

Multicast sobre o Protocolo Prophet em Redes Tolerantes a Atrasos

José Santiago, Paulo Rogério Pereira e Augusto Casaca

Resumo—As redes com partições frequentes e longas impedem que os protocolos comuns da Internet funcionem com sucesso. Para os protocolos funcionarem adequadamente nestas Redes Tolerantes a Atrasos/Disrupções (RTAs), foi proposta uma nova camada de protocolo, que actua por cima da camada de transporte, para a troca de mensagens (chamadas *bundles*) extremo a extremo, tirando partido da conectividade programada, prevista, oportunista ou permanente. Neste artigo propõe-se e avalia-se uma extensão multicast ao protocolo unicast PROPHET para RTA. O PROPHET encaminha pacotes com base em estimativas da probabilidade de os nós se encontrarem. Foi implementada uma heurística, para construir uma pseudo-árvore multicast, que usa as estimativas das probabilidades de os nós se encontrarem e informação de mobilidade. Apenas um byte é utilizado para transferir informação de mobilidade entre os nós, o que é suficiente para dar uma boa indicação sobre a região onde os nós móveis estão. Mostra-se por simulação que, se o número de contactos entre os nós estiver acima de um limiar mínimo, a pseudo-árvore multicast existe, o multicast funciona eficientemente, minimizando as replicações de mensagens.

Palavras Chave — Redes Tolerantes a Atrasos/Disrupções, Disrupção das Ligações, Protocolos Multicast.

I. INTRODUÇÃO

REDES Tolerantes a Atrasos (RTAs) são redes que podem experimentar partições longas e frequentes. Isto ocorre em situações em que não existe qualquer infraestrutura estável que garanta conectividade permanente. Exemplos destas situações são: comunicações militares em campos de batalha, comunicações espaciais, redes ad hoc entre veículos e em acções de salvamento em áreas atingidas por catástrofes.

Os protocolos da Internet não são úteis para RTA porque as falhas das ligações não são tratadas adequadamente, causando a expiração de temporizadores e o abortar dos protocolos. O Delay Tolerant Networks Research Group (DTNRG), que faz parte do Internet Research Task Force (IRTF), propôs uma arquitectura [1] e um protocolo de comunicação [2] (o Protocolo Bundle) para RTAs.

Em RTAs, é acrescentada uma camada “Bundle” orientada a mensagens por cima da camada de transporte (ou outras) das redes que interliga. As unidades de dados das aplicações são transformadas pela camada “Bundle” em uma ou mais unidades de dados do protocolo chamadas

“bundles”, que são encaminhadas pelos nós das RTAs pelo protocolo Bundle. Para ajudar em decisões de encaminhamento e escalonamento, as bundles contêm uma marca temporal de origem, um indicador de vida útil, um indicador de classe de serviço e um indicador de dimensão. O protocolo Bundle inclui a transferência de responsabilidade de entrega fiável salto a salto, chamada transferência de custódia das bundles, e uma confirmação extremo a extremo opcional. Pode ser utilizado armazenamento persistente nos nós para ajudar a combater os efeitos das interrupções da rede.

O protocolo Bundle não inclui um protocolo de encaminhamento das bundles, nem mecanismos para preencher as tabelas de encaminhamento dos nós das RTAs. Estas funções foram deixadas para extensões do protocolo ou para outros protocolos. Um dos protocolos de encaminhamento importantes em RTAs é o encaminhamento epidémico [3], que funciona inundado a rede com as mensagens. Embora providencie uma boa solução para RTAs no que diz respeito a taxa de entregas e latência, causa um grande desperdício de recursos.

O protocolo PROPHET (Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity) [4] é um protocolo de comunicação unicast para RTAs. O protocolo PROPHET (PP) usa o historial de encontros entre nós e transitividade para estimar a probabilidade de os nós se encontrarem e explora a mobilidade de alguns nós para levar as mensagens até mais perto dos seus destinos. O PP é uma alternativa ao encaminhamento epidémico, com menos necessidade de espaço de armazenamento e ritmo de transmissão, para o mesmo ou melhor desempenho nos casos em que aqueles recursos são limitados, e que pode ser utilizado para os mesmos cenários.

As comunicações multicast são utilizadas quando se pretende enviar dados eficientemente de forma simultânea para um grupo de destinos, criando cópias dos dados não na fonte, mas apenas à medida do necessário, consoante os caminhos para os destinos. Em [5] são definidas extensões ao protocolo Bundle para suporte de multicast. Não estão ainda definidas estratégias de encaminhamento multicast, mas apenas os mecanismos básicos de suporte ao multicast. Uma panorâmica de modelos multicast para RTAs é apresentada em [6], mas não é proposto nenhum protocolo específico.

Neste artigo, apresenta-se o multicast sobre o protocolo PROPHET (MPP) como uma extensão ao PP para multicast sem custódias. Sem custódias significa que o protocolo faz o seu melhor esforço para entregar as mensagens, sem que nenhum nó assuma a custódia pela transmissão das bundles,

Manuscrito recebido em 27/5/2009, revisto em 22/9/2009.

J. Santiago, P. Pereira e A. Casaca pertencem ao INESC-ID, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Rua Alves Redol, nº 9, Lisboa, Portugal (telefone: +351-213100233; fax: +351-213145843; e mails: {jose.santiago, paulo.pereira, augusto.casaca}@inesc.pt)

pelo que não é tomada nenhuma acção especial para assegurar o sucesso. Em [7] são propostas várias extensões ao protocolo Bundle para tratar da transferência de custódia que podem ser adicionadas também aos protocolos multicast para RTAs.

O modelo probabilístico do PP, para estimar a probabilidade de contacto dos nós, foi mantido no MPP. Foi adicionado um mecanismo de pseudo-árvore multicast para gerir os grupos multicast. No MPP foi introduzida uma heurística para construção da pseudo-árvore multicast baseada nas probabilidades estimadas de contacto entre nós e em indicações da localização e direcção de movimento dos nós [8].

Mostra-se que as RTAs podem beneficiar com as comunicações multicast se alguns requisitos forem respeitados. Demonstra-se que, se houver um número mínimo de contactos entre os nós, a pseudo-árvore multicast existe e o multicast funciona eficientemente, minimizando o número de replicações de mensagens na rede.

A secção II do artigo resume os aspectos principais do encaminhamento probabilístico do PP. A secção III descreve a extensão multicast. A secção IV é dedicada a resultados de simulação. Finalmente, a secção V apresenta as conclusões e tópicos para trabalho futuro.

II. O MODELO PROBABILÍSTICO DO PROTOCOLO PROPHET

O PP utiliza o conceito de encaminhamento probabilístico em vez de encaminhamento epidémico, explorando a previsibilidade de contactos oportunistas entre nós para a disseminação das mensagens. No PP, o cálculo da probabilidade de entrega é feito em três partes, conforme as equações abaixo. $P(x,y)$ é a probabilidade de contacto ou de entrega do nó x para o nó y , que é utilizada como métrica para o encaminhamento.

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)_{old}} + (1 - P_{(a,b)_{old}}) \times P_{init}; \quad 0 \leq P_{init} \leq 1. \quad (1)$$

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)_{old}} \times \gamma^k; \quad 0 \leq \gamma < 1. \quad (2)$$

$$P_{(a,c)} = P_{(a,c)_{old}} + (1 - P_{(a,c)_{old}}) \times P_{(a,b)} \times P_{(b,c)} \times \beta; \quad 0 \leq \beta \leq 1. \quad (3)$$

A equação (1) destina-se à actualização da probabilidade sempre que dois nós se encontram: aumenta $P_{(a,b)}$ sempre que se encontram, pois nós que contactam frequentemente têm uma maior probabilidade de trocar mensagens. $P_{(a,b)_{old}}$ é o último cálculo no nó “a”. P_{init} é uma constante de inicialização que controla o ritmo de aumento da probabilidade.

A equação (2) baixa a probabilidade $P_{(a,b)}$ à medida que o tempo passa, sendo utilizada sempre que as tabelas são actualizadas. Se os contactos são raros, a probabilidade deve ser reduzida para o reflectir. γ é uma constante de envelhecimento. k é o número de unidades de tempo decorridas desde a última vez que a métrica foi actualizada.

A equação (3) expressa a transitividade, pois as mensagens podem ir de “a” para “c” directamente ou via “b”. Se “b” se encontra frequentemente com “c”, então “b” é provavelmente um bom nó para onde encaminhar mensagens para “c”. β é uma constante de escala que modela o impacto que a transitividade deve ter na previsibilidade de entrega.

Este modelo probabilístico foi mantido no MPP.

III. MULTICAST SOBRE O PROTOCOLO PROPHET

O MPP acrescenta capacidade de entrega de mensagens multicast ao PP. O MPP introduz o uso de informação de mobilidade, que é um ponto inovador em comparação com o PP. Isto significa que o MPP pode usar a informação da posição dos nós e da direcção do seu movimento para além da estimativa da probabilidade de contacto do PP.

A. Mecanismo de Informação de Mobilidade

Os nós que contactam entre si precisam de trocar a seguinte informação de controlo:

- Probabilidade de contacto dos nós que se movem na mesma área;
- A sua posição geográfica e a posição geográfica dos nós que contactaram;
- A direcção do seu movimento e a direcção de movimento dos nós que contactaram.

Esta informação adicional, das duas últimas alíneas, pode ser transportada em apenas um byte. A convenção utilizada é: os dois bits mais significativos levam a informação da direcção; os três bits seguintes levam a coordenada x ; e os últimos três bits levam a coordenada y .

A direcção de movimento de um nó é aproximada pelo quadrante para o qual o nó se dirige (identificado com um número entre 0 e 3). Se o nó estiver parado ou a mover-se na fronteira entre quadrantes, então pode ser reportado qualquer dos quadrantes envolvidos. Naturalmente, a direcção pode mudar, mas isto não é conhecido à partida. A informação de mobilidade é complementada com as coordenadas aproximadas da posição (relativas à área total) no momento em que há contacto.

Com este método, a posição e direcção dos nós passadas a um nó par não são muito precisas. Contudo, para a maioria das situações, é suficiente para o sistema ser eficiente. Na realidade, os nós podem estar sempre a mover-se e as comunicações são difíceis. A sua posição actual não pode ser propagada instantaneamente para toda a rede. Por isso, esta informação pode ficar obsoleta muito rapidamente, pelo que não é importante a precisão. De facto, o sistema será mais eficiente se consumir menos recursos e contudo der boas pistas sobre a região onde os nós se encontram. Por outro lado, a menos que os nós tenham GPS (Global Positioning System), podem apenas saber a região onde se encontram identificando algum ponto de acesso à rede, na vizinhança, ou obtendo a posição de nós adjacentes.

B. Informação Trocada Durante o Contacto dos Nós

Quando os nós estabelecem contacto, trocam dois tipos de informação: informação de encaminhamento e dados.

Todos os mecanismos relacionados com encaminhamento unicast do PP foram mantidos na extensão multicast. Depois de os nós estabelecerem contacto e trocarem mensagens Hello, trocam o dicionário de informação de encaminhamento, que inclui a lista de endereços utilizada para decisões de encaminhamento para todos os destinos conhecidos. Os nós também trocam as suas bases de dados de encaminhamento (BDE), onde as probabilidades de encaminhamento são guardadas. A informação de mobilidade do MPP foi inserida nas mensagens Hello para os nós directamente em contacto e na BDE para os outros nós. Depois destas trocas de mensagens, os nós enviam uma

mensagem de oferta com a lista de bundles que têm. Segue-se a espera pela mensagem de pedido, a que respondem com as bundles pedidas.

C. Pseudo-árvore Multicast

No multicast tradicional, é criada uma árvore multicast bem definida sempre que um grupo interessado em comunicar está activo. Esta árvore liga todos os membros do grupo multicast a um ponto na rede. Este ponto pode ser a fonte ou outro ponto chamado ponto rendezvous (PR). No primeiro caso, a árvore é dita baseada na fonte e no segundo caso é dita partilhada.

Para RTAs, tais árvores não podem ser criadas de forma permanente. As ligações entre nós podem ter durações muito curtas, de tal maneira que não é expectável que haja um caminho desde a fonte (ou PR) para um, ou mais, destinos através de um número considerável de nós. Como consequência, em RTAs, o conceito de árvore multicast é mais lato. Esta pseudo-árvore multicast será composta pela fonte (ou PR) e um conjunto de destinos com um conjunto de nós intermédios (mulas) entre eles. As mulas recebem os pacotes das fontes, PR, ou doutras mulas e encaminham-nos para os seus destinos.

Quando um nó pretende juntar-se a um grupo multicast, utiliza o melhor dos seus vizinhos para contactar o grupo. A escolha é feita por uma heurística baseada nas condições dos vizinhos tal como se mostra na tabela 1. Cada condição é avaliada com base na informação disponível no momento. Adiciona-se o peso de cada condição verdadeira. É ainda adicionado um bónus variando entre 15 e 0, consoante a idade da informação desse vizinho particular. O bónus 0 é para informação com mais de 4 minutos. É seleccionado o vizinho que soma um total mais alto. Os pesos foram escolhidos de forma a valorizar ligações tão directas quanto possível com a fonte. Esta é a razão por que os maiores pesos são para uma ligação directa à fonte multicast (30) ou a um vizinho que já contribui para o funcionamento da árvore multicast (14). O terceiro peso (10) é para um vizinho que pode contactar a fonte multicast com elevada probabilidade. O quarto peso (6) é para distinguir do caso em que esta probabilidade é zero. As restantes condições são para dar preferência a bons contactos com vizinhos, a vizinhos perto da fonte, a vizinhos movendo-se perto da fonte ou a vizinhos que podem contactar algum membro do grupo multicast. Estes pesos foram escolhidos intuitivamente e demonstraram produzir bons resultados. O estudo de outros parâmetros ou heurísticas foi deixado para trabalho futuro.

TABELA 1.

Critérios para selecção de um vizinho para inclusão na árvore multicast

Peso	Condição do nó vizinho
30	é a fonte do grupo multicast
14	é um membro do grupo, ou já é uma mula
10	pode contactar a fonte com $P_{(par,fonte)} \geq 0.7$
6	pode contactar a fonte com $0 < P_{(par,fonte)} < 0.7$
4	pode ser contactado com $P_{(par,nó)} \geq 0.7$
3	está a uma distância da fonte inferior a δ
2	move-se para a fonte, ou o vizinho e a fonte vão na mesma direcção
1	tem contacto com o grupo multicast em causa

Com a adição da informação de localização à informação de encaminhamento trocada, os nós têm uma probabilidade razoável de saber onde está a fonte multicast. Isto ajuda a reduzir o tamanho da pseudo-árvore multicast e optimiza os caminhos tomados pelas mensagens.

Se ainda houver mensagens para transmissão quando a ligação ao grupo falha, o membro do grupo procura na sua lista de vizinhos o melhor nó que pode oferecer o serviço, de acordo com a heurística.

Os mecanismos de pertença ao grupo do MPP foram descritos em [9]. Algumas mensagens de controlo para gerir dinamicamente grupos multicast foram adicionadas ao protocolo Bundle [2]. Há temporizadores para controlar os mecanismos e libertar recursos quando a comunicação já não for possível. Se, por exemplo, a fonte multicast parar de transmitir por algum tempo, a árvore multicast é destruída após algum tempo e uma nova será construída quando a fonte retomar a transmissão.

D. Estratégias de Encaminhamento

Com a introdução de tráfego multicast, as bundles multicast e unicast são armazenadas em filas de espera FIFO separadas. Várias estratégias são possíveis para controlar a ordem porque as bundles multicast e unicast são oferecidas:

MBFI (Multicast Bundles First) – as bundles multicast são oferecidas pela ordem em que estão na fila de espera e precedem as bundles unicast;

MBAF (Multicast Bundles After) – as bundles multicast são oferecidas pela ordem em que estão na fila de espera e após as bundles unicast;

OLDERST (Older Stamp) – as bundles multicast são ordenadas pela marca temporal, de maneira a que as mais antigas sejam oferecidas primeiro; as bundles multicast e unicast são oferecidas alternadamente.

LESSD (Less Delivered) – as bundles multicast são ordenadas de acordo com o número de vezes entregues, de maneira a que as menos entregues sejam oferecidas primeiro; as bundles multicast e unicast são oferecidas alternadamente.

As bundles multicast são oferecidas apenas aos membros da pseudo-árvore multicast. As bundles são rejeitadas se, e só se, já tiverem sido recebidas anteriormente.

As bundles unicast são oferecidas de acordo com uma das seguintes estratégias, onde A e B são os nós que se encontram em contacto, D é o nó de destino, e as estratégias são descritas tal como são aplicadas no nó A:

Epidémica – as bundles são entregues sem restrições a todos os nós em contacto que as aceitem.

GRTR (Greater Than Reverse) – encaminha a bundle apenas se $P(B,D) > P(A,D)$. Quando dois nós se encontram, as bundles são enviadas para o outro nó se, e só se, a probabilidade de entrega da bundle ao destino é maior no outro nó. O primeiro nó não apaga a bundle depois de a enviar, desde que haja espaço de armazenamento suficiente (visto que pode vir a encontrar um nó melhor, ou mesmo o destinatário da bundle).

GRTRsort – selecciona as bundles pela ordem decrescente do valor $P(B,D) - P(A,D)$. Encaminha as bundles apenas se $P(B,D) > P(A,D)$. Esta estratégia é semelhante à

GRTR, mas em vez de percorrer a fila de espera por ordem, esta estratégia olha para a diferença entre probabilidades de entrega nos dois nós e encaminha as bundles com maior diferença em primeiro lugar. Como as limitações de ritmo de transmissão ou as disruptões das ligações podem impedir que todas as bundles possam ser trocadas, pode ser melhor enviar primeiro as bundles que obtêm um maior ganho na probabilidade de entrega.

Algumas destas estratégias de encaminhamento serão utilizadas e avaliadas nas simulações da próxima secção.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os dois cenários utilizados na avaliação do PP [10] foram reproduzidos. O primeiro cenário foi gerado com o modelo de mobilidade de pontos intermédios aleatórios (Random Waypoint) [11]. Neste cenário, o movimento de cada nó começa pela selecção aleatória de um novo destino e velocidade. Quando o nó chega à nova posição, pára por um tempo aleatório. Depois repete o procedimento para um novo movimento. O segundo cenário é baseado no modelo de comunidades. Neste cenário, a área geográfica está dividida em 12 subáreas. Cada nó tem uma subárea de residência e há também uma subárea “ponto de encontro” comum a todos os nós. Os nós têm uma elevada probabilidade de se moverem entre a sua subárea de residência e o “ponto de encontro”.

As simulações foram feitas no simulador ProphetSim [12], cuja implementação é baseada no OMNeT++, versão 3.2p1, e utiliza a Mobility Framework, versão 1.0a6.

Nos gráficos apresentados, cada ponto representa a média de cinco simulações com o intervalo de confiança a 95%. A mesma simulação foi utilizada para gerar os dados multicast, multidest e unicast, de forma a permitir a comparação. As políticas de encaminhamento escolhidas são a GRTRsort e a MBAF (Multicast Bundles After). A Fig. 1 mostra a taxa de bundles entregues como a fracção das mensagens enviadas que são recebidas. Se a mensagem não for entregue a todos os membros do grupo até ao fim da simulação, conta para a taxa de bundles entregues com um valor igual à fracção dos membros do grupo que receberam a mensagem. Os resultados para unicast e multidest são semelhantes, o que é natural, pois multidest corresponde a múltiplas transmissões unicast, uma para cada membro do grupo.

A Fig. 2 mostra o atraso médio para as bundles entregues ao destino com sucesso, no tempo de simulação.

A Fig. 3 mostra o número de nós pertencentes à árvore multicast num instante inicial aleatório (186s), e com um período aleatório (800s). Este número inclui os membros do grupo multicast (a fonte e os 8 destinos), bem como os nós mulas que cooperam na transmissão de mensagens.

A. Análise com base no Alcance de Propagação Rádio

À medida que o alcance de propagação do sinal rádio aumenta, a qualidade dos contactos entre nós e a sua duração melhora, pelo que a taxa de entregas melhora, enquanto o atraso médio baixa. Os valores exactos dependem das características particulares do cenário.

Para o multicast, os resultados mostrados nas Fig. 1 e Fig. 2 podem ser divididos em três zonas, de acordo com o alcance rádio:

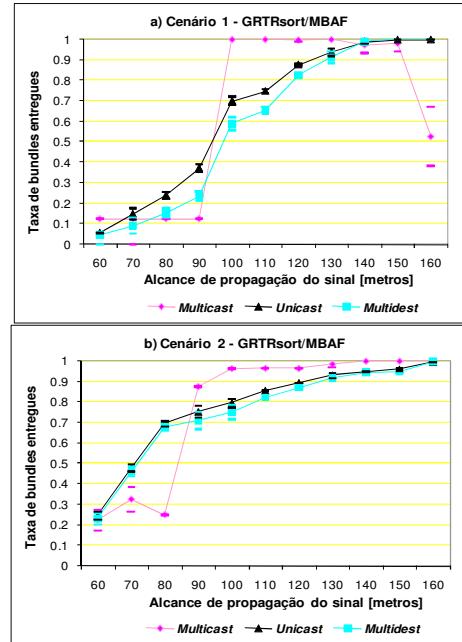


Fig. 1. Taxa de bundles entregues para: a) Cenário 1; b) Cenário 2.

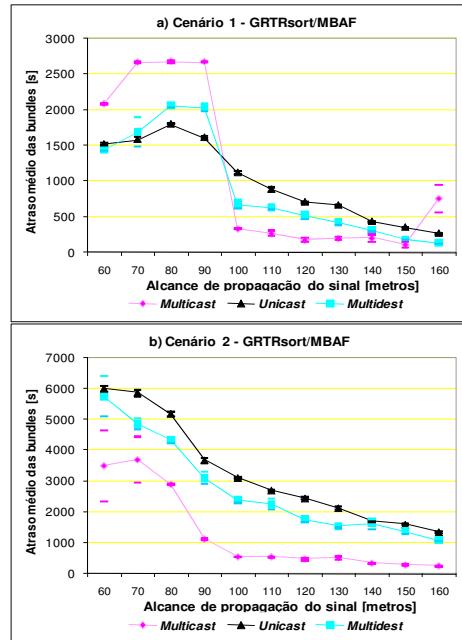


Fig. 2. Atraso médio das bundles para: a) Cenário 1; b) Cenário 2.

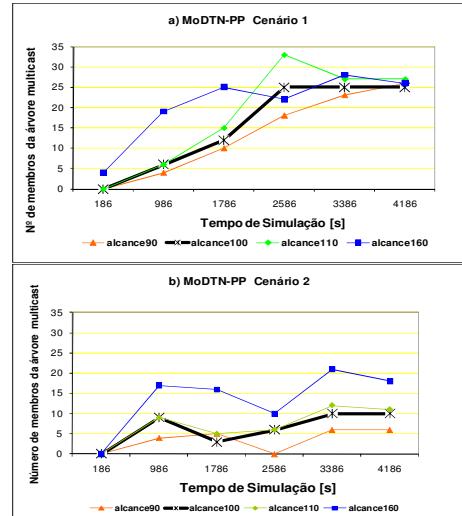


Fig. 3. Número de membros da árvore multicast para: a) Cenário 1; b) Cenário 2.

1. De 60m a 90m: o unicast funciona mal e o multicast funciona pior. Isto é causado por os contactos entre nós serem pouco frequentes e a sua qualidade ser má. Tal pode ser melhor observado na Fig. 1-a) para alcances rádio abaixo de 100 m, onde o desempenho multicast baixa rapidamente para um valor muito baixo. Nestas condições, a árvore multicast e as operações multicast quase não têm oportunidade de funcionar.

2. De 100m a 150m: tanto o unicast como o multicast funcionam bem. O multicast apresenta melhores resultados para o atraso médio das bundles. Para esta gama de alcances, o número de contactos e a sua qualidade é boa em ambos os modos. Na realidade, o aumento do alcance rádio aumenta a duração dos contactos entre nós, pelo que a situação é melhor que no caso precedente.

3. 160m: ao contrário do esperado, o desempenho multicast declina no cenário 1. De facto, como na política de encaminhamento MBAF as bundles unicast são oferecidas antes das multicast, o número de bundles unicast é maior que as bundles multicast e como as bundles unicast não têm limite de replicação, o número de cópias de bundles unicast na rede torna-se demasiado grande, restringindo as bundles multicast. A qualidade da comunicação é, em média, a mesma que antes, mas não é suficiente para o multicast. O grande tráfego unicast chega até a causar perturbações na árvore multicast. Isto pode ser observado no ponto 2586 s da Fig. 3-a), onde os resultados para o alcance de 160 m são piores que para alcances mais curtos. Isto sugere que seja implementado um mecanismo de escalonamento diferente, que partilhe melhor os recursos entre o unicast e o multicast.

B. Análise das Estratégias de Encaminhamento

Foram testadas outras estratégias de encaminhamento. As Fig. 4 e Fig. 5 mostram a taxa de entregas e atraso médio para a estratégia de encaminhamento LESSD. Com esta estratégia, a taxa de entregas para multicast melhora 0.5% em média, enquanto o atraso médio decresce cerca de 0.5% para a gama de operação (alcances de 100 m e superiores). Contudo, o custo é uma degradação significativa das taxas de entregas (cerca de 20%) e do atraso médio (cerca de 30%) para unicast e multidest.

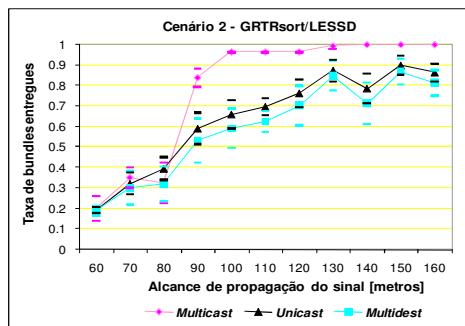


Fig. 4. Taxa de bundles entregues utilizando LESSD para o Cenário 2.

As Fig. 6 e Fig. 7 mostram a taxa de entregas e atraso médio quando a estratégia de encaminhamento epidémico é utilizada para unicast. Comparando esta situação com as Fig. 1 e Fig. 2, conclui-se que o encaminhamento epidémico reduz o atraso para o tráfego unicast, mas também reduz a taxa de entregas para as situações usuais. Como o encaminhamento epidémico maximiza as replicações de

mensagens, também minimiza os seus tempos de entrega. No entanto, com mais mensagens em circulação, e como o armazenamento é limitado, a taxa de entregas é reduzida, pois circulam mais cópias das mesmas mensagens. Uma excepção verifica-se nos alcances rádio curtos, onde o reduzido número de contactos entre nós é beneficiado com o encaminhamento epidémico.

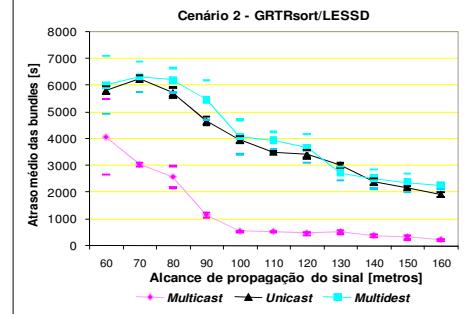


Fig. 5. Atraso médio das bundles utilizando LESSD para o Cenário 2.

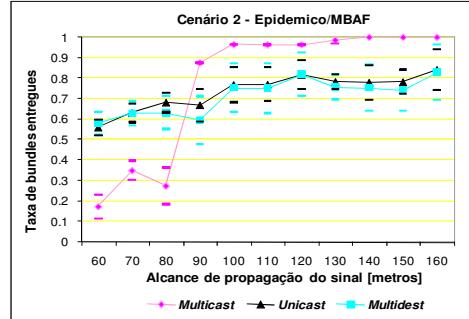


Fig. 6. Taxa de bundles entregues utilizando Epidémico para o Cenário 2.

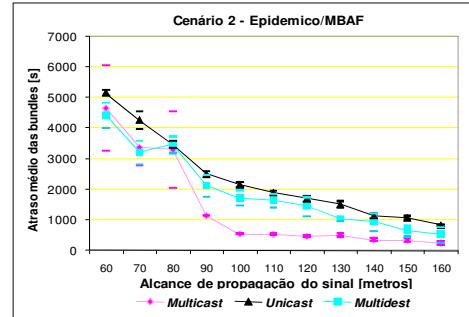


Fig. 7. Atraso médio das bundles utilizando Epidémico para o Cenário 2.

Como o tráfego multicast utiliza a sua própria estratégia de encaminhamento, não é muito afectado. Na realidade, parece beneficiar algo da redução da taxa de entregas do tráfego unicast. Novamente, a excepção observa-se nos alcances rádio curtos no Cenário 2, onde o maior sucesso do unicast degrada o desempenho do multicast.

C. Análise de Carga

As Fig. 8 e Fig. 9 mostram o efeito de aumentar o número de mensagens geradas para o dobro, tanto para o multidest como para o multicast. Comparando esta situação com as Fig. 1 e Fig. 2, conclui-se que o aumento da carga resulta numa redução da taxa de entregas para o tráfego unicast (cerca de 18%), com apenas diferenças menores no atraso. O multicast apresenta apenas um ligeiro aumento no atraso (cerca de 5%) para o Cenário 2 e modificações menores nos restantes casos.

D. Avaliação

Os resultados de simulação confirmam que o uso do modo multicast em RTAs é vantajoso. Além disso, pensa-se que o Cenário 2 é mais realista que o Cenário 1. Adequa-se melhor às actividades da comunidade humana, sendo aqui que o multicast traz melhor qualidade de serviço. Ao atingir um número de contactos suficientes com qualidade, a taxa de bundles entregues é a melhor no multicast.

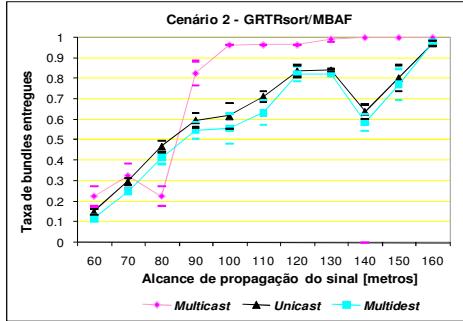


Fig. 8. Taxa de bundles entregues com aumento da carga para o Cenário 2.

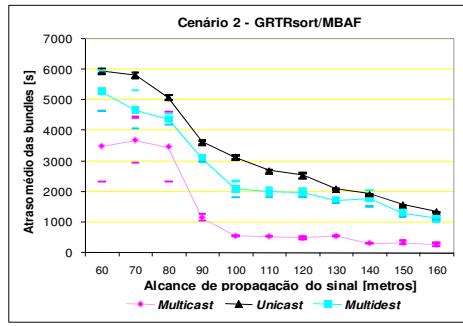


Fig. 9. Atraso médio das bundles com aumento da carga para o Cenário 2.

O atraso médio das bundles no multicast é mesmo melhor que para o unicast, como pode ser observado na maioria das figuras para a gama de distâncias operacional. Isto pode ser explicado pelo uso de informação de mobilidade para o encaminhamento multicast, enquanto o encaminhamento unicast apenas utiliza as probabilidades de contacto. A informação de mobilidade permite que a pseudo-árvore multicast tenha ligações mais directas, optimizando os caminhos e reduzindo o atraso.

As figuras apresentadas ilustram que as árvores multicast funcionam em RTAs se as condições necessárias existirem: contactos valiosos entre nós, com duração suficiente para a comunicação. A Fig. 3 mostra que a efectividade da árvore multicast não é proporcional ao número de nós presentes na árvore. De facto, o modo multicast tem melhor desempenho no Cenário 2, apesar de haver um maior número de membros da árvore multicast no Cenário 1. Isto acontece porque outro factor afecta os resultados: a posição geográfica ocupada por alguns nós membros é crucial. Um exemplo paradigmático é um nó posicionado num ponto estratégico, por onde muitos nós passam em múltiplas direcções. Este ponto representa um lugar privilegiado onde as mulas trocam mensagens.

V. CONCLUSÃO

Nas RTAs, os canais de comunicação podem falhar repetidamente. Podem fazê-lo, até, por longos períodos. Nestas condições, poderia não parecer realista tentar utilizar árvores multicast para entregar mensagens. Contudo, para

provar que é realmente possível, estendeu-se o PP com um modo multicast, adicionando indicações da posição e direcção de movimento dos nós de forma a ajudar a construção de pseudo-árvores multicast.

O trabalho aqui apresentado prova que o modo multicast pode ser utilizado se houver um mínimo de contactos entre nós. As estratégias de encaminhamento GRTRsort/MBAF foram as que deram melhores resultados. Verificou-se que a informação de posição e direcção é uma boa métrica de encaminhamento, contribuindo para a existência de uma pseudo-árvore multicast, que resulta em atrasos de transferência de mensagens mais curtos. Há situações em que o multicast tem mesmo melhor desempenho que o unicast, como se nota em especial no Cenário 2. Isto é justificado pelo uso de nós localizados em pontos estratégicos que são cruciais para o desempenho da comunicação.

O multicast pode melhorar a eficiência das RTAs, ao economizar recursos pela minimização da replicação de mensagens na rede. Menos replicações, significa que são necessárias menos capacidades de processamento, ficando disponível mais memória e capacidade de transmissão, e os pacotes sofrem menos atrasos e perdas. Isto permite uma valiosa contribuição para a qualidade de serviço das RTAs, tal como para os outros sistemas de comunicação.

Alguns tópicos para trabalho futuro são: testar outras heurísticas para a construção da pseudo-árvore multicast, outros mecanismos de escalonamento; e avaliar o efeito do erro ou falta de informação na informação de localização.

REFERÊNCIAS

- [1] V. Cerf et al., “Delay Tolerant Network Architecture”, IETF, RFC 4838, Abril 2007.
- [2] K. Scott, S. Burleigh, “Bundle Protocol Specification”, IETF, RFC 5050, Novembro 2007.
- [3] A. Vahdat, D. Becker, “Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Network”, Duke University Technical Report Cs-200006, Abril 2000.
- [4] A. Lindgren, A. Doria, E. Davies, S. Grasic, “Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks”, IETF, draft-irtf-dtnrg-prophet-02.txt, Março 2009.
- [5] S. Symington, R. Durst, “Bundle Protocol Extensions to Support Multicasting”, IETF, draft-irtf-dtnrg-bundle-multicast-00.txt, Outubro 2005.
- [6] W. Zhao, M. Ammar, E. Zegura, “Multicasting in Delay Tolerant Networks: Semantic Models and Routing Algorithms”, SIGCOMM’05, Philadelphia, USA, Agosto 2005.
- [7] Susan Symington, Robert C. Durst, Keith Scott, “Custodial Multicast in Delay Tolerant Networks”, 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC’2007, pp.207-211, Janeiro 2007.
- [8] José Santiago, Augusto Casaca, Paulo Rogério Pereira, “Multicast in Delay Tolerant Networks using Probabilities and Mobility Information”, *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, An International Journal*, vol. 7, number 1-2, pp. 51-68, 2009.
- [9] José Santiago, Augusto Casaca, “Non-Custodial Multicast Operations on Intermittently Connected Networks”, EuroFGI Workshop on IP and Traffic Control, pp.143-150, Lisboa, Portugal, Dezembro 2007.
- [10] A. Lindgren, A. Doria, O. Schelén, “Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks”, Mobile Computing and Communication, Springer LNCS, Volume 3126, pp. 239-254, Janeiro 2004.
- [11] T. Camp, J. Boleng, V. Davies, “A survey of mobility models for ad hoc network research,” *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, vol. 2, no. 5, pp. 483-502, 2002.
- [12] Anders Lindgren Software Releases. <http://www.sm.luth.se/~dugdale/index/software.shtml>