, que é um recurso cada vez mais barato, do que lidar com problema da limitada largura de banda e de grandes perdas implícitas ao canal sem-fio.

3. Trabalhos Relacionados

Existem propostas do uso de *cache* em nós específicos das redes em malha sem-fio que são anteriores a muitas das propostas de redes orientadas a conteúdo. Em uma dessas propostas, os autores propõem o MP-DNA, um protocolo de replicação de conteúdo para reduzir a sobrecarga em redes em malha sem-fio [Al-Arnaout et al. 2012]. Nessa abordagem, os autores utilizam o IP como protocolo da camada de rede e o protocolo de roteamento OLSR [Jacquet et al. 2001]. Conseqüentemente, essa solução herda as limitações da utilização do IP em cenários de rede em malha sem-fio. Da mesma forma, outras propostas consideram o IP como protocolo da camada de rede e avaliam propostas de tabelas *hash* distribuídas [Canali et al. 2010] como o Chord [Stoica et al. 2003] e o MESHCHORD [Burrelli et al. 2008]. No presente trabalho, são propostos mecanismos que não exigem o uso do IP.

Oh *et al.* propõem a utilização de redes orientadas a conteúdo em uma rede em malha sem-fio com nós móveis e nós estacionários [Oh et al. 2010]. Os autores fazem avaliações da arquitetura proposta. No entanto, o trabalho não apresenta modificações na forma de encaminhamento do conteúdo e compara seus resultados com o de outra rede utilizando OLSR. O trabalho dos autores demonstrou que a rede orientada a conteúdo possibilitou um ganho na eficiência de entrega e atraso quando comparado com o OLSR. Diferentemente dos autores, este artigo apresenta modificações na forma de encaminhamento dos interesses da rede orientada a conteúdo para reduzir o problema da tempestade de interesses.

Wang *et al.* propõem as redes veiculares orientadas a conteúdo [Wang et al. 2012]. Estas redes precisam atender ao requisito de alta mobilidade dos nós, o que provoca comunicações rápidas e intermitentes [Amadeo et al. 2012, Alves et al. 2009]. Como medida para diminuir as colisões por pacotes de interesse, os autores utilizam um mecanismo que prioriza o acesso ao meio para mensagens de nós mais distantes. Em contrapartida, os nós mais próximos têm suas mensagens postergadas. Como forma de diferenciar os nós mais distantes dos nós mais próximos, os autores utilizaram a localização geográfica de cada nó indicada pelo dispositivo GPS de cada nó. No presente artigo, apesar de não estar sendo estudado a relação de contatos intermitentes dos nós móveis, são propostas técnicas para diminuir as colisões por pacotes de interesse sem a necessidade da utilização de GPS, o que diminui o custo de um nó.

Tseng *et al.* utilizam mecanismos de controle de tempestade de *broadcast* na camada de enlace [Tseng et al. 2002]. Um dos mecanismos propostos usa uma abordagem similar a um dos mecanismos propostos neste artigo, utilizando probabilidade de encaminhamento. Porém, ressalta-se que esse mecanismo atua nos quadros da camada de enlace em redes em malha que utilizam a pilha de protocolos TCP/IP. Este artigo, por sua vez, trata do encaminhamento dos pacotes de interesse na camada CCN.

4. Propostas de Mecanismos de Difusão Limitada de Interesses

Este trabalho propõe três mecanismos para limitar a difusão de interesses em redes em malha baseadas na arquitetura CCN e, assim, reduzir o problema do *broadcast storm*. A seguir, cada um desses mecanismos é descrito.

4.1. O Mecanismo PIF

O primeiro mecanismo proposto é o *Probabilistic Interest Forwarding* (PIF). Com esse mecanismo, nós com um grau $g \geq G$, onde G é o limiar de centralidade, encaminham um dado interesse com uma probabilidade p . Os nós que possuem grau $g < G$ encaminham os interesses de acordo com o mecanismo padrão da CCN. Vale ressaltar que o limiar G deve ser definido de acordo com a densidade da rede.

O objetivo do PIF é fazer com que nós que possuam um alto grau, ou seja, um número grande de vizinhos, encaminhem menos interesses. A idéia de se definir um critério de encaminhamento de acordo com o grau dos nós surgiu durante a realização de testes preliminares. Nesses testes, observou-se que quando um pedido de interesse é encaminhado por um nó com muitos vizinhos, inicia-se uma grande competição pelo meio em virtude da tentativa de se enviar réplicas de um mesmo interesse. Além disso, assume-se que é muito provável que um vizinho de um nó com alto grau já tenha recebido o interesse de um outro nó, uma vez que os interesses são enviados em *broadcast*.

O número de vizinhos pode ser calculado utilizando a tabela de associação do protocolo IEE 802.11 dos nós, que armazena os endereços MAC dos nós associados.

4.2. O Mecanismo ReCIF

O segundo mecanismo proposto é o *Retransmission-Counter-based Interest Forwarding* (ReCIF). Esse mecanismo adiciona um campo ao cabeçalho do pacote de interesse que é incrementado em uma unidade a cada encaminhamento desse pacote. O valor inicial desse campo é zero. Dessa forma, nós com um grau $g \geq G$, onde G é o limiar de centralidade, encaminham um dado interesse somente se $c_i < C$, onde c_i é o valor do contador presente no cabeçalho do pacote i e C é o limiar de retransmissões. Os nós que possuem grau $g < G$ encaminham os interesses de acordo com o mecanismo padrão da CCN. A premissa de funcionamento do ReCIF é que em situações de tempestade de *broadcast* pacotes de interesses têm o contador c incrementado de forma significativa. Portanto, com o ReCIF, os pacotes que estão participando da tempestade de *broadcast* tem seu encaminhamento reduzido, o que contribui para a redução das réplicas e colisões destes pacotes. É importante ressaltar que um ponto crítico neste mecanismo é definir o limiar de retransmissões C . Se C é muito pequeno, pacotes de interesse podem não chegar ao nó produtor. Por outro lado, se C é muito grande, a eficiência do ReCIF é baixa.

4.3. O Mecanismo ReCIF+PIF

O terceiro mecanismo proposto combina os critérios de encaminhamento definidos pelo PIF e pelo ReCIF. Adiciona-se um campo ao cabeçalho dos pacotes de interesse que é incrementado em uma unidade a cada encaminhamento de um desses pacotes e cujo valor inicial é zero. Assim, nós com um grau $g \geq G$, onde G é o limiar de centralidade, encaminham um dado interesse somente se $c_i < C$, onde c_i é o valor do contador presente no cabeçalho do pacote i e C é o limiar de retransmissões. Por outro lado, nós com um grau $g \geq G$, encaminham pacotes de interesse, cujo $c_i > C$, com uma probabilidade p . Portanto, a definição do limiar C se torna menos crítica, porque pacotes acima desse limiar ainda podem ser encaminhados com base na probabilidade p . Os nós que possuem grau $g < G$ encaminham os interesses de acordo com o mecanismo padrão da CCN.

5. Ambiente de Simulação

Os mecanismos propostos são avaliados por simulação usando o NS-3 [Henderson et al. 2008] e o módulo NDNsim [Afanasyev et al. 2012] que implementa a arquitetura CCN padrão. Foi necessário modificar esse módulo para dar suporte à comunicação sem-fio e aos mecanismos propostos.

Na avaliação, são consideradas duas topologias de rede distintas. A primeira é uma grade de 4 x 5 nós, na qual cada nó está separado de outro por uma distância de 75 m. A outra topologia é composta por 100 nós dispostos em uma grade 10 x 10 e também com uma distância de 75 m. O principal motivo para se utilizar topologias em grade é criar regiões em que a tempestade de *broadcast* pode ser observada em virtude do grande número de vizinhos de cada nó. Além disso, elas são representativas para alguns cenários reais, como bairros densos e comunidades carentes [Campista et al. 2007b, Saade et al. 2007]. Com o intuito de simular esses cenários, que são tipicamente urbanos e *outdoor*, são definidos os seguintes parâmetros. A tecnologia de rede utilizada é o padrão IEEE 802.11a em modo *ad-hoc* com modulação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) e taxa de transmissão de 24 Mb/s. O modelo de propagação utilizado é o *Shadowing Deviation* e a potência de transmissão é de 5 dBm.

O próximo passo é definir quais nós são produtores e quais são consumidores de conteúdo. Para fins de identificação dos nós, assume-se que a rede é uma matriz de nós formada por N linhas e M colunas. Na primeira topologia, $N = 4$ e $M = 5$ e na segunda $N = M = 10$. Para cada uma das topologias é definido dois nós produtores. Cada um disponibiliza conteúdos diferentes. O objetivo dessa configuração é evitar que pacotes de dados de diferentes conteúdos disputem a mesma fila de encaminhamento. Esses produtores são sorteados entre os nós da Coluna M para que sempre estejam em uma das extremidades da rede. Para os nós consumidores, definem-se duas configurações possíveis. Na primeira, existem dois consumidores e cada um solicita um conteúdo que é disponibilizado somente por um dos dois produtores. Os dois consumidores são sorteados entre os nós da Coluna 1. Este posicionamento é escolhido para que a distância entre produtores e consumidores seja a maior possível no Eixo x , fazendo com que os pacotes tenham que percorrer mais saltos até atingir o destino. Na segunda configuração, existem quatro consumidores. Dois desses consumidores são sorteados entre os nós da Coluna 1 e os outros dois entre os nós da Coluna $\lceil M/2 \rceil$. Assim, existem dois consumidores em uma das extremidades da topologia da rede e outros dois na parte central. Ainda nessa configuração, um par de consumidores solicita o mesmo conteúdo, sendo que um par é formado por um consumidor localizado na extremidade e outro na parte central da topologia. A justificativa para essas duas configurações é avaliar o uso do *cache* nos nós intermediários para atender um número diferente de consumidores em diferentes regiões da rede.

As configurações anteriores são analisadas também para diferentes taxas de solicitação de interesses. Consumidores podem enviar 10 ou 20 pacotes de interesse por segundo. Os pacotes de interesse contém o nome do conteúdo desejado. Cada conteúdo possui 1000 bytes e é enviado em um pacote de dados. O tamanho do *cache* utilizando nas simulações é de 100 kB e a política de descarte utilizada é a *Least Recently Used* (LRU).

Os parâmetros dos mecanismos propostos são definidos da seguinte forma. Para os três mecanismos propostos, define-se que o limiar de centralidade G é igual a 8. Esse é

o número típico de vizinhos dos nós localizados na região central da topologia em grade. Com isso, nós que possuem mais vizinhos tem o encaminhamento de interesses limitado pelos critérios definidos por um dos três mecanismos propostos. Avaliam-se também os mecanismos PIF e ReCIF+PIF para dois valores de probabilidade de encaminhamento de interesses: $p = 0,5$ e $p = 0,2$. O objetivo é verificar o desempenho da rede para situações mais e menos restritivas. Por fim, o limiar de retransmissões é igual a $C = 3$ para a grade 4×5 e $C = 6$ para a grade 10×10 . Estes valores foram definidos após a realização de testes preliminares, nos quais foi observado o número médio de retransmissões para que os pacotes de um determinado consumidor chegassem até o seu devido nó produtor.

O protocolo OLSR é usado para comparação de desempenho entre uma rede em malha tradicional baseada na pilha TCP/IP e a rede em malha orientada a conteúdo. Nas simulações, as mensagens de sonda (HELLO) são enviadas a cada 1,5 s. As mensagens de estado do enlace, utilizadas pelos MPRs (*Multipoint Relays*) para calcular o mapa da topologia, são enviadas a cada 5 s. Para simular o pedido e a entrega de conteúdos na rede em malha TCP/IP, é utilizado tráfego CBR (*Constant Bit Rate*) na mesma taxa de pedidos de interesse e com o mesmo tamanho dos pacotes de dados dos produtores. O objetivo desta configuração é aproximar o comportamento de tráfego das duas redes já que ambas atuam de forma diferente em termos do encaminhamento dos dados.

6. Resultados

O objetivo dos experimentos realizados é comparar o desempenho dos três mecanismos propostos – PIF, ReCIF e ReCIF+PIF – com o encaminhamento padrão de uma rede em malha baseada na arquitetura CCN e com uma rede em malha baseada na arquitetura TCP/IP executando o protocolo de roteamento OLSR. As métricas avaliadas são o número de pacotes de dados entregues e o atraso médio de entrega desses pacotes. Considera-se que o atraso de entrega é o intervalo de tempo entre o envio do pacote de interesse e a recepção do conteúdo pelo consumidor. Para cada topologia e configuração descritas na seção anterior, são realizadas 20 rodadas de simulação com duração de 100 s cada uma. Para os gráficos apresentados nas seções a seguir, calcula-se o intervalo de confiança, representado por barras verticais, para um nível de confiança de 95%. Os resultados estão divididos de acordo com a topologia analisada.

6.1. Topologia em Grade 4 x 5

As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados para as métricas número de pacotes entregues e atraso de entrega para todos os mecanismos analisados. Nesta primeira configuração, existem dois consumidores e dois produtores e a taxa de envio de interesses de cada consumidor é igual a 10 pacotes/s. Os resultados mostram que o mecanismo proposto PIF com $p = 0,2$ é o que apresenta o melhor desempenho entre as redes orientadas a conteúdo considerando conjuntamente o número de pacotes entregues e o atraso médio de entrega. Ele aumenta o número de pacotes entregues e reduz o atraso de entrega se comparado à CCN padrão. Isto indica que esse mecanismo conseguiu evitar retransmissões desnecessárias proporcionando uma menor competição pelo meio. Considerando apenas os pacotes entregues, o mecanismo ReCIF é o que possui o melhor desempenho, cerca de 7% superior ao mecanismo padrão da CCN. Isto porque a abordagem mais restritiva do ReCIF provocou uma priorização na entrega dos pacotes com menor número de retransmissões e, portanto, obteve uma melhor eficiência na entrega dos dados aos

nós consumidores. Os outros mecanismos propostos também apresentam pequenos ganhos quando comparados ao mecanismo padrão, com exceção do mecanismo PIF com $p = 0,5$. Nesta configuração, o sorteio do PIF provocou uma filtragem nos pacotes que deveriam ser entregues com maior agilidade, como os que possuem um baixo índice de retransmissão e portanto acabou comprometendo parcialmente seu desempenho. O preço pago pelo maior número de pacotes entregues pelos mecanismos propostos é um pequeno aumento do atraso de entrega quando comparados à CCN padrão, exceto o PIF com $p = 0,2$.

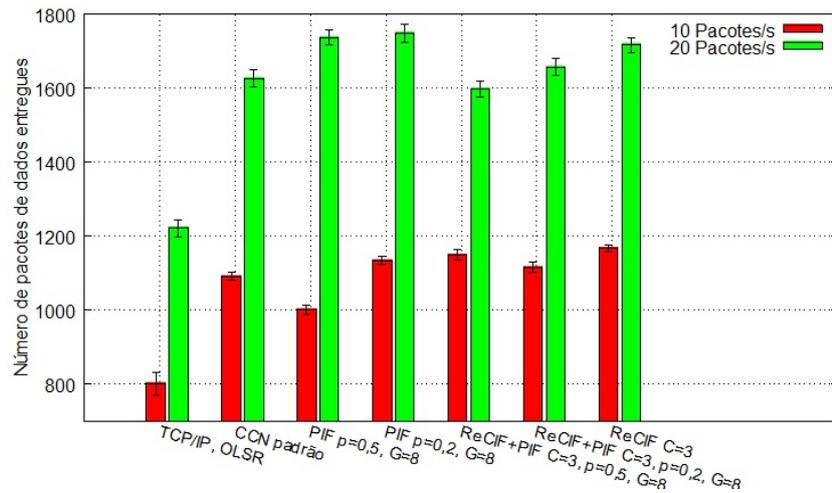


Figura 1. Grade 4x5: Número de pacotes entregues com dois consumidores e dois produtores e taxa de pedidos de interesse de 10 e 20 pacotes/s.

As Figuras 1 e 2 também mostram os resultados para um cenário semelhante ao anterior, porém com uma taxa de pedidos de interesse de 20 pacotes/s. Neste cenário, também observa-se que quatro configurações dos mecanismos propostos aumentam o número de pacotes de dados entregues quando comparadas à CCN padrão. A variação do atraso entre as propostas baseadas na CCN é pequena neste cenário.

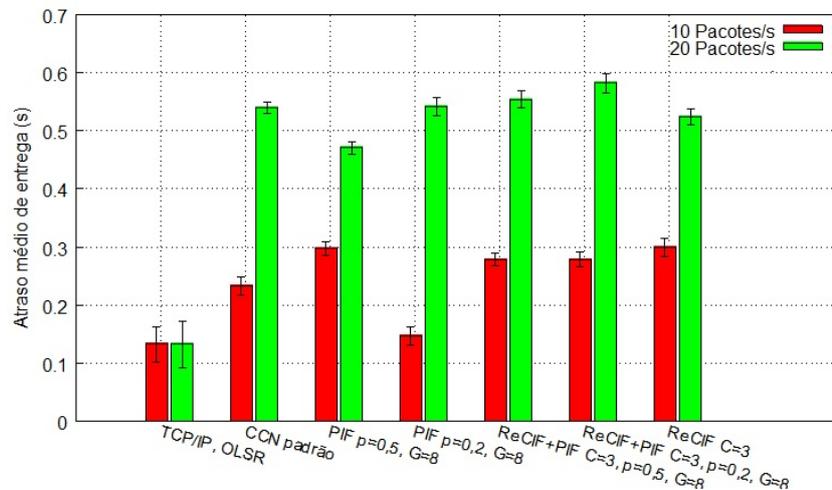


Figura 2. Grade 4x5: Atraso médio de entrega com dois consumidores e dois produtores e taxa de pedidos de interesse de 10 e 20 pacotes/s.

Nos dois cenários anteriores, o OLSR proporcionou uma taxa de entrega mais baixa do que os mecanismos propostos e a CCN padrão. O baixo valor de atraso, por outro lado, se dá em virtude de como foi simulada a entrega de conteúdos. Nesse caso, os pacotes de conteúdo são enviados pelos produtores sem que eles recebam um pedido, ou seja, são criados e enviados. Portanto, somente o intervalo de tempo entre o envio do conteúdo pelo produtor e a recepção do conteúdo pelo consumidor é computado.

Nos dois cenários anteriores, as propostas orientadas a conteúdo não se beneficiam do uso de *cache* pelos nós intermediários, uma vez que os dois consumidores solicitam os conteúdos sequencialmente e cada uma apenas uma vez. Para verificar a eficiência do emprego do *cache* nas redes em malha, consideram-se quatro consumidores definidos como explica a Seção 5. Cada um gera interesses a uma taxa de 10 pacotes/s. As Figuras 3 e 4 mostram os resultados para esse cenário. Destaca-se o mecanismo PIF com $p = 0,5$ que aumenta o número de pacotes entregues e reduz o atraso em relação à CCN padrão. Vale destacar que para esse cenário com 4 consumidores o PIF com $p = 0,5$ possibilitou uma abordagem menos restritiva com relação ao encaminhamento de pacotes de interesse e isso foi bem aproveitado por metade dos consumidores que estavam posicionados em regiões centrais do cenário e portanto estavam ao alcance de até 1 salto dos nós com $G = 8$. Vale ressaltar ainda que os atrasos proporcionados pelos outros mecanismos propostos também são inferiores em relação ao proporcionado pela CCN padrão.

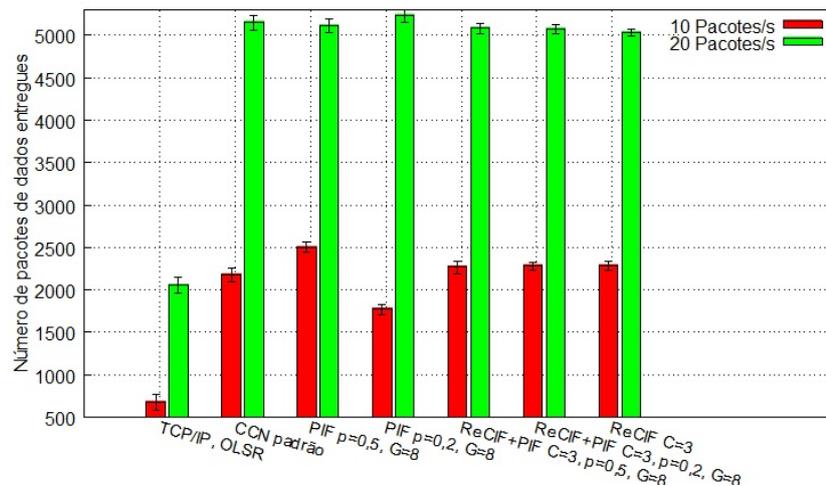


Figura 3. Grade 4x5: Número de pacotes entregues com quatro consumidores e dois produtores e taxa de pedidos de interesse de 10 e 20 pacotes/s.

As Figuras 3 e 4 também mostram os resultados para um cenário semelhante ao anterior, porém cada consumidor solicita conteúdos a uma taxa de 20 pacotes/s. O principal resultado é que os ganhos proporcionados pelo mecanismo proposto são pouco significativos se comparado ao desempenho da CCN padrão. Isso indica que a operação da rede está próxima da saturação e o problema da tempestade de *broadcast* fica evidenciado com o aumento da carga.

6.2. Topologia em Grade 10 x 10

Nesta seção, aumenta-se o número de nós da rede de 20 para 100 nós e repete-se a avaliação para as quatro configurações da seção anterior. As Figuras 5 e 6 mostram

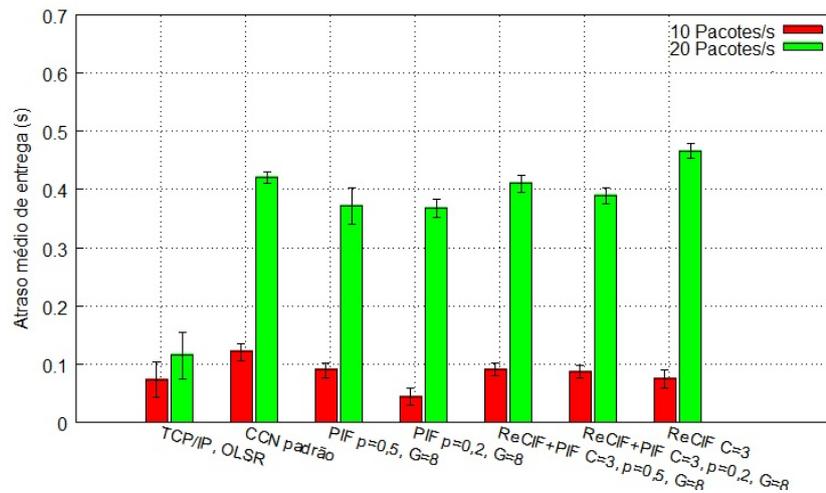


Figura 4. Grade 4x5: Atraso médio de entrega com quatro consumidores e dois produtores e taxa de pedidos de interesse de 10 e 20 pacotes/s.

os resultados quando existem dois consumidores enviando interesses a uma taxa de 10 pacotes/s. Nessa configuração, os ganhos proporcionados pelos mecanismos propostos são de até 19% em comparação com a CCN padrão, considerando o número de pacotes entregues. O aumento de número de nós provocou um maior número de retransmissões de pacotes de interesse devido a maior quantidade de nós com alta centralidade e que fazem parte do caminho até os nós consumidores. Portanto, este ganho de 19% está ligado diretamente à redução das retransmissões destes pacotes de interesse e consequentemente a redução na competição pelo meio provocada pelo excessivo número de pacotes de interesse.

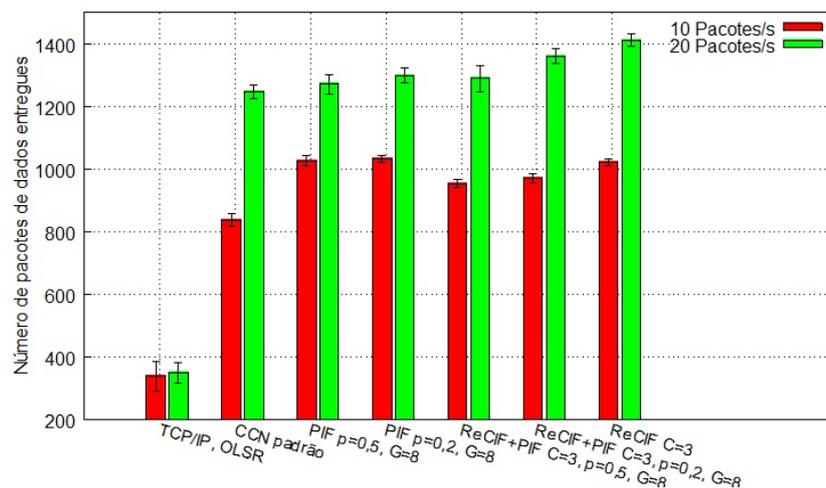


Figura 5. Grade 10x10: Número de pacotes entregues com dois consumidores e dois produtores e taxa de pedidos de interesse de 10 e 20 pacotes/s.

Para o mesmo cenário anterior com consumidores gerando interesses a uma taxa de 20 pacotes/s, os mecanismos propostos também proporcionaram um aumento na taxa de entrega de pacotes em relação à CCN padrão. Este comportamento que pode ser visto nas Figuras 5 e 6, demonstram o que duplicando a taxa de envio de pacotes de inte-

resse, ou seja inserindo uma maior carga de dados na rede, ainda assim os mecanismos propostos apresentam uma superioridade em termos de eficiência quando comparado ao modelo CCN padrão. Nesta configuração, o mecanismo que demonstra maior eficiência é o ReCIF, devido à maior saturação do meio e o comportamento mais restritivo do ReCIF. Em termos do atraso de entrega, observa-se que os mecanismos propostos também obtiveram um menor atraso com relação à CCN padrão. Isso indica que com a redução da tempestade de *broadcast* se reduz também a disputa pelo meio. Consequentemente, os nós experimentam um aumento na taxa de entrega e uma redução do atraso. Sobre o OLSR, percebe uma grande redução do número de pacotes entregues em função do aumento do número de saltos entre os produtores e consumidores. Nas propostas orientadas a conteúdo, esse problema é reduzido em virtude do uso de *caches*. Nesse caso, conteúdos podem ser enviados por nós intermediários que estejam mais próximos dos consumidores. Outro ponto que demonstra a degradação do desempenho do OLSR é o aumento significativo do atraso. Na topologia de rede com 20 nós, o atraso proporcionado pelo OLSR é menor do que qualquer uma das propostas orientadas a conteúdo. Por outro lado, com 100 nós, o atraso do OLSR é maior do que qualquer proposta CCN. Este comportamento apresentado pelo OLSR demonstrou que quanto mais saturado estiver o cenário maior também será a eficiência na entrega de dados proporcionada pelas redes que fazem uso de cache intermediário, como as redes CCN. Este cache intermediário, testado nas simulações, proporcionou um aumento significativo na entrega de pacotes, conforme demonstrado nos resultados.

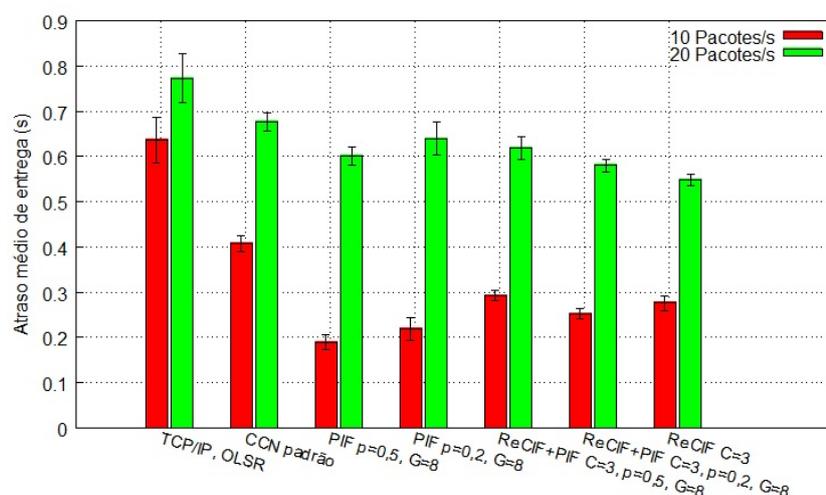


Figura 6. Grade 10x10: Atraso médio de entrega com dois consumidores e dois produtores e taxa de pedidos de interesse de 10 e 20 pacotes/s.

Para os cenários com quatro consumidores e a rede com 100 nós, os resultados são similares aos dos cenários com dois consumidores para esta mesma topologia e portanto optou-se por não expor os gráficos deste cenário.

7. Conclusão

Este artigo introduziu três mecanismos para limitar o encaminhamento de pacotes de interesse e, assim, reduzir o problema da tempestade de interesses em redes em malha sem-fio orientadas a conteúdo. O PIF define uma probabilidade de encaminhamento para

os pacote de interesse em nós com alta centralidade. O ReCIF limita o número de pacotes de interesse encaminhados com base no número de encaminhamentos anteriores desses pacotes. O ReCIF+PIF combina os critérios de encaminhamento das duas propostas anteriores. Os resultados mostram que os mecanismos propostos aumentam o número de pacotes de dados entregues e reduzem o atraso em muitos dos cenários analisados quando comparados à CCN padrão e à rede em malha baseada na pilha TCP/IP com o OLSR. Observa-se que os ganhos são maiores na rede com mais nós. Em um próximo trabalho pretende-se utilizar uma nova forma de calcular o limiar de retransmissão C de forma a atender as variações de posicionamento dos produtores em caso de redes móveis. Também será alvo de estudos a utilização de um mecanismo adaptativo que escolha o critério de encaminhamento de interesses de acordo com as características da rede em que está sendo executado. Isso pode ser obtido com a troca de informações entre os nós consumidores e produtores. Pretende-se também utilizar cenários com diferentes topologias e número de nós para analisar a eficiência dos mecanismos propostos.

Referências

- Afanasyev, A., Moiseenko, I., Zhang, L. et al. (2012). ndnsim: Ndn simulator for ns-3. *Named Data Networking (NDN) Project, Tech. Rep. NDN-0005, Rev. 2*.
- Akyildiz, I. F., Wang, X. e Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: a survey. *Computer networks*, 47(4):445–487.
- Al-Arnaout, Z., Fu, Q. e Frea, M. (2012). A content replication scheme for wireless mesh networks. Em *Proceedings of the 22nd international workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video*, páginas 39–44. ACM.
- Alves, R. d. S., Campbell, I. d. V., Couto, R. d. S., Campista, M. E. M., Moraes, I. M., Rubinstein, M. G., Costa, L. H. M., Duarte, O. C. M. e Abdalla, M. (2009). Minicurso: Cap. 5-redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. páginas 199–254.
- Amadeo, M., Campolo, C. e Molinaro, A. (2012). Content-centric networking: is that a solution for upcoming vehicular networks? Em *Proceedings of the ninth ACM international workshop on Vehicular inter-networking, systems, and applications*, páginas 99–102. ACM.
- Burresti, S., Canali, C., Renda, M. E. e Santi, P. (2008). Meshchord: a location-aware, cross-layer specialization of chord for wireless mesh networks (concise contribution). Em *Pervasive Computing and Communications, 2008. PerCom 2008. Sixth Annual IEEE International Conference on*, páginas 206–212. IEEE.
- Campista, M. E. M., Costa, L. H. M. e Duarte, O. C. M. (2007a). Um mecanismo para privilegiar pacotes de vida longa em redes sem fio de múltiplos saltos. *XXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 14.
- Campista, M. E. M., Costa, L. H. M. e Duarte, O. C. M. (2008). Wpr: Um protocolo de roteamento pró-ativo adaptadoas redes em malha sem fio. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, páginas 889–902.
- Campista, M. E. M., Moraes, I. M., Esposito, P. M., Amodei, A., de O Cunha, D., Costa, L. H. M. e Duarte, O. C. M. (2007b). The ad hoc return channel: A low-cost solution for brazilian interactive digital tv. *Communications Magazine, IEEE*, 45(1):136–143.

- Canali, C., Renda, M. E., Santi, P. e Burrelli, S. (2010). Enabling efficient peer-to-peer resource sharing in wireless mesh networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 9(3):333–347.
- Carofiglio, G., Gallo, M. e Muscariello, L. (2012). Icp: Design and evaluation of an interest control protocol for content-centric networking. Em *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2012 IEEE Conference on*, páginas 304–309. IEEE.
- De Brito, G. M., Velloso, P. B. e Moraes, I. M. (2013). *Information Centric Networks: A New Paradigm for the Internet*. John Wiley & Sons.
- De Brito, G. M., Velloso, P. B. e Moraes, I. M. (2014). Uma análise do desempenho de redes orientadas a conteúdo sem-fio. Em *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*.
- Henderson, T. R., Lacage, M., Riley, G. F., Dowell, C. e Kopena, J. (2008). Network simulations with the ns-3 simulator. *SIGCOMM demonstration*.
- Jacobson, V., Smetters, D. K., Thornton, J. D., Plass, M. F., Briggs, N. H. e Braynard, R. L. (2009). Networking named content. Em *Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies*, páginas 1–12. ACM.
- Jacquet, P., Muhlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A. e Viennot, L. (2001). Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. Em *Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century. Proceedings. IEEE International*, páginas 62–68. IEEE.
- Mascarenhas, D., Rubinstein, M. e Sztajnberg, A. (2008). Uma nova métrica para protocolos de roteamento em redes em malha sem fio. *XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT*.
- Oh, S.-Y., Lau, D. e Gerla, M. (2010). Content centric networking in tactical and emergency manets. Em *Wireless Days (WD), 2010 IFIP*, páginas 1–5. IEEE.
- Saade, D., Albuquerque, C., Magalhaes, L., Passos, D., Duarte, J. e Valle, R. (2007). Redes em malha: Solução de baixo custo para popularização do acesso a internet no brasil. *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT*, páginas 1–6.
- Sbai, M. K., Barakat, C., Choi, J., Al Hamra, A. e Turletti, T. (2008). Adapting bittorrent to wireless ad hoc networks. Em *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks*, páginas 189–203. Springer.
- Stoica, I., Morris, R., Liben-Nowell, D., Karger, D. R., Kaashoek, M. F., Dabek, F. e Balakrishnan, H. (2003). Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for internet applications. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 11(1):17–32.
- Tseng, Y.-C., Ni, S.-Y., Chen, Y.-S. e Sheu, J.-P. (2002). The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *Wireless networks*, 8(2-3):153–167.
- Wang, L., Afanasyev, A., Kuntz, R., Vuyyuru, R., Wakikawa, R. e Zhang, L. (2012). Rapid traffic information dissemination using named data. Em *Proceedings of the 1st ACM workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design-Architecture, Algorithms, and Applications*, páginas 7–12. ACM.