

HAMP- Protocolo de Difusão em Grupo Para Redes Com Padrões de Mobilidade Heterogéneos

Oksana Denysyuk
INESC-ID / IST
oksana.denysyuk@ist.utl.pt

José Mocito
INESC-ID / FCUL
jmcito@gsd.inesc-id.pt

Luís Rodrigues
INESC-ID / IST
ler@ist.utl.pt

Resumo—A difusão em grupo é útil para suportar diferentes aplicações em *MANETs*, incluindo a disseminação de dados, descoberta de serviços, publicação-subscrição, entre outras. Consequentemente, este problema tem sido extensivamente estudado. No entanto, a maior parte dos protocolos de difusão são desenhados para um padrão específico de mobilidade e, portanto, são incapazes de atingir um bom desempenho perante condições de mobilidade heterogénea. Este artigo propõe e avalia o HAMP, um protocolo de difusão para *MANETs* que combina a eficiência de abordagens estruturadas e a robustez de esquemas baseadas em inundação, adaptando o seu algoritmo de encaminhamento de acordo com as condições de mobilidade observadas localmente em cada nó.

I. INTRODUÇÃO

A difusão em grupo (multicast) é útil para suportar diferentes aplicações em redes móveis e ad hoc (*MANETs*), incluindo a partilha de dados, publicação-subscrição, entre outros. Assim, uma quantidade significativa de trabalho tem sido investida no desenvolvimento de protocolos de difusão em grupo para ambientes móveis e ad hoc. Estes protocolos tentam minimizar o custo de execução, ou seja, o número de pacotes de dados e de controlo que necessitam de ser trocados para conseguir a difusão. O desafio consiste em alcançar níveis elevados de fiabilidade perante a mobilidade dos nós e alterações na topologia, sem sacrificar a eficiência.

Os protocolos de difusão em grupo para *MANETs* podem dividir-se em duas classes principais: não estruturadas e estruturadas. As abordagens não estruturadas são tipicamente baseadas em inundação (do Inglês, *flooding*) melhorada. Estas adaptam-se bem a alterações na topologia da rede e, consequentemente, são as mais indicadas para cenários com elevada mobilidade, em que é difícil manter rotas estáveis entre os nós. As abordagens estruturadas tentam aproximar uma árvore de dispersão, à custa da manutenção e construção de estruturas lógicas. Estas abordagens conseguem executar a difusão das mensagens de forma eficiente em condições estáveis e são, portanto, as mais indicadas em cenários com mobilidade baixa ou esporádica.

Acreditamos que as *MANETs* do futuro não serão homogéneas em termos de padrões de mobilidade. Por exemplo, *MANETs* criadas para operações de rescaldo terão uma mistura de nós relativamente estáveis (centro de comando, hospital de campo) e nós altamente móveis (equipas de procura e salvamento); os centros de conferências têm uma mistura de nós fixos (stands) e nós móveis (participantes); aeroportos e universidades têm pessoas em trânsito, mas também pessoas

à espera em cafés, restaurantes ou salas de leitura. Tanto quanto sabemos, não existe nenhum protocolo de difusão em grupo que se destaque nestes ambientes heterogéneos. Este artigo propõe o HAMP, um protocolo de difusão em grupo eficiente e robusto para redes ad hoc com mobilidade heterogénea, que combina uma eficiente abordagem estruturada e um mecanismo robusto de inundação com base nos padrões de movimento observados localmente por cada nó.

II. DIFUSÃO EM REDES MÓVEIS E AD-HOC

Um serviço de difusão em grupo permite a processos enviarem mensagens para um conjunto de destinatários. Nesta secção apresentamos sumariamente diferentes técnicas para oferecer este serviço em *MANETs*.

A. Difusão Não Selectiva

A difusão não selectiva (do Inglês, *broadcast*) pode ser vista como um caso particular de difusão em grupo, onde se pretende que todos os nós do sistema recebam a mensagem. A difusão não selectiva é um dos serviços mais importantes numa *MANET* já que é usado como bloco de construção para muitos outros serviços e aplicações, incluindo protocolos de encaminhamento ponto-a-ponto e em difusão. A maneira mais simples de concretizar a difusão não selectiva é através do uso de inundação, como se descreve de seguida.

O processo de inundação consiste na retransmissão de uma mensagem, por cada nó para os seus vizinhos, após a primeira recepção da mesma. Mais concretamente, a inundação pode ser obtida da seguinte forma. O emissor envia a mensagem a todos os seus vizinhos. Cada nó verifica se recebeu a mensagem pela primeira vez e, nesse caso, retransmite-a. Isto obriga os nós a guardarem os identificadores das mensagens previamente recebidas durante algum tempo. O processo é repetido em cada nó até que todos os membros da rede tenham recebido a mensagem. Geralmente, a inundação cobre completamente a rede, mas pode também ser limitada por um parâmetro *TTL* (do Inglês, *time-to-live*), que representa o tempo de vida (número máximo de saltos) da mensagem na rede. Neste caso, um nó, ao receber a mensagem, apenas a retransmite se o *TTL* da mensagem for maior que 0. O *TTL* é decrementado em cada retransmissão. Infelizmente, esta forma simples de inundação é geralmente muito onerosa em termos de utilização de recursos da rede, e caracteriza-se por criar elevados níveis de redundância, contenção e colisão, um fenómeno também conhecido como *broadcast storm*[9].

Para resolver este problema muitas alternativas à inundação simples têm sido propostas na literatura.

Melhoramentos   inundação simples podem ser categorizados nas seguintes classes: métodos probabilistas, onde os nós decidem retransmitir baseados em funções de probabilidade; métodos baseados em contador, onde a decisão de retransmitir depende do número de retransmissões de pacotes observados anteriormente; métodos baseados na vizinhança, onde nós decidem retransmitir baseando-se numa estimativa do número ou da localização dos seus vizinhos; e, finalmente, métodos baseados no conhecimento dos vizinhos onde os nós decidem retransmitir baseando-se em informação que recebem dos seus vizinhos. O objectivo principal de todos estes métodos consiste em reduzir o número de transmissões redundantes; o que   alcançado   custa de alguma complexidade algorítmica adicional, computação extra e maior consumo de memória.

B. Difusão em Grupo

A difusão em grupo pode ser concretizada recorrendo à inundação: todos os nós participam na disseminação da mensagem mas apenas os nós interessados entregam a mensagem às camadas superiores. No entanto, o uso de inundação para concretizar a difusão em grupo em redes estáveis é claramente uma abordagem sub-óptima. Um dos objectivos de um protocolo de difusão em grupo consiste em limitar o número de nós envolvidos na operação de difusão enquanto assegura a entrega das mensagens a todos os membros.

Os algoritmos de encaminhamento para difusão em grupo constroem rotas de acordo com duas abordagens diferentes: proactiva e reactiva.

Os esquemas proactivos mant m a informação relativa às rotas entre todos os nós na rede ao longo de todo o tempo. Como a informação da rota está sempre disponível e actualizada, os protocolos proactivos geralmente entregam mensagens com baixa latência. Isso é alcançado   custa de sinalização adicional na rede. O CBT[1] é um exemplo de um protocolo de encaminhamento proactivo.

Esquemas reactivos apenas constroem as rotas de difusão quando   necessário transmitir. Geralmente induzem menor custo de sinalização mas podem introduzir maiores atrasos na entrega de pacotes. O MAODV[10], ODMRP[6], DCMP[2], NSMRP[3] são alguns exemplos de protocolos de difusão em grupo reactivos.

Considerando o tipo de topologia criada pelo protocolo de encaminhamento, os protocolos de difusão em grupo são frequentemente categorizados nas quatro seguintes classes:

- **Abordagens baseadas em árvores de dispersão** A maneira como a árvore   construída tem em consideração a topologia física da rede, tornando a disseminação de dados muito eficiente. O MAODV[10] e AMRIS[12] são exemplos de protocolos de encaminhamento em  rvore.
- **Abordagens baseadas em malha** Estas abordagens permitem a manutenção de múltiplas rotas entre os emissores e os receptores. O ODMRP[6] e DCMP[2] são exemplos de protocolos baseados em malhas.

- **Difusão sem estado** Esta aproximação não requer que informação adicional seja mantida pelos nós, utilizando um protocolo ponto-a-ponto de base. Um n  que deseje enviar uma mensagem para um grupo, enumera explicitamente todos os receptores. Os protocolos de difusão sem estado são mais indicados para grupos de pequena dimensão. O DDM [5] é um exemplo desta abordagem.
- **Abordagens híbridas** Abordagens que combinam algumas das técnicas acima indicadas. Vários protocolos constroem primeiro uma topologia baseada em malha e, de seguida, produzem uma árvore de disseminação de dados por cima da malha. O AMRoute [13] é um exemplo desta classe de protocolos.

C. Discussão

Todos os algoritmos de difusão em grupo apresentados anteriormente possuem vantagens e limitações. No caso geral, a inundação não é eficiente na utilização de recursos, porque todos os nós, mesmo aqueles que não estão interessados nas mensagens difundidas, são envolvidos no processo de disseminação. Por outro lado, a redundância inerente   inundação têm também vantagens. Concretamente, a inundação é muito robusta e falhas pontuais geralmente não comprometem a disseminação de dados. Adicionalmente, a inundação é independente da topologia da rede, pelo que não requer qualquer operação de manutenção.

Contrariamente   inundação, as soluções baseadas em árvore, tal como o MAODV, tentam minimizar o número de nós que participam na disseminação de dados, construindo rotas quase óptimas entre os membros do grupo de difusão. Infelizmente, uma estrutura em árvore é muito frágil e pode ser facilmente quebrada por uma falha ou pelo movimento dos membros da  rvore. Consequentemente, soluções baseadas em árvore apresentam tipicamente um desempenho fraco em ambientes com elevada mobilidade.

Soluções baseadas em malha são desenhadas para ser mais robustas do que protocolos baseados em  rvore. A robustez   alcançada recorrendo à redundância de rotas e incorre num consumo de recursos adicional. Num protocolo baseado em malha, tal como o ODMRP, cada fonte inunda periodicamente a rede com mensagens de sinalização. Foi demonstrado que,   medida que o número de emissores aumenta, mais tráfego é produzido em toda a rede e o rácio de entrega de mensagens de dados cai significativamente, devido ao aumento do número de colisões [7]. Em redes est ticas, o ODMRP introduz uma sobrecarga da rede significativa, não apenas pelo procedimento de actualização das rotas, mas também pela redundância das rotas entre os membros do grupo. Por outro lado, em *MANETs* altamente dinâmicas, o atraso entre a detecção de falhas e descoberta de novas rotas depende da frequência do processo de actualização das rotas. Para  l m disso, se este processo for demasiado frequente, a rede pode ficar congestionada.

Nenhum dos protocolos anteriormente descritos tem em consideração a heterogeneidade da mobilidade dos nós. Num cenário realista, existirão partes mais estáveis da rede enquanto que outras serão mais dinâmicas. O ADB[4] tenta oferecer

uma solução adaptativa tendo em vista este problema. O protocolo cria uma floresta de rotas em árvore de profundidade variável e as raízes das árvores estão organizadas numa estrutura tipo malha. A ideia consiste em construir uma árvore de encaminhamento em zonas estáveis e uma malha em áreas dinâmicas. Isso significa que, até sob condições de alta mobilidade, os nós continuam a reunir e a usar informação de encaminhamento que rapidamente se torna desactualizada.

III. O PROTOCOLO HAMP

Tal como foi discutido na secção anterior, geralmente, os protocolos de difusão em grupo assumem um padrão de mobilidade e tomam um compromisso entre eficiência e fiabilidade no momento em que são desenhados. Em redes ad hoc que exibem alguma estabilidade vale a pena manter rotas para suportar a difusão de uma forma mais eficiente. No entanto, em sistemas muito dinâmicos, as rotas tornam-se instáveis. Isto força os protocolos estruturados a reconstruir rotas, o que é uma operação dispendiosa e que frequentemente requer alguma forma de inundação. Mas, em ambientes altamente dinâmicos, onde uma operação de reparação onerosa não acompanha o dinamismo da rede, pode valer a pena adoptar alguma forma de inundação para suportar a difusão em grupo. As rotas podem então ser reconstruídas quando alguma estabilidade for observada. Desse modo, os recursos adicionais da rede são consumidos para assegurar altos rácios de entrega de mensagens sob condições instáveis, melhorando a eficiência quando a rede estabiliza.

Este artigo propõe o HAMP, um protocolo de difusão em grupo que exhibe bom desempenho em ambientes que combinam regiões estáveis e com regiões dinâmicas. A designação de HAMP advém das iniciais de *Heterogeneity-Aware Multicast Protocol*. O protocolo combina o uso de uma abordagem baseada em malha em regiões estáveis e uma abordagem baseada em inundação em regiões com muita mobilidade. Ambas as abordagens podem co-existir na mesma rede e uma transição dinâmica entre o encaminhamento em malha e por inundação é suportada pelo protocolo. De facto, a rede ad hoc pode ser composta por múltiplas regiões estáveis e instáveis e a propagação de dados em difusão pode comutar múltiplas vezes entre as duas formas de encaminhamento.

A. Blocos de Construção

O protocolo HAMP combina um protocolo de difusão em grupo baseado em malha e um protocolo optimizado de inundação localizada. Como irá ser discutido, um dos maiores desafios na materialização deste protocolo combinado é o de identificar os pontos na rede onde a estratégia de encaminhamento deve comutar de malha para inundação (e vice-versa), de modo a que a fiabilidade seja assegurada sem inundar toda a rede (ou seja, mantendo a inundação localizada). Como blocos para a construção do HAMP usámos os algoritmos que descrevemos de seguida.

Para a operação em malha usámos o protocolo PUMA[11]. O PUMA é um protocolo de difusão em malha que usa uma única mensagem de controlo, um anúncio em difusão que é

trocado periodicamente por todos os nós da rede. Uma das finalidades destes anúncios é a de eleger um nó-raiz para o grupo e assegurar que todos os nós na rede possuem uma rota para o nó-raiz. Adicionalmente, todos os nós situados nos caminhos mais curtos entre qualquer receptor e o nó-raiz tornam-se membros da malha. Mensagens em difusão são encaminhadas para o nó-raiz até encontrarem um membro da malha; deste ponto em diante, as mensagens são propagadas na malha para alcançarem todos os membros do grupo.

A razão para seleccionar um algoritmo de difusão baseado em malha em vez de um algoritmo baseado em árvore, deve-se ao facto de uma malha de encaminhamento ser potencialmente mais robusta do que a árvore. Portanto, espera-se que as soluções em malha melhorem o desempenho em cenários de padrões de mobilidade híbridos. Para além disso, como iremos ver na secção de avaliação, mesmo uma solução em malha não é adequada para cenários heterogéneos. Das múltiplas soluções em malha que podem ser encontradas na literatura, seleccionámos o PUMA devido ao seu baixo custo de sinalização, mesmo em ambientes móveis.

Para a operação de inundação optimizada usámos o algoritmo PAMPA[8]. O PAMPA usa um esquema baseado em distância, usando a potência do sinal na recepção da mensagem para estimar a distância ao emissor. O algoritmo ordena os nós receptores usando a distância estimada ao emissor de modo que os nós mais distantes têm maior probabilidade de retransmitir primeiro (na prática, os nós atrasam a retransmissão por uma quantidade de tempo que é proporcional à potência de sinal medida). A retransmissão é cancelada se, durante o período de atraso, uma retransmissão da mesma mensagem for escutada c vezes. Isto impede os nós que oferecem uma baixa cobertura adicional de retransmitir. Uma vantagem significativa do PAMPA é de que existe uma forte correlação entre o TTL da inundação e a cobertura geográfica que o processo de inundação consegue alcançar. Deste modo, torna-se mais fácil limitar a inundação a uma região do espaço onde existe elevada mobilidade (por exemplo, numa rua) independentemente da densidade de nós nessa área.

B. Funcionamento do HAMP

Numa rede estática, o funcionamento do HAMP aproxima-se ao funcionamento do PUMA. Desse modo, se a rede é conexas, um único nó-raiz será seleccionado e propagará periodicamente anúncios que são usados para definir uma malha ligando membros do grupo. Como explicaremos em baixo, um anúncio do HAMP transporta informação adicional que é mais tarde usada para identificar nós-fronteira, onde o encaminhamento de mensagens é comutado de malha para inundação e vice-versa. Como resultado da operação do PUMA, cada nó na rede é capaz de determinar se: i) é um membro da malha do grupo; ii) caso não seja, qual é a rota para o nó-raiz; iii) caso seja, qual é a distância ao nó-raiz e se existem mais membros da malha a jusante da raiz.

Baseado na troca periódica de anúncios, um nó pode detectar a presença de mobilidade na rede se uma ou ambas das seguintes situações ocorrerem: i) os membros da malha a

montante (os nós na rota mais curta para o nó-raiz do grupo) são instáveis; ii) os membros da malha a jusante são instáveis.

1) *Estabilidade*: No HAMP, a estabilidade é definida em função da troca periódica de anúncios entre nós na rede. Se existir pelo menos um pai do nó na vizinhança que esteja presente durante k anúncios consecutivos, o nó é considerado estável. É de referir que o algoritmo PUMA cria um encaminhamento em malha em forma de árvore, pelo que os nós podem determinar quem são os seus pais baseando-se na distância ao nó-raiz. Se a condição de pelo menos um nó estável a montante não for mantida, a vizinhança é considerada instável. Os seguintes aspectos devem ser enfatizados em relação a esta noção de estabilidade:

- A estabilidade é uma propriedade local, ou seja, a rede pode incluir regiões simultaneamente estáveis e instáveis.
- Adicionalmente, o nó na fronteira pode ter a zona de instabilidade quer a montante quer a jusante do nó-raiz. Este facto deve ser tomado em conta quando se decide se o nó deve mudar de modo de encaminhamento de acordo com o sentido de onde a mensagem foi recebida.

Como referido, a ideia na génese do HAMP é de que os nós instáveis devem realizar uma inundação localizada, enquanto que os nós estáveis continuam a executar um encaminhamento baseado em malha. Um desafio deste trabalho consiste em identificar quais os nós que devem comutar entre encaminhamento baseado em malha e em inundação. Outro desafio consiste em descobrir qual o TTL que deve ser usado quando a inundação localizada é iniciada.

2) *Eleição de Nós-Fronteira*: Designamos nó-fronteira (NF) um nó que é responsável por mudar o modo de encaminhamento de uma mensagem em difusão, de encaminhamento baseado em malha para baseado em inundação e vice-versa. Se a região instável estiver a jusante do NF (em relação ao nó-raiz), o nó é chamado de nó-fronteira a montante, ou NFM. De modo oposto, se a região de inundação estiver a montante do NF, o nó é chamado de nó-fronteira a jusante, indicado por NFJ. Os nós-fronteira têm um atributo associado chamado horizonte de inundação (HI) que corresponde ao valor TTL que deve ser associado à inundação iniciada por um NF.

De modo a permitir a identificação dos NF, é necessário alterar a informação que é propagada pelos anúncios do PUMA, de modo a capturar a rota desde o nó-raiz para nós da malha. Note-se que, se a região da rede entre um nó n e o nó-raiz for estável, um dado nó n , na maioria das vezes, irá receber os anúncios vindos do nó-raiz através da mesma via. Por outro lado, se houver uma região instável entre o nó n e o nó-raiz, parte daquele caminho irá mudar frequentemente. No HAMP, os nós-fronteira a jusante são identificados primeiro. Estes nós são responsáveis por eleger os nós-fronteira a montante.

Um nó n passa a ser um nó fronteira a jusante (NFJ) se todas as seguintes condições se verificarem: i) n é membro da malha; ii) todos os seus vizinhos a montante estão instáveis, iii) os seus vizinhos a jusante são considerados estáveis (isto é, n não foi notificado acerca de instabilidade pelos nós a jusante), ou não tem vizinhos a jusante.

Depois de se eleger como nó-fronteira a jusante (NFJ), o nó n deve calcular o seu horizonte de inundação (HI_n). Para esse fim, o nó n compara os últimos m caminhos para o nó-raiz recebidos dos membros da malha a montante de n e identifica o nó u mais próximo que aparece na maior parte destes caminhos (u é muito provavelmente um nó estável). Então, o nó n ajusta HI_n à distância entre n e u , que corresponde ao número de saltos no caminho até u . Note-se que existe sempre um nó estável u (no pior dos casos este nó é a raiz).

Depois de se eleger a si próprio como nó-fronteira a jusante e identificar o horizonte de inundação, o nó n notifica os nós a montante acerca da existência de instabilidade, tentando alcançar um nó-fronteira a montante (ou o nó-raiz, se não existir um membro da malha estável mais perto de n). Para esse fim NFJ inicia uma inundação localizada de um anúncio de instabilidade, com $TTL = FH_n$. Esta mensagem inclui os seguintes campos: o identificador do FNJ que gerou o anúncio e a distância em número de saltos do FNJ ao nó-raiz. Qualquer membro da malha j que recebe um anúncio de instabilidade identifica o seu estado como sendo um nó-fronteira a montante (NFM), se e só se, as seguintes condições se verificarem: i) j é um membro da malha; ii) os seus vizinhos a montante estão estáveis e; iii) a sua distância ao nó-raiz D_{jc} é menor do que D_{nc} . Neste caso, ele calcula o máximo de distâncias a todos os NFJs descobertos durante o último período de troca de anúncios, e armazena este valor como o seu horizonte de inundação (HI).

Os nós que estão situados a montante do NFJ e que recebem o anúncio de instabilidade mas não satisfazem as condições descritas acima simplesmente retransmitem a mensagem. Os nós mais distantes do nó-raiz do que o NFJ que originou o anúncio não o retransmitem.

Note-se que vários membros da malha podem identificar instabilidade ou receber múltiplos anúncios de instabilidade. Consequentemente, podem co-existir vários NFs na mesma região, o que não constitui um problema visto que o mecanismo de gestão de identificadores de mensagens em difusão evita a propagação de duplicados.

3) *Revogação de Nós-Fronteira*: Como a rede é dinâmica, é possível que regiões com muita mobilidade se estabilizem. Nesse caso, o encaminhamento nestas regiões tem de reverter para o baseado em malha. Logo, a designação de nós-fronteira não é definitiva.

Os nós-fronteira a jusante continuam a verificar a estabilidade em cada k anúncios e, se a condição de NFJ descrita acima não se mantiver, ou seja, se o nó-fronteira detectar vizinhos estáveis a montante, o NFJ passa a ser um membro regular da malha.

Por outro lado, a condição de nó-fronteira a montante é também temporária. Ou seja, se o NFM não tiver recebido um anúncio de instabilidade nos últimos k períodos, o nó assume que a rede a jusante estabilizou e revoga a sua condição de NFM, passando a ser um membro regular da malha.

4) *Encaminhamento de Dados*: O encaminhamento de dados é efectuado do seguinte modo:

- se o membro da malha não é um nó-fronteira, as men-

sagens em difusão são enviadas em modo de malha utilizando as regras do PUMA.

- se o NFJ_j recebe uma mensagem em modo de malha do nó a jusante, a mensagem é retransmitida em modo de inundação com um $TTL = HI_j$, cujo valor é calculado da forma acima descrita. O NFJ também indica a direcção da inundação. O nó NFM ao receber uma mensagem do nó a montante efectua a operação simétrica indicando o TTL e a direcção da inundação.
- se uma mensagem em inundação com $TTL \geq 0$ é recebida por um membro da malha, a mensagem é propagada em modo de malha enquanto o nó for considerado estável.
- os restantes nós na rede, ao receberem uma mensagem em modo de inundação com $TTL > 0$, verificam se se encontram na direcção correcta em relação ao nó-fronteira que iniciou a inundação. Se sim, a mensagem é reencaminhada de acordo com as regras do protocolo PAMPA e é decrementado o TTL da mensagem.
- em todas as outras situações, as mensagens não são reencaminhadas.

Independentemente do modo de encaminhamento, as mensagens só são reencaminhadas se forem recebidas pela primeira vez. Para o garantir, os nós mantêm uma lista de identificadores de mensagens previamente recebidas.

IV. AVALIAÇÃO

Para avaliar o protocolo proposto efectuámos um conjunto de testes que comparam o desempenho do HAMP com o desempenho do protocolo de difusão baseado em malha PUMA e com o protocolo de difusão não selectiva PAMPA. Os testes comparam a fiabilidade e eficiência dos três protocolos.

Apesar de o PUMA ser o mais eficiente em redes estáticas e o PAMPA ser o mais robusto em ambientes altamente móveis, queremos demonstrar que o HAMP consegue oferecer um bom compromisso entre a eficiência e fiabilidade em ambientes com padrões de mobilidade heterogéneos.

Para analisar o desempenho dos protocolos usámos as seguintes métricas de avaliação: taxa entre as mensagens entregues e o número de mensagens enviadas; número total de octetos (*bytes*) enviados por cada mensagem entregue; número de octetos de controlo enviados por cada mensagem entregue. Todos os testes foram realizados no simulador de rede NS-2.

A. Cenário e Parâmetros dos Testes

Para uma mais fácil análise do comportamento dos protocolos usámos cenários em forma de uma grelha uniforme. Para simular um cenário com mobilidade heterogénea, duas zonas sem mobilidade A e C são separadas por uma região do espaço B onde existe mobilidade. Um total de 100 nós foi posicionado na grelha: 45 destes nós foram posicionados em cada zona estável e 10 nós colocados na região móvel. Cada nó consegue comunicar só com os seus vizinhos imediatos. Os membros do grupo de difusão encontram-se posicionados na parte inferior da grelha. A Figura 1 descreve uma configuração para um grupo de 10 nós, representados na imagem a cinzento.

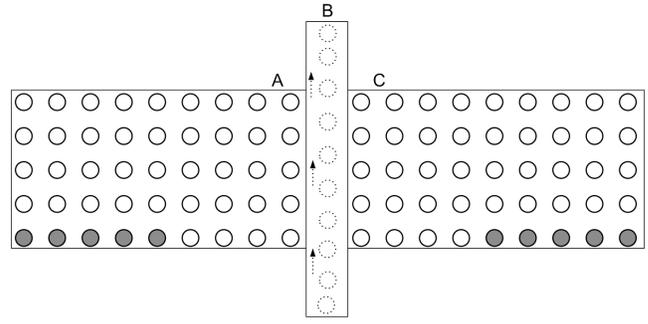


Figura 1: Grelha

O parâmetro k do protocolo HAMP foi fixado com o valor 2, o que significa que em cada 2 anúncios a estabilidade da rede é verificada. Nos testes, faz-se variar a dimensão do grupo de difusão e a velocidade dos nós na região com mobilidade.

O tamanho das mensagens de dados é de 512 octetos. A duração de cada experiência é de 300 segundos.

B. Resultados de Avaliação

Tabela I: Taxas de Entrega

# Nós		Velocidade						
		1 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	50m/s
2	HAMP	0.9778	0.9114	0.8868	0.8182	0.8082	0.7884	0.7248
	PAMPA	0.9860	0.9920	0.9920	0.9880	0.9940	0.9940	0.9940
	PUMA	0.9884	0.9320	0.8582	0.7790	0.7476	0.7148	0.6160
5	HAMP	0.9695	0.9239	0.8778	0.7477	0.7994	0.7946	0.6943
	PAMPA	0.9776	0.9872	0.9872	0.9808	0.9904	0.9904	0.9904
	PUMA	0.9860	0.9285	0.8466	0.7377	0.6982	0.6562	0.5390
10	HAMP	0.9709	0.9397	0.9540	0.9178	0.8820	0.8676	0.8384
	PAMPA	0.9820	0.9910	0.9820	0.9640	0.9820	0.9730	1.0000
	PUMA	0.9826	0.9391	0.8840	0.7820	0.7502	0.7085	0.6230
20	HAMP	0.9715	0.9490	0.9544	0.9403	0.9274	0.9325	0.9091
	PAMPA	0.9810	0.9905	0.9810	0.9620	0.9810	0.9715	1.0000
	PUMA	0.9709	0.9517	0.8940	0.8311	0.8025	0.7486	0.6247
40	HAMP	0.9870	0.9822	0.9850	0.9781	0.9680	0.9604	0.9555
	PAMPA	0.9805	0.9902	0.9805	0.9610	0.9805	0.9708	1.0000
	PUMA	0.9814	0.9765	0.9648	0.9502	0.9329	0.8757	0.8348

A Tabela I demonstra que o PAMPA, como era esperado, consegue taxas de entrega perto dos 100%. No entanto, como veremos adiante, o custo do protocolo é muito superior ao das soluções estruturadas.

Por outro lado, o HAMP, de modo geral, adapta-se melhor à mobilidade do que o PUMA. Note-se que, como nem sempre existe um nó na região móvel dentro do alcance dos nós estáticos, as taxas de entrega são inferiores para os testes com poucos nós no grupo, e consequentemente, com uma malha mais fina. Na verdade, nos testes com 2, 5 e 10 membros do grupo, a malha é constituída por uma única fila de nós. Nos cenários com mais membros no grupo e, consequentemente, uma malha mais grossa, as taxas de entrega do HAMP melhoram significativamente. Por exemplo, para grupos com 20 membros, e para velocidades entre 25 m/s e 50 m/s, a taxa de entrega do HAMP é 20% a 40% superior ao do PUMA.

Tabela II: Octetos de Controlo Por Cada Mensagem Entregue

# Nós		Velocidade						
		1 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	50m/s
2	HAMP	5011	5802	6192	6623	6631	7002	7562
	PUMA	3601	3866	4305	4625	4834	5077	5852
5	HAMP	2041	2330	2556	3111	2727	2915	3333
	PUMA	1460	1565	1728	1975	2093	2224	2699
10	HAMP	2583	2937	2959	3258	3187	3311	3414
	PUMA	1835	1942	2073	2324	2468	2592	2966
20	HAMP	1331	1562	1552	1720	1593	1609	1718
	PUMA	944	992	1058	1156	1197	1364	1630
40	HAMP	673	783	791	751	710	747	882
	PUMA	461	468	485	493	499	551	640

Como se pode observar pelos valores apresentados na Tabela II o custo de sinalização no HAMP é superior ao do PUMA. Isso deve-se à existência de informação adicional transmitida em anúncios do HAMP. Este custo adicional de sinalização, necessário para obter uma maior fiabilidade, é aproximadamente de 40%. Note-se no entanto, que o PUMA é um protocolo com um custo de sinalização bastante baixo, pelo que o custo de sinalização adicional do HAMP, em valor absoluto, é relativamente pequeno. Para além disso, como os resultados anteriores mostram, este custo é diluído pela maior taxa de entrega proporcionada pelo protocolo.

Tabela III: Octetos Enviados Por Cada Mensagem Entregue

# Nós		Velocidade						
		1 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	50m/s
2	HAMP	36073	42573	46663	47350	46628	46436	51815
	PAMPA	240551	245458	248814	249215	248477	249123	249758
	PUMA	52657	53300	54054	51313	51732	49643	49165
5	HAMP	15427	18579	20767	23205	19947	20453	23029
	PAMPA	97047	98660	100009	100418	99752	100011	100266
	PUMA	21174	21820	22014	21929	22486	21631	22593
10	HAMP	9244	12441	13180	13432	13519	12868	13810
	PAMPA	48400	49432	50051	50246	49896	50122	50281
	PUMA	11723	11959	11827	11857	12265	11518	11569
20	HAMP	7520	9093	9057	10580	9065	9387	9144
	PAMPA	24224	24728	25051	25175	24973	25100	25140
	PUMA	9463	9326	9256	9460	9695	9730	10191
40	HAMP	5602	5671	6105	6015	5625	5888	6095
	PAMPA	12118	12367	12531	12600	12493	12559	12570
	PUMA	7194	7165	7210	7132	7180	7196	7235

O custo total da operação dos protocolos é apresentado na Tabela III. Naturalmente, o PAMPA, sendo um protocolo baseado em inundação, gera muito mais tráfego de mensagens do que as alternativas estruturadas. Como tal, o custo de entrega de uma mensagem em difusão é muito superior ao custo das soluções em malha, como o HAMP e o PUMA. Também é interessante observar que, no HAMP, graças às taxas de entrega bastante superiores, o custo por cada mensagem entregue não é significativamente superior ao do PUMA. Por outras palavras, apesar de um maior custo de sinalização, o HAMP consegue entregar muito mais mensagens aos destinatários, o que torna a relação entre a taxa de entrega e o custo de entregar uma mensagem em difusão mais favorável no caso do HAMP.

V. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Muitas das redes ad hoc do futuro irão exibir padrões de movimento heterogêneos. Este artigo propõe o HAMP, uma nova abordagem que combina encaminhamento estruturado e não estruturado para atingir um compromisso favorável de taxas de entrega em relação aos recursos consumidos, para redes com padrões de mobilidade heterogêneos. As zonas instáveis são dinamicamente identificadas e atravessadas recorrendo a inundação localizada, a qual permanece confinada a essas áreas. O HAMP foi concretizado como uma combinação do protocolo em malha PUMA e do PAMPA como uma forma de inundação localizada para atravessar zonas de instabilidade. Contudo, as ideias-chave da solução podem ser aplicadas a outros algoritmos de encaminhamento. Como trabalho futuro pensamos expandir a abordagem de modo a acomodar outros algoritmos de difusão em grupo, tanto para regiões estáveis como instáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] Tony Ballardie, Paul Francis, and Jon Crowcroft. Core based trees (cbt). *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 23(4):85–95, 1993.
- [2] Subir Kumar Das, B. S. B. S. Manoj, and C. Siva Ram Murthy. A dynamic core based multicast routing protocol for ad hoc wireless networks. In *MobiHoc '02: Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 24–35, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [3] Khalid A. Farhan. Network sender multicast routing protocol. In *ICN '08: Proceedings of the Seventh International Conference on Networking (icn 2008)*, pages 60–65, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [4] C. Jaikao and Chien-Chung Shen. Adaptive backbone-based multicast for ad hoc networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 3149–3155, 2002.
- [5] Lusheng Ji and M. S. Corson. Differential destination multicast: A manet multicast routing protocol for small groups. In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 2, pages 1192–1201 vol.2, 2001.
- [6] Sung ju Lee, William Su, and Mario Gerla. On-demand multicast routing protocol. *Wireless Communications and Networking Conference*, 1999.
- [7] Thomas Kunz and Ed Cheng. On-demand multicasting in ad-hoc networks: Comparing AODV and ODMRP. In *Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems*, Vienna, Austria, July 2002.
- [8] H. Miranda, S. Leggio, L. Rodrigues, and K. Raatikainen. Power-aware broadcasting algorithm. In *Proceedings of the 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 1–5, Helsinki, Finland, September 2006. IEEE.
- [9] Sze-Yao Ni, Yu-Chee Tseng, Yuh-Shyan Chen, and Jang-Ping Sheu. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. In *MobiCom '99: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 151–162, Seattle, Washington, United States, 1999. ACM.
- [10] Elizabeth M. Royer and Charles E. Perkins. Multicast operation of the ad-hoc on-demand distance vector routing protocol. In *MobiCom '99: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 207–218, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [11] R. Vaishampayan and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Efficient and robust multicast routing in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, pages 304–313, 2004.
- [12] C. W. Wu and Y. C. Tay. Amris: A multicast protocol for ad hoc wireless networks. pages 25–29. MILCOM, 1999.
- [13] Jason Xie, Rajesh R. Talpade, Anthony Mcauley, and Mingyan Liu. Amroute: ad hoc multicast routing protocol. *Mob. Netw. Appl.*, 7(6):429–439, 2002.